

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR SIDERÚRGICO A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE
HIDROGÊNIO: DESEMPENHO AMBIENTAL E POTENCIAL

MARIANA GOMES CARDOSO DE ABREU

Itajubá – Minas Gerais

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

MARIANA GOMES CARDOSO DE ABREU

DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR SIDERÚRGICO A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE
HIDROGÊNIO: DESEMPENHO AMBIENTAL E POTENCIAL

Texto final submetido ao Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como um dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Itajubá.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Silva Capaz

Itajubá – Minas Gerais

2023

RESUMO

Devido ao uso de carvão mineral e à alta demanda energética, o setor siderúrgico representa 30% das emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) do setor industrial e em torno de 10% das emissões totais do setor energético. Logo, a descarbonização do setor siderúrgico envolve mudanças em seus processos e transição energética de todos os setores envolvidos. O uso do gás hidrogênio (H_2) no contexto da descarbonização siderúrgica destaca-se pela atuação como redutor da carga ferrífera e como combustível. Objetivando discutir o potencial de redução de GEE na produção de aço, considerando o uso do H_2 como redutor, foram comparadas rotas siderúrgicas sob dois aspectos: desempenho ambiental e potencial atual e futuro do uso do H_2 . No primeiro, calculou-se a pegada de carbono do aço, a partir da análise ciclo de vida (ACV) com metodologia IPCC e uso da base de dados ECOINVENT, em comparação com o *GHG Protocol*, considerando 3 cenários em condições brasileiras: a produção do aço a coque mineral (1), a produção do aço a carvão vegetal (2) e a rota de redução direta com H_2 redutor (3). Ainda, as tendências do setor siderúrgico foram discutidas a partir dos relatórios setoriais e corporativos dos líderes do mercado. Na discussão dos resultados, o Cenário 2 resultou em 41,8% menos emissões de GEE que o Cenário 1. Já o Cenário 3, com H_2 cinza, implicou em 57,8% menos emissões que o Cenário 1 e, com H_2 verde, o resultado foi 87,3% menos. O cálculo da pegada de carbono via ACV foi considerado mais apropriado à realidade de produção do aço em comparação aos outros métodos citados. Ainda, foi possível identificar vantagens do contexto brasileiro acerca do pioneirismo na utilização de carvão vegetal para produzir aço e na contribuição de 80% de energias renováveis da matriz elétrica do país. Na avaliação dos planos de descarbonização, 54% mencionam o H_2 como um passo a ser dado para a descarbonização, porém 31% sugerem investimento em redução direta com H_2 redutor. Apesar das projeções de descarbonização da siderurgia apontarem para tecnologias disruptivas, é unânime que os primeiros passos serão pelas melhores técnicas disponíveis para os cenários já existentes, eficiência energética, preferência pelas energias renováveis e incentivo à pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

Palavras-chave: Descarbonização; Siderurgia; Hidrogênio redutor; Hidrogênio combustível; Análise de ciclo de vida.

ABSTRACT

Due to the use of coal and the high energy demand, the steel sector represents 30% of the total emissions of greenhouse gases (GHG) in the industrial sector and around 10% of the total emissions from the energy sector. Therefore, the decarbonization of the steel sector involves changes in its processes and the energy transition of all sectors involved. The use of hydrogen (H₂) in the context of steelmaking decarbonization implies its role as a reducer and as fuel. Aiming the potential for reducing GHG in steelmaking, considering the use of H₂ as a reducer, conventional steel routes were compared under two aspects: environmental performance and current and future potential for the use of H₂. First, the carbon footprint was estimated, in a life cycle analysis (LCA) using IPCC method, ECOINVENT data in comparison to GHG protocol, considering 3 scenarios in Brazilian conditions: steelmaking using coke (Scenario 1), steelmaking using charcoal (Scenario 2) and the direct reduction route with gray and green H₂ (Scenario 3). Second, trends in the steel sector were discussed based on sectoral and corporate reports from the biggest players. When discussing the results, Scenario 2 resulted in 51% less GHG emissions than Scenario 1. Scenario 3, with gray H₂, implied 65% less emissions than Scenario 1 and, with green H₂, the result was 89% less. Benefits have been realized in using LCA to calculate carbon footprint. Furthermore, it was possible to identify advantages of the Brazilian context regarding the pioneering use of charcoal in steelmaking and the 80% share of renewable energy in the country's electricity mix. Evaluating the decarbonization plans, 54% cite H₂ as a step to be taken to meet the targets, but just 31% mention the investment in direct reduction with H₂ reducer. Despite the prospects for decarbonizing the steel industry pointing to disruptive technologies, it is unanimous that the first step should be the best available techniques for existing scenarios, the energy efficiency, the preference for renewable energies and incentives for research and technology.

Keywords: Decarbonization; Steel industry; Steelmaking; Reducing hydrogen; Fuel hydrogen; Lifecycle analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Histórico da produção mundial de aço bruto (em Mt), de 1950 a 2021 e a média do crescimento percentual de demanda (WSA, 2022a).....	16
Figura 2 – Esquema simplificado de rotas para produção de hidrogênio.....	43
Figura 3 - Classificação em cores do hidrogênio a partir de sua produção	43
Figura 4 – Análise contribucional para o Cenário 1.....	66
Figura 5 – Análise contribucional para o Cenário 2.....	67
Figura 6 – Análise contribucional para o Cenário 3A.....	67
Figura 7 – Análise contribucional para o Cenário 3B.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Média dos consumos de plantas de sinterização	20
Tabela 2 - Média dos consumos de plantas de pelotização	21
Tabela 3 - Média dos consumos de coqueiras	23
Tabela 4 - Média dos consumos de altos-fornos a coque	28
Tabela 5 - Média dos consumos de aciarias a oxigênio.....	32
Tabela 6 - Média dos consumos de aciarias com fornos elétricos a arco	34
Tabela 7 – Fatores de emissão e suas respectivas referências para o cálculo de GEE dos combustíveis	51
Tabela 8 – FE <i>upstream</i> e as respectivas referências para os óxidos de ferro, fundentes e gases criogênicos	52
Tabela 9 - FEs e referências relacionados aos fundentes crus, calcário e dolomita	53
Tabela 10 – FE <i>upstream</i> considerados para duas formas de produção de hidrogênio	53
Tabela 11 - Balanço de massa elaborado para o Cenário 1 - Usina siderúrgica convencional BF-BOF.....	55
Tabela 12 - Produtos generalizados para uma usina siderúrgica brasileira a coque mineral e os valores considerados para o cálculo do fator de alocação	56
Tabela 13 - Balanço de massa elaborado para o Cenário 2 - Usina siderúrgica BF-BOF a carvão vegetal	57
Tabela 14 - Balanço de massa elaborado para o Cenário 3 - Usina siderúrgica DR – H ₂ – EAF.....	59
Tabela 15 – Empresas selecionadas para análise do panorama global de descarbonização no setor siderúrgico	60
Tabela 16 – Resultado das emissões calculadas para a siderúrgica BF-BOF (Cenário 1)	62
Tabela 17 - Resultado das emissões calculadas para a BF-BOF a carvão vegetal (Cenário 2).....	63
Tabela 18 - Resultado das emissões calculadas para a siderúrgica DR-H ₂ -EAF, com produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do gás natural e da eletrólise com fontes renováveis (Cenário 3A e Cenário 3B).....	64
Tabela 19 – Intensidade de emissões das 5 categorias definidas para cada cenário proposto (tCO _{2eq} /tab).....	65

Tabela 20 – Resumo da comparação entre os cenários calculados neste trabalho e estudos semelhantes da literatura científica (valores expressos em tCO ₂ /tab).....	70
Tabela 21 - Intensidade de emissões, em tCO ₂ /tab, das rotas siderúrgicas levantadas pelas principais entidades	73
Tabela 22 – Resumo dos dados relacionados à pegada de carbono referente aos principais grupos siderúrgicos	80

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas	GNGGI - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
ACV - Análise de Ciclo de Vida	GWP - Global Warming Potential
ADNOC - Abu Dhabi National Oil Company	HBI - Hot Briquetted Iron
AR5 - Fifth Assessment Report	HTA - Hard to Abate
BAT – Best Available Techniques	IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
BEG - Balanço Energético Global	IEA - International Energy Agency
BEN - Balanço Energético Nacional	IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
BF - Blast Furnace	IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
BFG - Blast Furnace Gas	ISO - International Organization for Standardization
BOF - Basic Oxygen Furnace	LD - Linz-Donawitz
CCUS - Carbon capture, utilization, and storage	MPP - Mission Possible Partnership
CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos	NBR - Norma Brasileira
CO _{2eq} - Dióxido de carbono equivalente	NCV - Net Calorific Value
COG - Coke Oven Gas	OHF - Open Heart Furnace
COP - Conference of the Parties	ONG - Organização não-governamental
CV – Carvão vegetal	PCI - Pulverized Coal Injection
DRI - Direct Reduced Iron	PEM - Proton Exchange Membrane
DR - Direct Reduction	SOEC - Solid Oxide Electrolyzer Cell
EAF - Electric Arc Furnace	tab - Tonelada de aço bruto
EFDB - Emission Factor Database	UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change
EOF - Energy Optimized Furnace	WSA - World Steel Association
EPE - Empresa de Pesquisa Energética	
ETC - Energy Transitions Commission	
FE - Fator de Emissão	
GEE - Gases de Efeito Estufa	
GHG - Greenhouse Gases	
GLP - Gás liquefeito de petróleo	

SUMÁRIO

1.	Introdução	10
2.	Objetivos	13
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1.	Breve história da siderurgia e seu contexto mundial	14
3.2.	Etapas dos processos siderúrgicos – Redução	18
3.2.1.	Aglomerados de Ferro: Sínter e Pelotas	19
3.2.2.	Agentes Redutores: Coque e Carvão Vegetal	22
3.2.3.	Reatores de Redução: Altos-fornos e Módulos de Redução Direta	25
3.3.	Etapas dos processos siderúrgicos – Refino	30
3.3.1.	Aciarias a Oxigênio	31
3.3.2.	Fornos Elétricos a Arco	32
3.3.3.	Lingotamento	34
3.4.	Etapas dos processos siderúrgicos – Conformação	35
3.5.	A descarbonização no setor siderúrgico	35
3.5.1.	Linha do tempo do contexto da descarbonização da siderurgia	39
3.5.2.	O papel do hidrogênio no setor siderúrgico	42
3.6.	Potencial brasileiro para mudança no setor siderúrgico com hidrogênio	46
4.	Metodologia	48
4.1.	Desempenho Ambiental	48
4.1.1.	Definição dos fatores de emissão de GEE	50
4.1.2.	Cenário 1	54
4.1.3.	Cenário 2	56
4.1.4.	Cenário 3	58
4.2.	Potencial do uso do hidrogênio na descarbonização do setor siderúrgico	59
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1.	Desempenho Ambiental	62

5.1.1.	Pegada de carbono referente aos cenários em condições brasileiras	62
5.2.	Potencial do uso do hidrogênio na descarbonização do setor siderúrgico	76
5.2.1.	Comparação dos reports nacionais e internacionais	76
6.	Considerações Finais	85
6.1.	Sugestões para trabalhos futuros	87
7.	Referências Bibliográficas	88
	ANEXO A – Tabela de extração do poder calorífico dos combustíveis utilizados para o cálculo da pegada de carbono dos cenários deste trabalho (IPCC, 2006)	99
	ANEXO B – Tabela de extração dos fatores de emissão relacionados à combustão dos combustíveis utilizados para o cálculo da pegada de carbono dos cenários deste trabalho (IPCC, 2006)	101
	ANEXO C – Tabelas de conversão de energia para unidade dos insumos utilizados para cálculo da pegada de carbono do cenário 1 (ARCELORMITTAL, 2017)	103
	ANEXO D – Balanço global de energia dos dados utilizados para cálculo da pegada de carbono do cenário 1 (ARCELORMITTAL, 2017)	104
	ANEXO E - Tabela de conversão de energia para unidade dos insumos utilizados para cálculo da pegada de carbono do cenário 2 (APERAM, 2016)	105
	ANEXO F - Balanço global de energia dos dados utilizados para cálculo da pegada de carbono do cenário 2 (APERAM, 2016)	106

1. INTRODUÇÃO

A década de setenta foi marcada como o estopim das discussões acerca das mudanças climáticas, ocasionadas pela intensificação do efeito estufa¹, após os desdobramentos das revoluções industriais. Desde então, periodicamente, debates e acordos mundiais são realizados, objetivando, dentre outros, conter o aumento das emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE) e mitigar os impactos ambientais derivados (UNEP, 2022).

Foi previsto que, para que seja possível manter condições saudáveis de vida no planeta preservando a qualidade para as gerações futuras, o aquecimento global precisa ser limitado em até 1,5 °C em relação às eras pré-industriais. Sendo assim, ações imediatas devem ser tomadas assegurando o respeito a esse limite (IPCC, 2019).

Nesse sentido, a quantificação dos GEE de origem antrópica, através do cálculo da pegada de carbono, em termos da unidade quantidade de dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}), com limites definidos, é um dos principais parâmetros norteadores para tomada de decisão. Também, a identificação setorial é fator crucial para a elaboração de estratégias direcionadas para o abatimento das emissões calculadas, considerando as particularidades locais e de atividades.

Durante as últimas conferências para a definição de acordos mundiais acerca das mudanças climáticas, a descarbonização dos principais emissores de cada setor econômico foi considerada fundamental (UNEP, 2022).

Em termos globais, o setor energético é o maior emissor de GEE em comparação aos demais setores econômicos, sendo responsável por 14,65 Gt CO₂, considerando o ano de 2022. Em segundo lugar encontra-se o setor industrial com 9,15 Gt CO₂, analisando o mesmo ano (IEA, 2023b).

O setor siderúrgico, em termos da representatividade de suas emissões de GEE, é um subgrupo tanto do setor energético, quanto do setor industrial. Dentre as indústrias de base, é o maior emissor, representando, aproximadamente, 30% do total do setor. Em termos de energia, é o segundo maior consumidor, representa em torno de 7% a 10% das emissões de GEE do setor (IEA, 2020a, 2023a).

Essa magnitude em emissões é corroborada mediante os principais insumos envolvidos nos processos convencionais de fabricação de aço, o carvão mineral, que é utilizado como

¹ Fenômeno natural de equilíbrio térmico global, no qual os GEEs presentes na atmosfera absorvem a radiação infravermelha refletida pela superfície terrestre e são responsáveis por manter as temperaturas ideais, em equilíbrio com o ecossistema.

combustível e como redutor dos óxidos de ferro, e a alta demanda energética, tanto térmica quanto elétrica, que na maioria dos casos implica na dependência de combustíveis fósseis.

Por consequência, o setor siderúrgico está inserido no contexto dos grandes emissores de GEE denominados “*hard to abate*” (HTA). Esse termo faz referência ao carbono fóssil ser inerente às metodologias mais difundidas no tipo de processo de produção, de forma direta, indireta ou ambas.

As indústrias HTA são consideradas indispensáveis para a sociedade moderna e, se tratando da produção do aço, a demanda anual projetada é, majoritariamente, sempre crescente. Para o ano de 2022 com relação a 2021, a *World Steel Association* (WSA) previu um aumento de produção de 0,4%, um acréscimo de 8 Mt de aço bruto (tab). Esse valor corresponde à produção total da Áustria, que está listada em 25º lugar no *ranking* dos 50 maiores produtores do mundo (WSA, 2022a).

O impacto dessa alta demanda global de aço está no fato de que, mesmo que todas as indústrias existentes alcancem seu máximo de produção da forma mais eficiente e sustentável possível, a quantidade de emissões de GEE abatidas não seria suficiente para mitigar a considerável participação que o setor siderúrgico tem no agravamento do efeito estufa (SEGUINEAUD, 2022).

Assim sendo, a descarbonização desse tipo de indústria passa a ser um investimento alto e dependente de transformações dentro do que se conhece atualmente a respeito do processo siderúrgico. São necessárias adaptações tecnológicas nos modelos convencionais, descomissionamentos de unidades ineficientes, transições energéticas, diversidade de rotas de produção e introdução de tecnologias disruptivas (MPP, 2022; SEGUINEAUD, 2022).

Em suma, as projeções atuais de descarbonização a longo prazo dos setores HTA, como é o caso da siderurgia, considerando 50 anos a partir de 2020, atribuem a redução de metade das emissões de GEE do período à quatro grupos de tecnologias: i) eletrificação; ii) captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS); iii) hidrogênio de baixo carbono e combustíveis sintéticos; iv) bioenergia (IEA, 2020b).

Com relação às particularidades do setor siderúrgico, a tendência de sua descarbonização e do investimento das grandes entidades do meio está no gás hidrogênio. Cerca de 40% das emissões estimadas para o setor na próxima década podem ser abatidas através do H₂, produzido a partir de energias renováveis, utilizado como redutor da carga ferrífera (MPP, 2022).

Em consequência, no cenário internacional, os grupos siderúrgicos de maior relevância como o *China Baowu Steel Group*, a *Nippon Steel Corporation*, o *Tata Steel Group*, o *Thyssenkrupp* e a *ArcelorMittal*, declararam investimentos recentes em pilotos e pesquisas acerca da atualização de seus processos para comportar o uso do hidrogênio como redutor e como combustível (ARCELORMITTAL, 2021; CHINA BAOWU STEEL GROUP, 2020; NIPPON STEEL CORPORATION, 2022a; TATA STEEL GROUP, 2022; THYSSENKRUPP, 2022).

Já no cenário nacional, apesar de o Brasil ocupar o 9º lugar no *ranking* dos maiores produtores mundiais de aço, não há declaração explícita, até a finalização deste trabalho, sobre testes nas siderurgias considerando o uso de hidrogênio em território brasileiro. Todavia, o país lidera o mercado mundial de produção de aço a partir do carvão vegetal, que é uma das tecnologias promissoras no contexto da bioenergia (IAB, 2017; WSA, 2022a).

Nesse sentido, em vista das rotas atuais de produção de aço no Brasil, este trabalho discutiu o desempenho ambiental e o potencial de uso do gás hidrogênio como redutor da carga ferrosa no setor siderúrgico. Tomou-se como base o setor siderúrgico brasileiro em função de características peculiares como o uso de carvão vegetal na produção de aço e o reconhecido potencial de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis.

2. OBJETIVOS

Avaliar e discutir o potencial de redução de emissões de GEE na produção de aço, considerando as rotas de redução via carvão mineral com aciaria a oxigênio, de redução via carvão vegetal com aciaria a oxigênio e de redução direta com aciaria elétrica, considerando o uso do gás hidrogênio como principal redutor da carga ferrífera deste último.

Para tal, os objetivos específicos são:

- Descrição dos processos produtivos de aço no mundo e no contexto brasileiro;
- Avaliação da pegada de carbono do aço em condições brasileiras atuais;
- Avaliação da pegada de carbono do aço na rota de redução direta adaptada para o cenário brasileiro, assumindo a utilização do hidrogênio como agente redutor;
- Discussão sobre as tendências observadas na literatura e nos relatórios dos principais grupos siderúrgicos mundiais e nacionais acerca da descarbonização do setor e da inclusão do hidrogênio nas metas de redução de emissões de GEE.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Breve história da siderurgia e seu contexto mundial

Desde a primeira produção de aço até os processos desenvolvidos hoje para a indústria siderúrgica, há o consenso de que as rotas que incluem a manipulação do ferro primário líquido nas aciarias com conversores a oxigênio (conversores LD²) são as de melhor custo-benefício ao se considerar largas escalas de produção e diferentes tipos de aço (JUNIOR, 2002).

As rotas de fabricação do aço que incluem essas aciarias LD são chamadas de rotas BF-BOF (do inglês *Blast Furnace – Basic Oxygen Furnace*), uma vez que o produto a ser refinado nos conversores LD (também chamados de convertedores ou BOF), que é o ferro primário líquido (ou ferro-gusa), provém de um setor que necessita estar próximo a essas aciarias, que é o setor dos altos-fornos (BF), para o aproveitamento térmico desse produto.

As siderúrgicas de rota BF-BOF são também chamadas de usinas integradas convencionais. Integradas pelo fato de englobarem o processo de redução dos óxidos de ferro antes da produção do aço em si e convencionais por ser o método de produção mais difundido mundialmente (WSA, 2022a).

Quando uma siderúrgica não possui o processo redução, ela é denominada usina semi-integrada ou *mini-mill*. Neste caso, a rota inicia-se a partir da aciaria elétrica, via Forno Elétrico a Arco (EAF, do inglês *Electric Arc Furnace*), no qual o aço é obtido a partir da fusão de elementos como sucatas variadas, gusa sólido e ferro-esponja (também chamado de ferro primário sólido ou DRI, do inglês *Direct Reduced Iron*).

Uma outra rota de fabricação de aço bem difundida, que também pode ser considerada integrada, é a rota DR-EAF. A sigla DR vem do termo *Direct Reduction* e sinaliza que no lugar do alto-forno existe um forno de redução direta. Sendo assim, o produto do forno não é o ferro-gusa e sim o ferro-esponja que, por ser sólido e abaixo da temperatura ideal do gusa, é normalmente transformado em aço na aciaria elétrica.

As usinas integradas podem ser divididas em três grandes etapas: a redução, o refino e a conformação (quando há transformação mecânica/laminação na unidade). Já as semi-integradas podem ser divididas em refino e conformação (quando o aço é conformado na própria unidade de produção).

Em um panorama mundial, de acordo com a WSA, 70,8% da produção de aço é feita em siderurgias que seguem a rota BF-BOF, 28,9% da produção de aço envolve aciarias EAF e

² No início de 1950, a siderúrgica austríaca Voest-Alpine desenvolveu os conversores a oxigênio, que são chamados de conversores LD devido à primeira planta, em 1952, a Linz e Donavitz na Áustria (JUNIOR, 2002).

0,3% são outras técnicas de fabricação de aço, como as aciarias OHF³ e EOF⁴ (WSA, 2022a). De forma análoga, no cenário brasileiro, segundo o Instituto Aço Brasil, 75,6% das usinas siderúrgicas utilizam a rota BF-BOF, 23,3% a rota EAF e 1,2% a rota EOF (IAB, 2022).

As emissões mais significativas da indústria do aço são emitidas na fabricação do ferro primário. Dentro das usinas BF-BOF, 47% das emissões estão nos setores do alto-forno, coqueria e sinterização e 42% correspondem à planta de energia. Considerando que a função da planta de energia é fornecer ar soprado, vapor e eletricidade, principalmente para as etapas de redução, cerca de 90% das emissões de GEE das usinas integradas está na produção do gusa (SUER; TRAVERSO; AHRENHOLD, 2021).

No ano de 2021 foram produzidas 1,95 Gt de aço bruto mundialmente. Desse total, 83%, o correspondente a 1,62 Gt de aço bruto, foram fabricados pelos 10 maiores produtores mundiais: China, Índia, Japão, Estados Unidos, Rússia, Coreia do Sul, Turquia, Alemanha, Brasil e Irã, em ordem de participação no todo (WSA, 2022a).

A China sozinha produziu cerca de 53% do total mundial, seguida da Índia, com a produção de 6% do total. Ambos os países lideram rotas distintas de fabricação de aço, 64% da produção mundial via ferro-gusa é chinesa e 34% da produção mundial via ferro-esponja é indiana (WSA, 2022a).

A Figura 1 abaixo ilustra o histórico de produção mundial do aço, durante os anos de 1950 a 2021 e destaca três grandes períodos importantes: o superciclo de *commodities*⁵ com a reestruturação dos países após a segunda guerra mundial, as crises econômicas nas três décadas finais do século XX e o *boom* de *commodities* dos anos 2000. A volatilização do preço de *commodities* impacta diretamente na produção e investimento do mercado do aço (OLIVEIRA, 2020).

³ *Open Heart Furnace* ou forno Siemens-Martin, tecnologia de fabricação de aço popular no séc. XX, antes da difusão dos conversores LD. A tecnologia consiste na desoxidação da sucata de ferro, sob altas temperaturas, que liberam oxigênio para que as impurezas do ferro-gusa ou do ferro-esponja sejam oxidadas.

⁴ *Energy Optimized Furnace* é o mesmo que a tecnologia BOF com acréscimo de uma etapa de pré-aquecimento da carga sólida do convertedor.

⁵ Produtos de origem primária caracterizados pelo pequeno grau de industrialização, produção em larga escala e homogeneidade (OLIVEIRA, 2020).

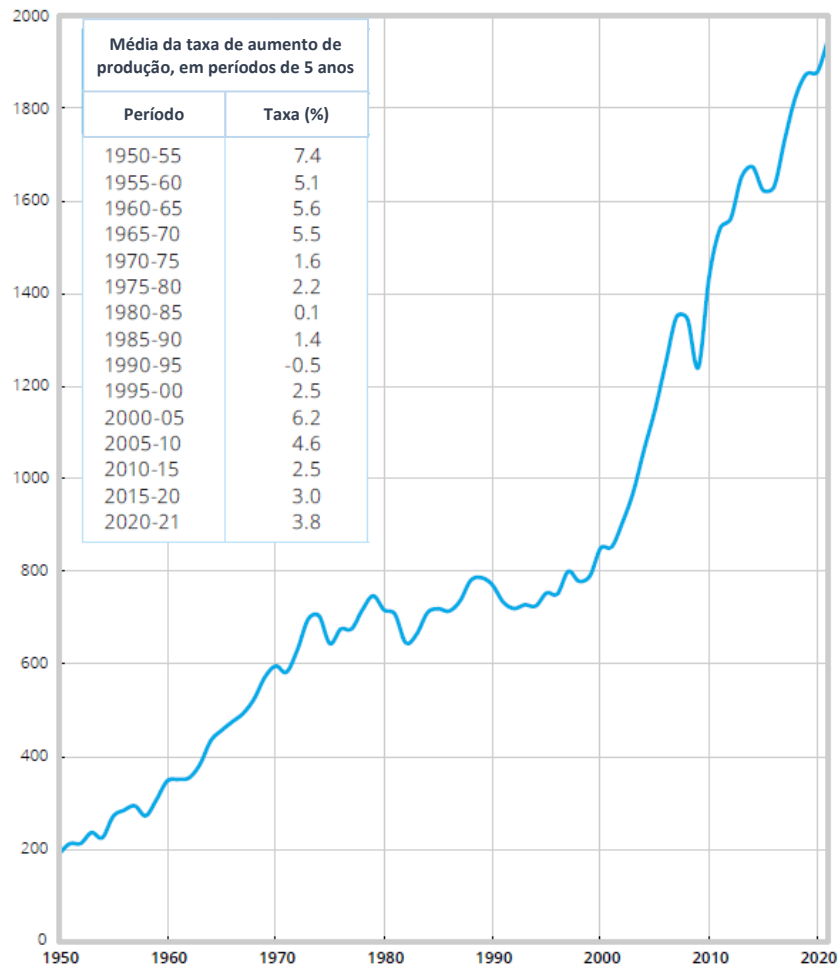


Figura 1 - Histórico da produção mundial de aço bruto (em Mt), de 1950 a 2021 e a média do crescimento percentual de demanda (WSA, 2022a)

O *boom de commodities* dos anos 2000 ganha destaque principalmente por ter tido como uma de suas alavancas os planos de industrialização acelerada de países como China e Índia, que hoje configuram como o primeiro e o segundo maior produtor de aço no mundo, tendo influência direta nos próximos passos a serem dados pelo setor (OLIVEIRA, 2020).

O setor siderúrgico chinês é composto por 89,4% rota BF-BOF e 10,6% rota EAF sem a produção de DRI, indicando que suas aciarias elétricas são exclusivamente recicladoras de sucata. Por outro lado, a Índia tem suas siderurgias divididas em 55,2% rota EAF, produzindo DRI e 44,8% rota BF-BOF (WSA, 2022a).

A matriz energética chinesa, referente ao ano de 2021, consistiu em 54,66% carvão mineral, 19,41% petróleo, 8,65% gás natural, 7,77% hidrelétricas, 7,18% fontes renováveis e 2,33% fonte nuclear. O que demonstra que mais de 90% da demanda energética do país é suprida por fontes fósseis (BP P.L.C., 2022).

A matriz energética da Índia, no ano de 2021, consistiu em 56,7% carvão mineral, 26,56% petróleo, 6,32% gás natural, 5,05% fontes renováveis, 4,26% hidrelétricas e 1,13%

fonte nuclear. Assim como a China, a Índia tem grande dependência do carvão mineral e quase 90% de sua demanda energética suprida por fontes fósseis (BP P.L.C., 2022).

A importância de destaque desses dados está em dois pontos: a codependência mundial entre o setor siderúrgico, a sua alta-demanda energética e o monopólio da rota BF-BOF, bem como as matrizes energéticas dos maiores produtores ser predominantemente composta por fontes fósseis, o que reforça a siderurgia ser uma indústria HTA.

A dependência mundial do aço sinaliza urgência na necessidade de responsabilização do setor sobre os impactos ambientais atrelados a seu modo produtivo, uma vez que a indústria do aço tem interface com outras indústrias também de impactos significativos, como é o caso da mineração e da produção de eletricidade.

A demanda energética das usinas siderúrgicas pode ser suprida através da utilização dos gases de processo (gás de coqueria, gás de alto-forno, gás de aciaria) como combustíveis, da utilização de óleos combustíveis externos, de gás natural, de carvão pulverizado, dentre outros. Através desses combustíveis se produz as energias térmicas e elétricas necessárias para a planta em suas unidades termelétricas. Porém, nem toda planta siderúrgica é capaz de suprir suas demandas energéticas, dependendo assim de fontes externas de energia e desperdiçando gases de processo, coprodutos combustíveis e energias térmicas residuais.

Ainda, devido ao consumo de energia elétrica, principalmente quando as usinas não são autossuficientes, a siderúrgica tem corresponsabilidade na produção dessa eletricidade entregue pela rede de onde a planta está localizada. Salienta-se neste contexto que, em uma perspectiva mundial, mais de 60% da produção de energia elétrica se dá a partir de combustíveis fósseis (IEA, 2022a).

Ademais, considerando a rota convencional, há grande demanda por carvão mineral, que é o insumo principal dessa rota de produção do aço. Sua origem, na perspectiva do Brasil, é internacional e advém de minas localizadas em países como Rússia, Austrália, Estados Unidos e China, o que torna a siderúrgica corresponsável pela produção e pelo transporte marítimo e/ou aéreo desse insumo até sua unidade, além do transporte terrestre.

Além do carvão mineral, na rota tradicional de produção do aço, a outra matéria-prima principal da siderurgia é o minério de ferro. Esta é proveniente de minas de ferro mineral, que tem uma sólida base nacional de produção, tornando a siderurgia também corresponsável pela produção e transporte terrestre até sua planta.

Portanto, uma indústria siderúrgica tem responsabilidade atrelada na produção e transporte de todos os insumos importados, que são inerentes ao seu processo produtivo e tem

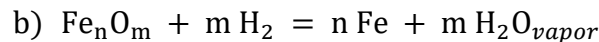
responsabilidade sobre o processo em si, aquele que envolve o uso dessas matérias-primas, dos combustíveis e envolve a geração dos produtos e subprodutos.

Em uma análise de ciclo de vida do carbono, para quantificação dos GEE de responsabilidade das siderúrgicas na fabricação do aço, é possível atribuir aqueles envolvidos na produção e transporte das matérias-primas utilizadas e os envolvidos em sua metodologia de produção.

Nos itens seguintes estão descritas as etapas dos processos siderúrgicos mais utilizados mundialmente, bem como as possibilidades de descarbonização e uso do hidrogênio.

3.2. Etapas dos processos siderúrgicos – Redução

A etapa de redução é determinada pela fabricação de ferro primário, a partir da redução de materiais ricos em ferro, geralmente óxidos de ferro, dentro de um reator térmico. Esta etapa também envolve os precursores da redução, como a preparação e/ou o armazenamento da matéria-prima, para controle de qualidade e de produção. A redução em si corresponde a um processo termoquímico de retirada das moléculas de oxigênio dos óxidos de ferro via um agente redutor, conforme as duas equações simplificadas a seguir:



Ambas as equações correspondem à redução de um óxido de ferro a partir de um gás redutor, resultando na separação das moléculas de ferro e na liberação de CO₂ ou vapor d'água. Na siderurgia BF-BOF, a redução ocorre conforme a equação a). Já na siderurgia DR-EAF, no caso da reforma a vapor do gás natural, a redução acontece conforme as equações a) e b).

Os óxidos de ferro são provenientes das minas de minério de ferro, podendo ser: minério granulado (*lump*), finos para sinterização (*sinter feed*) e/ou finos para pelotização (*pellet feed*). Devido ao desgaste natural das reservas minerais de ferro atuais, há uma maior tendência de geração de finos e geração de granulado com teor de ferro abaixo do ideal, o que contribui para a necessidade de adequação desses insumos (JUNIOR, 2018).

Também, devido à tecnologia dos reatores de redução mais utilizados nos processos siderúrgicos, que utilizam gás redutor em contracorrente, há a necessidade de tornar as partículas do minério de ferro maiores, de forma a garantir a permeabilidade desse gás ao longo

da carga. Dessa forma, os finos do minério de ferro precisam ser aglomerados para garantir a granulometria ideal permeável e, além disso, garantir o teor de ferro desejável.

Assim, os processos de aglomeração de finos de minério de ferro mais empregados mundialmente são a sinterização e a pelotização e seus produtos são o sinter e as pelotas, que funcionam como carga dos altos-fornos, para produção de ferro-gusa. As pelotas também têm emprego nas cargas de reatores de redução direta para fabricação de ferro-esponja.

O agente redutor majoritariamente empregado no setor siderúrgico, em âmbito mundial, é o coque, devido à representatividade já citada das usinas BF-BOF que o utilizam. Ademais, considerando o cenário brasileiro, além do coque, o carvão vegetal também é amplamente empregado como redutor.

O coque é produzido no setor denominado coqueria, a partir da mistura de carvões minerais. O carvão vegetal provém da carbonização de biomassa, geralmente de eucalipto, que é feita nas próprias unidades madeireiras.

Abaixo estão descritos os principais componentes das etapas de redução.

3.2.1. *Aglomerados de Ferro: Sinter e Pelotas*

O emprego dos óxidos de ferro nos reatores de redução depende da granulometria do material. O minério granulado, que pode ser diretamente aplicado nos reatores, possui tamanho variando de 37,5 mm a 6,35 mm. Já os finos de minério têm menor granulometria, o *sinter feed* possui entre 6,35 mm e 0,150 mm e o *pellet feed* possui partículas menores que 0,150 mm. (JUNIOR, 2018).

Ambos os finos (*sinter feed* e *pellet feed*) precisam ser aglomerados para que sejam posteriormente reduzidos nos fornos, pois, quando utilizados *in natura*, criam uma estrutura compacta e pouco porosa, que impede a passagem do gás redutor, impossibilitando a fusão correta da carga, assim como geram riscos à estrutura dos reatores.

O *sinter feed* passa pelo processo de sinterização, que faz a fusão de uma mistura desse material junto com aditivos fundentes (cal, calcários, dentre outros), resíduos dos demais processos que são reaproveitados como coprodutos, finos de coque (*coke breeze*), carvão antracito, sinter de retorno e água (para controle de umidade), sob temperaturas de 1300 °C a 1500 °C (JANKOV; HAYASHI, 2015; SILVA, 2011).

A mistura é distribuída uniformemente sobre uma “falsa” grelha móvel (feita de sinter produzido) e passa por uma coifa de ignição criando uma combustão, que é alimentada por ar

succionado pela parte inferior da massa, que resultará na aglomeração das partículas. A massa final (sínter) é britada, peneirada e armazenada em silos (MOURÃO et al., 2007).

A Tabela 1 a seguir apresenta uma média dos consumos das matérias-primas e da energia em plantas de sinterização, por tonelada de sínter produzido, extraídos do documento diretriz das melhores técnicas disponíveis de produção de ferro e aço da Comissão Europeia.

Tabela 1 - Média dos consumos de plantas de sinterização
(adaptado de REMUS et al., 2013)

Matérias-primas		Unidade	Média de consumo
Minério de ferro		kg/t sínter	813,1
Finos de retorno de sinterização			250,7
Calcários			131,1
Finos de retorno do alto-forno			63,0
Materiais de retorno			51,8
Outros (restos do peneiramento de pelotas e minério granulado, sínter de dimensões inferiores)			31,4
Aditivos			26,4
Pó de coletor de alto-forno (tratamento do gás)			12,7
Cal			10,2
Energia			Unidade
Combustíveis	Combustível sólido (finos de coque, antracito)	MJ/t sínter	1276,6
	Gás de coqueria, gás de alto-forno, gás natural		67,0
Eletricidade	Para refrigeração		39,4
	Total eletricidade		Sem valor médio plausível

Ao longo do processo de sinterização há a geração de grandes quantidades de gases, por volta de 1500 a 2500 Nm³/t sínter. A principal emissão é durante o processo de combustão da massa, no qual há a queima dos materiais. Misturado a esse gás de combustão, há gases da calcinação dos fundentes da massa, material particulado, gases ácidos (SO_x, HCl, HF e NO_x), traços de mercúrio e possíveis dioxinas e furanos (JANKOV; HAYASHI, 2015).

Por ser um produto facilmente degradável, o sínter não resiste ao ser transportado em longas distâncias, sendo assim, a sua fabricação é predominantemente dentro das usinas siderúrgicas, nas unidades de sinterização, próximas ao alto-forno (CGEE, 2010).

Já o *pellet feed* é matéria-prima do processo de pelotização. Este é misturado com fundentes, aglomerantes (bentonita ou cal) e, quando o *pellet feed* é hematítico, é misturado com combustível sólido (carvão, coque, óleo combustível e similares). A mistura é umedecida para a formação das pelotas cruas, através do rolamento em tambores, cones ou discos. Em

sequência, a massa é submetida à queima em temperaturas que variam de 1250 °C a 1320 °C, então as pelotas são formadas pelo intercrescimento dos grãos (MOURÃO, 2017; SILVA, 2011).

A Tabela 2 a seguir apresenta uma média dos consumos das matérias-primas e da energia em plantas de pelotização, por tonelada de pelotas produzidas, extraídos do documento diretriz das melhores técnicas disponíveis de produção de ferro e aço da Comissão Europeia.

Tabela 2 - Média dos consumos de plantas de pelotização
(adaptado de REMUS et al., 2013)

Matérias-primas	Unidade	Média de consumo
Minério de ferro	kg/t pelotas	950,0
Bentonita		5,5
Olivina		13,8
Calcário		2,5
Dolomita		6,8
Quartzita		10,0
Aditivos		26,4
Energia	Unidade	Média de consumo
Gás de coqueria, gás de alto-forno	MJ/t pelotas	306,0
Gás natural		14,0
Finos de coque		342,0
Carvão		223,0
Óleo combustível		114,5
Eletricidade		76,5

No decorrer do processo de pelotização há a geração de grandes quantidades de gases, em torno de 1940 a 2400 Nm³/t pelotas. Assim como na sinterização, a principal emissão é durante o processo de combustão da massa, com a composição do gás bem semelhante ao do gás gerado na produção de sinter (REMUS et al., 2013).

Na produção de pelotas é possível adequar o teor de ferro para o maior possível, acima de 67,5% que é exigência de reatores de redução direta. Também, as pelotas têm maior resistência ao manuseio, transporte e armazenamento. Nesse sentido, a maioria das plantas de pelotização são construídas junto às mineradoras. O custo das pelotas, dentre os insumos minerais ferrosos, é o maior devido ao processo e à qualidade final do produto (CGEE, 2010; MOURÃO, 2017).

3.2.2. Agentes Redutores: Coque e Carvão Vegetal

O agente redutor tradicionalmente usado é o coque mineral metalúrgico, material resultante da pirólise de uma mistura de carvões minerais. Segundo Mourão et al. (2007), para a produção de um bom coque, os carvões necessitam de poucos voláteis e de propriedades químicas que os tornam plásticos. À vista disso, faz-se uma mistura de carvões para o controle e garantia desta característica.

A plasticidade da mistura de carvões é importante para que, durante a coqueificação, enquanto há a eliminação das matérias voláteis, a massa seja capaz de modificar a estrutura durante o tratamento térmico e voltar a solidificar em uma nova estrutura, com porosidade e dureza, que é denominada coque. Devido a essas necessidades, a disponibilidade de carvão metalúrgico, a baixo custo, está se tornando cada vez mais escassa (MOURÃO et al., 2007).

A fabricação do coque, através da coqueificação, se dá em unidades denominadas coquerias. Devido a sua demanda dentro da siderurgia, geralmente, a coqueria está localizada dentro da usina, próxima aos altos-fornos, para que ocorra o abastecimento fácil com essa matéria-prima.

A primeira etapa da fabricação de coque ocorre com a secagem da mistura de carvões que, após desidratação, são colocadas nas baterias de fornos para início do processo de fusão do material. Na fase de fusão é que ocorre o desprendimento do material volátil, em forma gasosa, que finaliza com a formação de uma estrutura sólida e esponjosa (SILVA, 2011).

A coqueria então consiste numa sequência de baterias de fornos verticais, nas quais uma mistura de gases é aquecida entre suas paredes, para fornecer energia térmica de forma homogênea, sem a combustão do conteúdo, garantindo a pirólise do material.

Os gases utilizados entre as paredes dos fornos costumam ser gases do próprio processo siderúrgico, como o gás de coqueria (COG, do inglês *coke oven gas*) e o de alto-forno (BFG, do inglês *blast furnace gas*), para que ocorra coqueificação dentro do forno em uma atmosfera pobre ou nula em oxigênio, em temperaturas entre 900 °C e 1100 °C (BABICH; SENK, 2019).

A Tabela 3 a seguir apresenta uma média dos consumos das matérias-primas e da energia em coquerias, por tonelada de coque produzido, extraídos do documento diretriz das melhores técnicas disponíveis de produção de ferro e aço da Comissão Europeia.

Tabela 3 - Média dos consumos de coquerias
(adaptado de REMUS et al., 2013)

Matérias-primas	Unidade	Média de consumo
Carvão seco	kg/t coque	1285,0
Energia	Unidade	Média de consumo
Gás de coqueria, gás de alto-forno	MJ/t coque	3550,0
Eletricidade		125,0

Após a coqueificação, o descarregamento do coque é incandescente e precisa de resfriamento imediato para que o material não se autoconsuma. Normalmente, o coque é resfriado com uma descarga d'água sobre o vagão do produto desenformado, podendo também ser resfriado com jateamento de gás inerte, como nitrogênio.

Todos os gases desprendidos das baterias no processo de coqueificação (COG), são capturados, resfriados e tratados para separação de alguns coprodutos. Normalmente o condensado resultante é decomposto em alcatrão, subprodutos de alcatrão e licor amoniacal para venda e/ou uso interno. Há também grande geração de vapor, que pode ser recuperado em plantas adaptadas para cogeração (SILVA, 2011).

São gerados, aproximadamente, 410 a 560 Nm³ de COG/t de coque produzidos, com composição aproximada, após tratamento do gás, de 55 a 63% de H₂, 22 a 28% de CH₄, 2 a 3% de C_mH_n e 2 a 3% de H₂O. O COG pode ser aplicado internamente na indústria siderúrgica para aquecimento das paredes dos fornos na coqueria, aquecimento dos regeneradores dos altos-fornos, ignição dos fornos da sinterização, reaquecimento de produtos nos fornos das laminações, aquecimento de painéis nas aciarias e geração de energia elétrica (BABICH; SENK, 2019).

No entanto, vale salientar que, historicamente, o primeiro agente redutor utilizado na fabricação de aço foi o carvão vegetal. A sua disponibilidade natural e facilidade de produção, através da carbonização da madeira, o tornava matéria-prima principal para a redução dos minerais ferrosos. Porém, ao longo do tempo, a demanda pelo insumo se tornou maior que a sua disponibilidade e o baixo rendimento carvão/madeira o deixou menos atrativo após a descoberta do carvão mineral.

Apesar de ser denominado carvão, ao contrário do carvão mineral que precisa ser aglomerado e transformado em coque, o carvão vegetal já é o produto tratado a partir da carbonização de biomassa ou, em alguns casos, trata-se de uma mistura pirolisada de resíduos da agricultura ou de briquetes desses insumos vegetais.

A indústria siderúrgica brasileira possui destaque significativo no setor de fabricação de aço a partir do carvão vegetal. Além disso, o Brasil é o maior produtor de carvão vegetal do mundo. Em 2020, das 54,8 Mt de carvão vegetal produzidos mundialmente, 6,4 Mt foram produzidas no Brasil, correspondendo a 11,6% da produção total (FAO, 2020). Ainda, das 6,4 Mt de carvão vegetal produzidas no ano de 2020, 4,58 milhões ou 71,6% foram dedicadas ao setor produtivo de ferro-gusa e aço (EPE, 2022a).

Em comparação às siderúrgicas integradas, de acordo com o Instituto Aço Brasil, para cada tonelada de ferro-gusa produzida, consome-se cerca de 720 kg de carvão vegetal, contra, aproximadamente, 371 kg de coque nas siderúrgicas a coque metalúrgico (IAB, 2022; SILVA et al., 2019).

O impacto da utilização do carvão vegetal como redutor na fabricação do aço, se dá a partir do momento em que as emissões de CO₂eq, provenientes do consumo desse carvão, resultam em um balanço nulo de carbono. Devido à captura do CO₂ existente na atmosfera, que ocorre através da fotossíntese, considera-se que o CO₂ liberado durante o consumo do carvão é novamente incorporado à atmosfera, sem acréscimos (HEBEDA et al., 2023).

A despeito de a utilização do carvão vegetal ser visto como estratégia relevante para a redução de emissões de GEE do setor siderúrgico, vale destacar que a forma de obtenção de carvão também deve ser considerada. Segundo o CGEE (2015), estima-se que no período de 2003 a 2012, a produção de carvão vegetal no Brasil se deu com 57% de florestas plantadas e 43% de florestas nativas, portanto é possível concluir que quase metade da produção foi fruto de desmatamento.

As matas nativas têm papel fundamental na manutenção de ecossistemas locais, globais e regionais. A formação desses biomas, ao longo dos anos, torna cada espécie existente de extrema importância e com papéis fundamentais. Portanto, o desmatamento de florestas nativas contribui para mudanças climáticas radicais, agrava o efeito estufa e se torna uma situação irreversível em prazos humanos (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2022).

Todavia, mesmo ao se considerar o processo de produção do carvão vegetal inteiramente a partir de florestas plantadas e não matas nativas, ainda assim seriam necessários cuidados durante o processo de carbonização desses insumos vegetais. A carbonização, similar à coqueificação, também gera condensados e licores de alcatrão e amônia com impactos locais, ocupacionais e ambientais (OLIVEIRA et al., 2013).

Ainda, o processo produtivo do carvão vegetal de maior difusão é a partir de fornos artesanais de alvenaria, dos quais o funcionamento ainda é primitivo, com baixo controle

qualitativo e operacional. A falta de controle do processo expõe o trabalhador, a comunidade local e o meio ambiente aos subprodutos tóxicos do processo.

Também, conforme metodologias de projetos de créditos de carbono e dados do IBGE⁶ e da ABRAF⁷, a média nacional de eficiência de transformação da madeira anidra (proveniente do eucalipto) em carvão vegetal equivale a 3,85 toneladas de madeira para cada tonelada produzida de carvão vegetal, que é considerado como um baixo rendimento produtivo, que se deve às limitações da matéria-prima e da técnica de produção utilizada (CGEE, 2015).

Nas condições atuais dos fornos de alvenaria de maior produção, uma tonelada de madeira, em base seca, é convertida em, aproximadamente, 30-45% de carvão vegetal e 55-70% em efluentes líquidos e gasosos. Esses efluentes são divididos em ácido pirolenhoso, alcatrão, componentes do condensado líquido e gases do processo, dos quais os principais componentes são: CO₂, CO, N₂, CH₄, H₂ e hidrocarbonetos (C_nH_{2n}) (VIEIRA et al., 2018).

Por fim, considerar o carvão vegetal como principal alternativa ao uso do coque não é uma possibilidade. Altos-fornos a carvão vegetal são relativamente menores, pois o carvão vegetal não alcança a resistência ideal que a coqueificação atribui ao coque, permitindo grande suporte de carga dentro dos altos-fornos maiores. Seria necessário construir novos fornos que fossem adequados para suprir a demanda de aço mundial.

3.2.3. *Reatores de Redução: Altos-fornos e Módulos de Redução Direta*

O uso de altos-fornos nas siderurgias é uma cultura de mais de 500 anos e, todo esse tempo de evolução da tecnologia, transformou esses reatores em fornos otimizados. Entretanto, altos-fornos precisam das coqueiras para compor sua carga, que derivam em impactos econômicos e ambientais, devido aos custos e potencial poluidor.

Não há como substituir completamente o uso do coque nos altos-fornos, eles são parte primordial para suporte da carga. A carga mínima de coque de um alto-forno tradicional é em torno de 260 kg/t ferro-gusa (REMUS et al., 2013).

No caso brasileiro, onde há o cenário de rotas integradas ao carvão vegetal, os altos-fornos têm capacidade menor justamente pela questão do suporte da carga e funcionam sob temperaturas menores. Apesar de os insumos complementares serem os mesmos que os insumos de altos-fornos a coque, como os fundentes, o sinter, as pelotas e o minério granulado,

⁶ Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

⁷ Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas;

o carvão vegetal não tem resistência mecânica suficiente para suportar o peso da carga nas condições dos fornos maiores, como é o caso do coque mineral (CGEE, 2015).

O alto-forno é um reator térmico, com estrutura de forno de cuba, desenvolvido originalmente para obtenção de metais livres, através do processo de redução carbotérmica, no qual utiliza-se um insumo carbonoso para dissociação de um metal de sua molécula original, normalmente um óxido, para que este esteja livre para formação de ligas metálicas (ISENMANN, 2009).

O carregamento dos altos-fornos ocorre pelo topo, via um sistema de eclusa em forma de cones móveis. A carga é composta por minério de ferro granulado e/ou compostos aglomerados (sínter e pelotas) alternados com o coque ou carvão vegetal. É necessário que esses materiais estejam alternados para que os gases gerados das reações possam permear a massa, de forma a reduzir o oxigênio do material ferroso, sob condições ideais e produzir o ferro-gusa.

Em um alto-forno a coque, este último desempenha quatro funções principais. Primeiro, necessita entrar em combustão para fornecer energia para as altas temperaturas necessárias às reações que formam o ferro-gusa e a escória. Também, o coque é a fonte de geração do gás redutor principal, que é o monóxido de carbono (CO), que faz ligação química com o oxigênio, separando-o dos átomos do ferro (ISENMANN, 2009).

Ainda, o coque tem dureza suficiente para manter sua estrutura sob altas temperaturas, sendo assim, estabiliza os vazios dentro do forno e favorece a permeabilidade da massa. Por fim, ao ter carbono incorporado no ferro livre formando o ferro-gusa, abaixa-se o ponto de fusão do metal líquido e sua concentração modifica as propriedades mecânicas finais do aço desejado (ISENMANN, 2009).

Na base do alto-forno encontram-se as ventaneiras, dispositivos responsáveis pela injeção de ar quente e outros combustíveis auxiliares⁸, que vão garantir a combustão do material carbonoso, a produção de CO, a redução direta e o controle de temperatura.

Ao lado do forno existem torres regeneradoras responsáveis por captar ar, aquecê-lo, a partir da troca térmica com a combustão de mistura de gases nas paredes (semelhante ao que acontece nas baterias da coqueria) e, assim, o ar é injetado pré-aquecido no forno, favorecendo também a queima dos combustíveis auxiliares que são injetados simultaneamente (GEERDES; VLIET; TOXOPEUS, 2004).

⁸ Os combustíveis auxiliares geralmente são carvão mineral pulverizado e gás natural, porém, há testes com óleo combustível, alcatrão e outros materiais (GEERDES; VLIET; TOXOPEUS, 2004).

O conteúdo de carbono na composição do ferro-gusa varia entre 2,5 e 4,0%, o que o impede de ser soldado e forjado, pois esfria abruptamente, sendo tenso e quebradiço, necessitando assim reduzir esse carbono para transformá-lo em metal moldável; o aço. Além de carbono e ferro, o ferro-gusa possui silício (0,5 - 3,0%), manganês (0,5 - 6,0%), fósforo (0 - 2%) e enxofre (0,01 - 0,05%). (ISENMANN, 2009).

Como produtos secundários a partir da fabricação de ferro-gusa, há uma grande quantidade de gás gerado no topo do forno (BFG), em quantidades entre 1200 e 2000 Nm³/t gusa produzido. O BFG tem a composição típica de N₂ (50-55%), CO (25-30%), CO₂ (10-16%), H₂ (0,5-5,0%) e de CH₄ (0-3%) (ISENMANN, 2009; REMUS et al., 2013).

Além do BFG, há a geração de escória na faixa de 150 a 346,6 kg/t ferro-gusa, material particulado e pó de despoeiramento. Ainda, se o BFG for tratado através da lavagem do gás, este processo gera lama de alto-forno, pó de coletor (pó de balão), dentre outros (REMUS et al., 2013).

A composição das escórias varia consideravelmente, uma vez que depende, não só da composição do minério de origem, como também dos complementos provenientes dos processos de aglomeração destes e da qualidade do coque.

Entretanto, sua composição média é uma mistura de silicatos (SiO₂), carbonatos (CaO) e aluminatos (Al₂O₃). A escória é considerada eutética, ou seja, seu ponto de fusão deve ser o mais baixo possível de forma a facilitar sua segregação do ferro-gusa (ISENMANN, 2009).

A Tabela 4 a seguir apresenta uma média dos consumos das matérias-primas e da energia nos altos-fornos, por tonelada de ferro-gusa, extraídos do documento diretriz das melhores técnicas disponíveis de produção de ferro e aço da Comissão Europeia.

Tabela 4 - Média dos consumos de altos-fornos a coque
(adaptado de REMUS et al., 2013)

Matérias-primas	Unidade	Média de consumo
Sínter	kg/t ferro-gusa	1088,0
Minério de ferro		180,0
Pelotas		358,0
Coque		259,0
Material de retorno		20,1
cal/calcário		25,7
Energia	Unidade	Média de consumo
Eletricidade	MJ/t ferro-gusa	268,0
Injeção nas ventaneiras	Unidade	Média de consumo
Óleo combustível	kg/t ferro-gusa	30,1
Carvão		162,0
Gás de coqueria		1,1
Gás natural		2,2
Oxigênio		54,4
Outros (Plástico, óleo reformado, gordura)		3,6
Consumo dos regeneradores	Unidade	Média de consumo
Gás de alto-forno	MJ/t ferro-gusa	1536,0
Gás de coqueria		284,0
Gás natural		168,0
Gás de aciaria		213,0

Nos demais cenários de rotas de produção de aço que não contemplam altos-fornos, há o uso difundido de aciarias EAFs que recebem sucata como matéria-prima majoritária e, essa rota mais curta, consome cerca de um oitavo da energia demandada da produção integrada, a partir do minério de ferro (IEA, 2020a). Este tipo de tecnologia está descrito no capítulo sobre refino.

A incerteza da qualidade do aço final, dada às sucatas de origem, fez com que o DRI, ou ferro-esponja, se tornasse, eventualmente, matéria-prima promissora para compor a carga das aciarias EAF. Trata-se de um material passível de controle de qualidade. Similarmente à fabricação do ferro-gusa, o ferro-esponja é produzido em reatores térmicos, denominados módulos de redução direta (DR) (REMUS et al., 2013).

Os reatores de redução direta são tecnologias alternativas à utilização dos altos-fornos. Durante o processo, a redução dos óxidos de ferro se dá em estado sólido, em temperaturas abaixo da fusão do ferro (1535 °C). O produto dos reatores é o DRI ou ferro-esponja, que seria o ferro primário sólido (RODRIGUES, 2014).

Existem duas rotas principais de módulos de redução direta, com produção comercial em larga escala, que utilizam agentes redutores distintos. A primeira é a base de gás natural

(redução por gás) e a segunda a partir de carvão ou óleo combustível como redutor (redução por sólido), correspondentes a 90% e 10% da produção mundial de ferro-esponja, respectivamente. (LU, 2015).

A rota tradicional subsequente à redução direta é via os fornos EAF, dessa forma, faz-se necessário obter um ferro primário com poucos ajustes químicos. A principal diferença entre o ferro-esponja e o ferro-gusa é a baixa concentração de fósforo e enxofre no primeiro em comparação com o segundo. Estes seriam as principais substâncias que precisam de adequação no ferro-gusa, que são corrigidos nas aciarias LD.

Para o controle de impurezas, os materiais ferrosos empregados na fabricação de ferro-esponja são as pelotas e o minério granulado, pois o sinter tem maior variabilidade de composição, além das características de baixa resistividade. Também, o não emprego de coque/carvão mineral contribui para a qualidade do ferro-esponja, são os carvões minerais que carregam a maior parte do enxofre em sua composição.

Na rota de redução direta por gás, a técnica mais comum envolve a reforma química de uma mistura de gás natural com o gás resultante do processo de redução em si, produzindo assim um redutor gasoso rico em H_2 e em CO , no qual ambos são agentes redutores que se conectam com o oxigênio dos insumos ferrosos (LU, 2015).

Os exemplos típicos mais utilizados nos países que possuem disponibilidade a menor custo e abundância de gás natural são as tecnologias MIDREX e HYL (Energiron), que correspondem a 65% e 15%, respectivamente, da produção de ferro-esponja mundial (LU, 2015).

As tecnologias MIDREX e HYL são semelhantes. Ambas usam um reator vertical, tipo forno de cuba, que é abastecido com pelotas e/ou minério granulado pela parte superior, que são aquecidos ao descer por gravidade ao longo do forno. Em contracorrente, há a injeção do gás redutor, gás reformado da mistura de gás natural com gás do processo (MIDREX TECHNOLOGIES, 2022; TENOVA AND DANIELI, 2022).

Nesse processo de redução direta via gás natural, as entradas padrão são: 1,4 toneladas de carga metálica por tonelada de ferro-esponja produzido, 212,77 m^3 de gás natural por tonelada de ferro-esponja produzido e há um gasto de 70 kWh de eletricidade por tonelada de ferro-esponja produzido. A redução da carga metálica é atingida por volta dos 930 °C de temperatura (MIDREX TECHNOLOGIES, 2022; TENOVA AND DANIELI, 2022).

Na rota a carvão/óleo, o gás redutor é gerado na zona de redução do forno, em sua maioria a partir do carvão em um forno rotativo. São adicionados fundentes, carvão não

coqueificável, pelotas e minério granulado no leito. O calor do forno é alcançado de forma semelhante ao alto-forno, com a injeção de ar pré-aquecido, que forma o gás redutor e com a injeção de outros materiais, como finos de carvão e óleo combustível (LU, 2015).

Semelhante ao alto-forno, o pré-aquecimento do ar se dá a partir de regeneradores, onde há a combustão de gases do processo. Os valores típicos para a produção de uma tonelada de ferro-esponja são: 1,46 toneladas de material ferroso, de 380 a 450 kg de carvão, a depender de suas propriedades e consumo elétrico entre 60 e 80 kWh. A redução do material ocorre nas temperaturas entre 920 °C e 1100 °C (GHOSH; VASUDEVAN; KUMAR, 2021).

A desvantagem do ferro-esponja está em sua oxidação pós-produção e na necessidade de resfriamento imediato. Para contorno de tal característica, o ferro-esponja pode ser empregado imediatamente como metal quente no EAF ou transformados em briquetes (HBI) para armazenamento, comercialização e transporte (REMUS et al., 2013).

Em ambas as rotas citadas, o ferro-esponja produzido é então enviado a uma zona de resfriamento a base d'água. A temperatura é reduzida para 100 – 120 °C, evitando assim a oxidação do produto. A qualidade do material é medida a partir da metalização do ferro, avaliando a proporção final de ferro metálico por ferro total presente no ferro-esponja (GHOSH; VASUDEVAN; KUMAR, 2021).

3.3. Etapas dos processos siderúrgicos – Refino

A etapa de refino consiste em, após a aquisição do ferro primário, adequá-lo às especificações de qualidade dos aços requeridos, como remoção de impurezas, podendo ter também adição de ligas metálicas, adição de fundentes, dentre outros. O refino emprega o ferro-gusa e outras cargas metálicas, tais como ferro-esponja e sucatas de aço. Após o refino, uma etapa essencial é a solidificação em moldes do metal quente, também conhecida por lingotamento (CGEE, 2008).

A diferença entre as cargas metálicas está nas quantidades de impurezas das sucatas em comparação com os ferros primários produzidos. Tanto o ferro-gusa quanto o ferro-esponja são ligas metálicas com alguns materiais residuais, como silício, manganês, fósforo, enxofre e carbono. Sucatas possuem teor de carbono abaixo de 2% e uma variedade de materiais residuais, como também a possibilidade de haver contaminantes devido ao uso ou descarte anterior (PFEIL; PFEIL, 2009).

Há dois tipos principais de processos para a fabricação e tratamento dos aços, os fornos a oxigênio (LD/ BOF), que são rotas principais das usinas integradas e os fornos elétricos a arco

(EAF), que são rotas de *mini-mills*, rotas de usinas com reatores diretos (DR) e rota secundária de algumas integradas convencionais BF-BOF.

3.3.1. *Aciarias a Oxigênio*

Embora a concepção de injeção de oxigênio como melhoria da eficiência no refino do aço datar do século XIX, foi no século XX que se pôde colocar em prática o conceito, visto que anteriormente a injeção era de ar atmosférico. Somente após as grandes guerras, por volta da década de 1950, que foram criadas tecnologias para separação e armazenamento de oxigênio em larga escala (MOURÃO et al., 2007).

A partir de então, a rápida difusão do uso do conversor LD em escala mundial se deve a uma maior produtividade em relação às tecnologias anteriores, que não dispunham da injeção direta de oxigênio puro no convertedor, resultando por fim em uma menor produtividade devido à menor eficiência (SILVA, 2011).

O objetivo desse processo de oxidação é, primeiramente, a redução do teor de carbono do metal quente para abaixo de 2%. Ainda, a oxidação faz o ajuste de concentração de elementos indesejáveis que chegam junto ao ferro-gusa, como silício, manganês e fósforo. Anteriormente à oxidação, a depender da concentração de enxofre do ferro-gusa, há a etapa de dessulfuração (REMUS et al., 2013).

A produção de aço nas aciarias BOF é um processo descontínuo que envolve as seguintes etapas: primeiro, há a transferência do ferro-gusa do alto-forno e, durante o descarregamento faz-se a separação da sucata de gusa que resta nos carros-torpedo (veículos que transportam a carga do alto-forno para a aciaria) e que podem ser reaproveitadas como carga metálica fria posteriormente no convertedor.

Em seguida, esse material quente basculado pode receber um pré-tratamento na panela de descarregamento, como a dessulfuração. Posteriormente, o conteúdo é pesado e transferido para os próximos passos que dependem da demanda do cliente, da composição do ferro-gusa e de sua temperatura.

No convertedor há a oxidação das impurezas citadas anteriormente, com injeção de oxigênio por um período determinado. Durante esse momento, podem ser adicionados também fundentes, que protegem o refratário do convertedor, aumentam ou reduzem a temperatura e favorecem a produção de escória. Em um refino secundário, podem ser adicionados carburantes, desoxidantes e ferros-liga, que trazem outras características ao metal quente final, a depender da solicitação do cliente.

Por fim, a partir do convertedor separa-se o aço quente da escória produzida e este primeiro é então enviado aos setores de lingotamento, para a solidificação em molde, ou, previamente ao lingotamento, pode ser enviado para outros tipos de panelas, para tratamento metalúrgico secundário.

Nesse tratamento, o aço pode ser levado a uma panela para que seja misturado/homogeneizado, para que tenha ajuste fino de seus componentes, para regularização da temperatura para lingotamento, para desoxigenação, para remoção de gases solubilizados, como hidrogênio e nitrogênio, que prejudicam o material solidificado, dentre outros (REMUS et al., 2013).

A Tabela 5 a seguir apresenta uma média dos consumos das matérias-primas e da energia em aciarias a oxigênio, por tonelada de aço líquido produzido, extraídos do documento diretriz das melhores técnicas disponíveis de produção de ferro e aço da Comissão Europeia.

Tabela 5 - Média dos consumos de aciarias a oxigênio
(adaptado de REMUS et al., 2013)

Matérias-primas	Unidade	Média de consumo
Ferro-gusa	kg/t aço líquido	859,5
Sucata		220,5
Minério de ferro		9,7
Coque		0,2
Cal		48,5
Dolomita		14,2
Ligas metálicas		17,2
Gases	Unidade	Média de consumo
Oxigênio	m ³ /t aço líquido	59,8
Argônio		0,8
Nitrogênio		10,3
Energia	Unidade	Média de consumo
Gás natural	MJ/t aço líquido	387,0
Eletricidade		125,5
Gás de coqueria		400,0
Gás de alto-forno		9,7

3.3.2. *Fornos Elétricos a Arco*

A produção de aço via forno elétrico a arco iniciou-se na década de 1940, entretanto era rota de fabricação somente de aços longos devido às impurezas das sucatas, maior tempo de corrida e menor porte. A produção de aços planos necessita de maior refino na produção.

Atualmente, após evoluções de tecnologia, o uso de EAF tornou-se competitivo em relação ao uso de conversores LD, produzindo tanto aços planos, quanto longos (MOURÃO et al., 2007).

O forno elétrico a arco é uma câmara fechada na qual eletrodos de grafite, alimentados com energia elétrica, são inseridos na carga, provocando curtos-circuitos capazes de proporcionar energia suficiente para fundição da carga metálica. As características operacionais básicas de um forno são baixas tensões e altas correntes, que circulam pelos arcos voltaicos e transferem a energia elétrica para o conteúdo metálico (CÂNDIDO, 2008).

O carregamento do forno elétrico a arco é dividido em duas a até três etapas, uma vez que a sucata e o material ferroso ocupam maiores volumes antes de sua fusão. Mundialmente, a maior carga desse tipo de forno se dá por sucata, mas há o uso de outras possíveis cargas que possam ter bom desempenho nos EAF, como é o caso do ferro-esponja e do ferro-gusa sólido (sucata de gusa), que podem ajudar na diluição das impurezas das sucatas (SINGH, 2020).

Logo que ocorre a fusão do primeiro carregamento, inicia-se o segundo carregamento, sendo estes dois, na maioria das vezes, o suficiente para a capacidade do forno. Quando se encerra a fusão, nos fornos a arco mais modernos, há a injeção de oxigênio na camada de escória para formar a escória espumante, que protege o refratário do forno e os eletrodos de grafite do desgaste precoce (CÂNDIDO, 2008).

Após fusão da carga, há a etapa de refino que consiste na correção química do aço desejado. Atualmente, na maioria dos casos, o refino é feito em fornos panela deixando o forno elétrico a arco como responsável somente pela fusão, para evitar maiores desgastes de seus componentes (CÂNDIDO, 2008).

A rota semi-integrada que inclui a aciaria elétrica abastecida com sucata, considerando as tecnologias atuais, é a rota considerada como a de menor emissão de GEE. Visto que, a matéria-prima tem baixo carbono e, portanto, baixa emissão de CO₂, sendo o uso de eletricidade o seu maior gasto energético (REMUS et al., 2013).

A Tabela 6 a seguir apresenta uma média dos consumos das matérias-primas e da energia em aciarias com fornos elétricos a arco, por tonelada de aço líquido produzido, extraídos do documento diretriz das melhores técnicas disponíveis de produção de ferro e aço da Comissão Europeia.

Tabela 6 - Média dos consumos de aciarias com fornos elétricos a arco
(adaptado de REMUS et al., 2013)

Matérias-primas	Unidade	Média de consumo
Sucata	kg/t aço líquido	1135,5
Gusa sólido		76,5
Ferro-esponja		107,5
Cal/dolomita		82,5
Carvão (incluindo antracito e coque)		15,5
eletrodos de grafite		4,0
Ligas metálicas		187,0
Gases		Unidade
Oxigênio	m ³ /t aço líquido	35,3
Argônio		0,9
Nitrogênio		6,4
Energia	Unidade	Média de consumo
Eletricidade	MJ/t aço líquido	2073,5
Gás natural		775,0

3.3.3. *Lingotamento*

Lingotamento é um processo de aproximadamente 6 mil anos de história, que envolve indústrias manufatureiras e belas-artes. O metal fundido é derramado a partir de um distribuidor para um molde, com objetivo de criar um lingote em formato pré-determinado. No setor de ferro e aço, há a difusão de dois tipos de lingotamento: O lingotamento convencional e o lingotamento contínuo (ARZT, 2015).

No lingotamento convencional, o metal quente é vazado em lingoteiras para que possa resfriar e posteriormente solidificar. O ponto de dificuldade desse processo é o controle da taxa de resfriamento, para que a contração do metal, após solidificação, não seja brusca o suficiente para gerar trincas e anomalias (SERRAMETAL, 2022).

No lingotamento contínuo, o metal líquido é conduzido por uma calha de molde, a partir de um distribuidor e, ao longo do caminho, que começa vertical e termina horizontal, o metal líquido vai resfriando no formato de placas, blocos ou tarugos.

Quando esse metal entra no caminho horizontal, este é cortado em tamanhos pré-determinados e já está pronto para ser laminado ou vendido. No vazamento, os controles principais são de composição química, temperatura e tempo (INFOMET, 2013).

3.4. Etapas dos processos siderúrgicos – Conformação

A etapa de conformação pode ou não estar interligada às usinas nas quais o aço bruto (aço lingotado) foi produzido. A conformação pode ser agrupada pelo tratamento que será dado ao aço lingotado, podendo ser: laminação, extrusão, forjamento à frio e à quente, dobramento e repuxo, onde o metal é conformado através de deformação plástica, dentre outros (ALTAN; OH; GEGEL, 2012).

Em sua maioria, usinas siderúrgicas integradas possuem unidades de laminação, que fabricam todo tipo de produto a base de aço, podendo ser semi-acabados ou peças direcionadas a diversos setores, como: construção civil, agropecuária, setor automotivo, setor de energia, máquinas e setores de utilidades, indústria naval, dentre outras.

3.5. A descarbonização no setor siderúrgico

Para que seja possível manter condições saudáveis de vida no planeta, países e entidades membros da Convenção-quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (UNFCCC) discutem anualmente nas Conferências das Partes⁹ (COP) os compromissos e metas acordados entre eles com relação às emissões de GEE, às mudanças climáticas e aos riscos climáticos (UNITED NATIONS, 2021).

A COP 21, realizada em Paris, França, no ano de 2015, teve como desdobramento o último acordo firmado entre os membros comprometidos com a descarbonização. O Acordo de Paris¹⁰ sugere que os países e entidades devem projetar e propor planos de descarbonização considerando um ano base, o mais breve possível, como pico de emissões para que, gradativamente, seja alcançada a neutralidade de carbono (balanço zero de emissões antrópicas de CO₂) até 2050, de forma a reduzir os impactos das mudanças climáticas (UNFCCC, 2016).

Sendo assim, as metodologias e métricas adotadas para esse planejamento e contabilização de emissões de GEE precisam estar de acordo com os pareceres do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC¹¹), para sejam planos de mitigação

⁹ Conferência das partes (COP): Conferências anuais de acompanhamento e definições de compromissos e metas acordados entre países membro da Convenção-quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (UNFCCC) – Específica para discussão de GEE e seus impactos.

¹⁰ Acordo de Paris: Acordo entre os países-membros da UNFCCC, partindo do entendimento de que a temperatura global não pode ultrapassar 2,0°C (preferencialmente 1,5°C) em relação às eras pré-industriais, em que são propostos NDCs (*Nationally Determined Contribution*) a cada 5 anos, planos de ação para descarbonização, buscando a neutralidade de carbono até a metade do século XXI.

¹¹ O IPCC, do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*, é o órgão pertencente às Nações Unidas, responsável pela avaliação científica das mudanças climáticas. Seu objetivo é fornecer aos governos em todos os seus níveis informes científicos de apoio para o desenvolvimento de políticas climáticas.

validados e acompanhados a cada COP, tendo em vista as metas propostas alinhadas ao Acordo de Paris (UNFCCC, 2016).

Uma das metodologias largamente utilizadas para contabilização de GEE, independente do setor econômico ou dimensão do país ou entidade, é o *GHG protocol*¹². Esta sugere uma divisão das emissões, segregando por sua origem e por seu setor, e as separa em três grupos denominados “Escopos” (WRI; WBCSD, 2023).

O Escopo 1 refere-se às emissões com as quais a transformação de um insumo em CO_{2eq} ocorre no local onde se está fazendo o levantamento. O Escopo 2, uma parte das emissões *upstream*, refere-se às emissões relacionadas ao uso de energia, térmica ou elétrica, produzida em fonte externa (WRI; WBCSD, 2023).

Por fim, o Escopo 3 refere-se às demais emissões, podendo ser dividido em emissões *upstream* e *downstream*, que são relacionadas com a produção e transporte de matérias primas externas à planta, a destinação e processamento dos produtos, subprodutos, coprodutos e resíduos, deslocamento de funcionários, uso de terrenos arrendados, gastos externos, mudanças no uso do solo, franquias, dentre outros (WRI; WBCSD, 2023).

Os planos de redução de GEE declarados com o uso dessa metodologia, geralmente, abrangem somente os Escopos 1 e 2. Tal questão envolve a complexidade da possibilidade de dupla contabilização do escopo 3, ao levar em consideração que o escopo 3 de uma entidade pode ser o escopo 1 de outra, e nas diversas ramificações de escopo 3, o que perpetua a possibilidade de erro de levantamento, por exemplo, ao contabilizar as emissões de GEE de um país, estão envolvidos vários setores econômicos, a extensão territorial e as transações entre as fronteiras nacionais, os negócios internacionais, os acordos de fronteira internacional, distribuição de produtos e serviços, dentre outros.

A consideração da meta final de redução total de emissões de GEE envolvendo somente os escopos 1 e 2 é denominada “neutralidade de carbono” ou “carbono neutro”, quando se leva em consideração o escopo 3, além dos dois primeiros, é denominada “*net zero*”.

Em um inventário de emissões em que há a consideração dos 3 escopos, este se compara a uma análise de ciclo de vida do “berço ao portão” (considerando o escopo 3 somente *upstream*) ou “do berço ao túmulo” (considerando o escopo 3 *upstream* e *downstream*) do produto ou serviço a ser avaliado.

¹² Ferramenta de gestão de emissões de GEE existente há 20 anos. Oferece padrões, guias, calculadora ferramentas e treinamentos relacionados ao tema com o objetivo de auxiliar no alcance das metas climáticas.

Conforme menção anterior, o setor energético é o maior emissor de GEE dentre os demais e o setor siderúrgico tem uma parcela de contribuição nesse montante. Para um planejamento de descarbonização desse setor, alinhado ao Acordo de Paris, a *International Energy Agency* (IEA) sugere quatro frentes estratégicas para investimento, que também podem ser abertas para direcionamento de todos os demais setores HTA.

O primeiro é a eletrificação, considerando a transição para a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis, que sugere o investimento em transportes elétricos e na eletrificação de sistemas de aquecimento e refrigeração. Essas iniciativas seriam capazes de reduzir 30% das emissões do setor energético (IEA, 2020b).

O segundo é a captura, uso e armazenamento de carbono (CCUS, do inglês *carbon capture, utilization and storage*). O intuito dessa estratégia é evitar as emissões de CO₂ para a atmosfera, através da captura do gás, seu armazenamento geológico ou seu uso em processos industriais, produção de combustíveis, como também na geração de energia. A tecnologia CCUS seria capaz de reduzir até 15% das emissões do setor energético (IEA, 2020b).

A terceira via estratégica de descarbonização é o uso do hidrogênio e de combustíveis sintéticos que o envolvem. A ideia do hidrogênio é a versatilidade de sua produção, podendo ser a partir de gás natural, carvão, petróleo, energias renováveis, energia nuclear e etc., como também sua capacidade de geração de energia e combinação com outras moléculas, como por exemplo o CO₂, para a formação de combustíveis sintéticos, podendo ser utilizado, armazenado, transportado e comercializado independente de sazonalidades. Nas emissões do setor energético, seria responsável pela redução de 8% (IEA, 2020b).

Por fim, a última rota estratégica sugerida pelo IEA diz respeito ao investimento em bioenergia. A bioenergia tem a possibilidade de substituir a ideia da eletrificação onde há dificuldade para tal. O estudo destaca investimento em biocombustíveis, para abastecimento de meios de transporte, uso de biogás, uso de biomassa como matéria prima na indústria e como combustível sólido, sendo essas tecnologias capazes de reduzir 20% do total de emissões do setor energético. Ao ser combinada com CCUS, o uso de bioenergia é capaz de gerar um saldo positivo de emissões de GEE, capturando mais CO₂ do que o emitido, fechando o balanço do setor energético em zero (IEA, 2020b).

Em 2018, a *The Energy Transitions Commission* (ETC) uniu um grupo diverso de produtores, consumidores, fornecedores, investidores, ONGs e pesquisadores, todos pertencentes aos setores HTA, para discutir as formas de atingir o *net-zero* de CO₂ em 2050.

Segundo o relatório, com relação à indústria do aço, o *net-zero* é passível de ser alcançado a partir da combinação de três grupos de ações (ETC, 2018):

i) Gerenciamento da demanda de aço e do uso das matérias-primas através da implantação da economia circular, aumento da vida útil do produto, reaproveitamento de materiais e eficiência de uso;

ii) Medidas de aumento da eficiência energética no processo siderúrgico através da implantação ou melhoria de sistemas de cogeração, tanto para eletricidade quanto para geração de calor, e automatização de processos;

iii) Inserção de tecnologias de descarbonização como o uso do hidrogênio como agente redutor, aumento da reciclagem de sucata, uso da biomassa, e captura de carbono associada às tecnologias atuais e novas, além da eletrólise do ferro.

Na mesma linha da ETC, a IEA em 2020 e a *Institute for Sustainable Development and International Relations* em 2021, avaliaram as tendências do desenvolvimento e das tecnologias alinhadas com a descarbonização do setor siderúrgico.

Ambos os estudos entenderam que, em curto prazo, o primeiro passo crucial das usinas siderúrgicas, para dar início à descarbonização do setor, deve ser o da melhoria da eficiência e otimização dos processos já existentes, buscando a melhor tecnologia disponível para o que já está aplicado, a melhoria do uso das matérias-primas, tendo em vista a sustentabilidade e também o gerenciamento da demanda do produto, produzindo bens com maior vida útil, versáteis e adaptáveis, podendo ser aplicados em múltiplos processos (BATAILLE; STIEBERT; LI, 2021; IEA, 2020a).

Ainda, as duas entidades avaliaram que, devido às últimas tendências das principais empresas envolvidas no mercado das siderúrgicas, a transição energética do uso do carvão como redutor será dada a partir de investimentos em plantas que produzem o ferro-esponja (BATAILLE; STIEBERT; LI, 2021; IEA, 2020a).

Em um primeiro momento, para a transição do setor com as tecnologias disponíveis, o ferro-esponja deve ser produzido a partir da reforma do gás natural e, como consequência natural da melhoria dessa tecnologia, ele será produzido a partir de hidrogênio puro. Também, o uso de CCUS está incluso em todas as possibilidades levantadas para mitigar as emissões de GEE residuais (BATAILLE; STIEBERT; LI, 2021; IEA, 2020a).

Em 2022, a *Mission Possible Partnership* (MPP), que o ETC é membro, e a *Organisation for Economic Co-operation and Development* reavaliaram o futuro da descarbonização da indústria do aço, em estudos distintos. As conclusões dos dois estudos

também seguem o que vem sendo estudado como estratégia para a descarbonização do setor siderúrgico e que já foi abordado pelos trabalhos citados nos parágrafos anteriores (MPP, 2022; SEGUINEAUD, 2022).

Para além do que já foi comentado, o estudo destaca o rápido crescimento no investimento em produção de hidrogênio, com foco no abastecimento de plantas piloto de ferro-esponja, representando 75% das iniciativas tecnológicas até metade do ano de 2022. Ainda, os autores levantaram a possibilidade das siderúrgicas BF-BOF apostarem no encerramento de seus altos-fornos, antes do fim da vida útil, para implantarem reatores de redução direta (MPP, 2022; SEGUINEAUD, 2022).

3.5.1. *Linha do tempo do contexto da descarbonização da siderurgia*

A primeira discussão acerca dos impactos associados ao aumento antrópico dos gases de efeito estufa ocorreu em 1972, durante a Conferência de Estocolmo. Em 1983, uma comissão foi formada para elaborar um estudo que fosse direcionador para mitigar tais impactos, então em 1987 foi publicado o documento “Nosso Futuro Comum”.

Em 1992, com embasamento do documento de 1987, foi desenvolvida a “Agenda 21” que serviu de ponto de partida para um compromisso assumido em 1997 pelos chamados “países desenvolvidos” para a redução das emissões de GEE próprias e para a aliança com os chamados “países subdesenvolvidos” em prol de contribuir para o desenvolvimento sustentável deles, o Protocolo de Quioto, que entrou em vigor somente em 2005.

O Protocolo de Quioto passou por diversas polêmicas devido aos países de maior emissão de GEE questionarem seu propósito. Acabou não sendo cumprido e tendo seu prazo prorrogado. Tais questões culminaram no Acordo de Paris em 2015 que, apesar de assinado por diversos governos, ainda está em fase de negociação de como serão conduzidos e avaliados os inventários de CO₂ e os compromissos firmados.

Isso posto, para entender a evolução das pesquisas e do debate acerca da descarbonização especificamente da indústria siderúrgica é importante considerar a linha do tempo das discussões climáticas: o período anterior a 1991, de 1992 a 2004, de 2005 a 2014 e de 2015 ao primeiro semestre de 2023.

Em 1950 o potencial do H₂ como redutor na indústria siderúrgica foi explorado em gases mistos usados nas usinas recém desenvolvidas de redução direta, essa tecnologia teve sua expansão em 1970 e a matéria-prima principal era o gás natural reformado. As alternativas

tecnológicas da época eram estudadas com foco em variações da técnica de redução direta, avaliando a viabilidade econômica perante os combustíveis fósseis (MORRIS, 2001).

Após duas crises significativas do petróleo, nas décadas de 1970 e 1980, o debate sobre alternativas energéticas aos combustíveis fósseis foi fomentada. Sendo assim, o potencial combustível do hidrogênio voltou a ser tratado e, no setor siderúrgico, a discussão passou a ser também sobre seu potencial redutor. Anteriormente no setor, os estudos sobre o H₂ tratavam basicamente seu impacto sobre a estrutura do aço solidificado (LANG; AUER, 2020).

Na década de 1980, a viabilidade econômica do uso do hidrogênio na siderurgia, como combustível e como redutor nos módulos de redução direta, foi aferida considerando o uso das energias hidroelétrica e nuclear, que estavam em seu auge, para alimentar os eletrolisadores que produziram o hidrogênio a ser utilizado (ANTONIOLI, 1982; ASTIER; KRUG; DE PRESSIGNY, 1982; GRETZ; KORF; LYONS, 1991).

Mesmo considerando a alta dos preços dos combustíveis fósseis, o hidrogênio como combustível foi desconsiderado para um futuro próximo, devido ao alto-custo e tecnologia incipiente. Já o H₂ redutor foi visto como possibilidade para investimento, em um contexto de disponibilidade alta de energia hidroelétrica, investimento em energia solar, preços altos de combustíveis fósseis e um futuro exigindo redução dos GEE (ANTONIOLI, 1982; ASTIER; KRUG; DE PRESSIGNY, 1982; GRETZ; KORF; LYONS, 1991).

Nos anos de 1992 a 2004, com queda e sem muitas oscilações dos preços dos combustíveis fósseis, a descarbonização da indústria siderúrgica foi discutida a respeito da viabilidade de um mercado de taxaço de carbono, no qual todos os países influentes adotassem a mesma estratégia. Fora isso, estudos consideravam o desenvolvimento da captura de CO₂ na rota convencional e armazenamento desse carbono em minas subterrâneas desativadas ou no fundo do oceano (GIELEN, 2003; GIELEN; MORIGUCHI, 2002a, 2002b).

Entre 2005 e 2014, a abordagem do tema envolveu o incentivo ao desenvolvimento das melhores técnicas disponíveis (BAT – do inglês *Best Available Techniques*), considerando as usinas já existentes, através da eficiência energética, otimização de processos, extensão da durabilidade de produtos, cogeração e reforma dos gases de coqueria e de alto-forno, aumentando a concentração de H₂ e CO, para injeção nas ventaneiras (MATSUMIYA, 2011; PARDO; MOYA, 2013; PÉREZ-FORTES et al., 2014).

Nesse período surgiram estudos com modelagem e simulações computacionais da rota tradicional em comparação a outras rotas, como o caso da DR-H₂-EAF, produção de DRI com hidrogênio redutor e produção de aço em aciaria elétrica, associada a energias renováveis. Foi

previsto mais de 80% de redução das emissões de GEE utilizando H₂ redutor e essa rota foi descrita como a mais atrativa economicamente e ambientalmente para o futuro da descarbonização do setor siderúrgico (COSTA; WAGNER; PATISSON, 2013; FISCHEDICK et al., 2014).

Nos anos seguintes, conforme já discutido anteriormente, o caminho para a descarbonização tem se mostrado cada vez mais como um processo de associação de métodos, envolvendo os cenários atuais com a implantação gradual da tecnologia pretendida no futuro. As condições locais são vistas como determinantes para a dimensão da meta de redução e do investimento (ARENS; ÅHMAN; VOGL, 2021; FAN; FRIEDMANN, 2021; REN et al., 2021).

Para os emissores de porcentagens mais significativas de GEE, que é o caso do setor siderúrgico, a sua abrangência multinacional, os recursos disponíveis localmente, a média de emissões de suas unidades e as políticas públicas de onde estão inseridas suas unidades impactam diretamente na complexidade do plano de ação de redução de GEE (ARENS; ÅHMAN; VOGL, 2021; FAN; FRIEDMANN, 2021; REN et al., 2021).

No período de 2015 a 2023, a preocupação acerca da descarbonização do aço e do envolvimento do hidrogênio nesse processo passa a ser mais palpável. Nos últimos anos da década de 2010, as simulações das rotas alternativas de produção de aço, incluindo plantas que envolvem o H₂, deixam as modelagens computacionais e passam a ser plantas-piloto para testes reais em diversos países (ARENS; ÅHMAN; VOGL, 2021; ZHANG et al., 2021).

No entanto, os custos do investimento ainda são cruciais para a viabilidade comercial do hidrogênio. A produção é o principal ponto de discussão. A maioria dos países não produz energia limpa de forma significativa e a ausência dela não contribui para a descarbonização necessária da indústria siderúrgica, mesmo que seja utilizado o hidrogênio como combustível ou redutor (VOGL; ÅHMAN; NILSSON, 2018; YILMAZ; WENDELSTORF; TUREK, 2017).

O investimento no uso do hidrogênio na siderurgia precisa estar aliado ao investimento em energias renováveis. Uma vez que as energias renováveis mais popularizadas são intermitentes, uma estratégia seria investir no armazenamento do H₂ em forma de compostos como o metanol, metano ou amônia ou estocar DRI em forma de briquetes. Dessa forma torna-se possível garantir o abastecimento nas épocas de escassez energética (ANDERSSON; GRÖNKVIST, 2021, 2022; BAILERA et al., 2021; VOGL; ÅHMAN; NILSSON, 2018).

A disponibilidade comercial do uso do hidrogênio, tanto na siderurgia quanto em outros setores, está prevista para acontecer em médio prazo, por volta de 2030. A redução de CO₂ atribuída ao seu uso no setor siderúrgico varia de 20% a 95%, desde o uso de H₂ nas ventaneiras

dos fornos convencionais até o uso como gás redutor nas plantas de redução direta (CHOI; KANG, 2023; ELSHEIKH; EVELOY, 2022; SHAHABUDDIN; BROOKS; RHAMDHANI, 2023; YILMAZ; WENDELSTORF; TUREK, 2017).

No contexto brasileiro, a disponibilidade tecnológica-comercial do H₂ como meio de descarbonização do setor siderúrgico está prevista em um prazo maior, por volta de 2040. As características da indústria siderúrgica brasileira, as possibilidades e expansão do uso do carvão vegetal e da sucata e a matriz elétrica majoritariamente renovável são tendências de investimento prioritárias ao hidrogênio (HEBEDA et al., 2023).

Em síntese, a análise temporal mostrou que a descarbonização do setor siderúrgico necessita de políticas públicas de incentivo para que tecnologias sejam desenvolvidas em uma associação de empresas, governos e academias, que sejam adaptadas a condições locais. É preciso também de um caminho intermediário de transição, da situação atual para a condição futura almejada (BARARZADEH LEDARI et al., 2023; KAZMI; TAQVI; JUCHELKOVÁ, 2023).

Além disso, a precificação do carbono é uma alternativa para forçar grandes emissores a mudanças de comportamento, bem como a relação entre setores precisa caminhar junto no contexto da redução de emissões de GEE, vide a dependência da indústria siderúrgica e do setor energético, que também está na categoria HTA (BARARZADEH LEDARI et al., 2023; KAZMI; TAQVI; JUCHELKOVÁ, 2023).

3.5.2. *O papel do hidrogênio no setor siderúrgico*

Descoberto no século XVIII, o gás hidrogênio foi estudado por suas propriedades químicas e seu potencial combustível. Em 1839 foi desenvolvida a primeira célula a combustível, apesar disso, seu uso comercial manteve-se majoritariamente na indústria química, na primeira metade do século XX (PETRII, 2009).

O gás hidrogênio, comparado aos demais combustíveis conhecidos, possui a maior quantidade de energia disponível por unidade de massa, seu poder calorífico inferior é de aproximadamente 120 MJ/kg H₂. Sua aplicação comercial está predominantemente ligada a refinarias de petróleo e produção de amônia, que respondem por cerca de 79% da demanda total desse gás (HYDROGEN EUROPE, 2021).

Em 2021, a demanda mundial de hidrogênio foi de 94 Mt. Desse total, 40 Mt foram para as refinarias e os outros 54 Mt foram para a indústria. Dentro do setor industrial, a demanda de

hidrogênio se distribuiu em 34 Mt para a produção de amônia, 15 Mt para a fabricação de metanol e 5 Mt para fabricação de DRI (IEA, 2022b).

Porém, a demanda de hidrogênio para fabricação de ferro-esponja ainda é suprida a partir da geração proveniente da reforma de gases de síntese, conforme tecnologia citada no item 3.2.3 do presente trabalho. Ainda não há plantas disponíveis comercialmente capazes de fabricar DRI, em larga escala, a partir de hidrogênio puro (IEA, 2022b).

A Figura 2 abaixo demonstra as principais rotas atualmente viáveis para produção de hidrogênio:

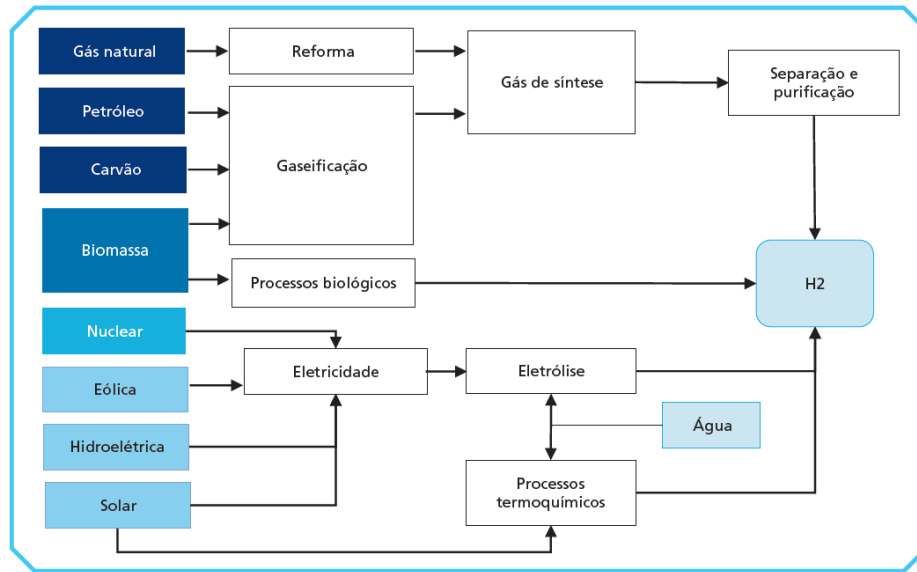


Figura 2 – Esquema simplificado de rotas para produção de hidrogênio (OLIVEIRA, 2022)

Observa-se, atualmente, uma tendência de diferenciar as rotas de produção de hidrogênio por cores (Figura 3), em função da origem da matéria-prima, e/ou emissões de GEE.

Cor	Resumo do processo de produção do hidrogênio
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito ¹) sem CCUS ²
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha ³) sem CCUS
Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
Turquesa	Pirólise do metano ⁴ sem gerar CO ₂
Verde	Eletrólise da água com energia de fontes renováveis (eólica/solar)
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis com ou sem CCUS
Rosa	Fonte de energia nuclear
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes
Branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico

Notas: 1 - Dos tipos menos ricos para os mais ricos em carbono: turfa, linhito, hulha e antracito, este último possui mais de 86% de carbono 2 - CCUS - Carbon Capture, Utilization and Storage. 3 - A hulha possui entre 69 e 86% de carbono 4 - Entende-se pirólise de metano como pirólise de gás natural, visto que este é o principal componente do gás natural.

Figura 3 - Classificação em cores do hidrogênio a partir de sua produção (EPE, 2022b)

Todavia, comercialmente, os métodos mais difundidos são: produção de hidrogênio via reforma a vapor/catalítica (82% do total), que pode ser de gás natural (62%), gás derivado da gaseificação de carvão mineral (19%), a partir de outros gases de síntese e envolvendo a captura de carbono (1%), produção de hidrogênio como coproduto da reforma catalítica de Nafta (18%) e produção a partir da eletrólise (0,04%), porcentagens referentes ao ano de 2021 (IEA, 2022b).

A reforma a vapor é um processo bastante maduro e difundido, apresenta alta eficiência térmica (em torno de 80%) e alto rendimento na produção (cerca de 74%), considerando o consumo de gás natural por unidade de H₂ produzido. Nessa produção, o gás natural tem papel tanto como combustível quanto como matéria-prima, mantendo as temperaturas elevadas conforme necessidade, sendo 30% para combustão e 70% para transformação (EPE, 2022c).

A reforma a vapor de gás natural emite por volta de 0,40 m³ de CO₂ para cada m³ de H₂ produzido, sendo assim essa rota de produção necessita de ser prosseguida por CCUS para se adequar às metas de descarbonização e se manter no mercado futuro (EPE, 2022c).

A fabricação do hidrogênio a partir da eletrólise é feita através de um eletrolisador, que é uma célula eletroquímica com dois eletrodos alimentada por uma fonte de energia elétrica e, quando sua matéria-prima é a água, resulta na produção dos gases hidrogênio e oxigênio. A eficiência dos eletrolisadores atuais gira em torno de 60 a 80% (IEA, 2019).

Quando as fontes renováveis de geração de energia elétrica são as fontes para a produção da eletricidade demandada para produzir hidrogênio a partir da eletrólise, este é o método considerado mais “limpo” possível para essa produção.

Porém, se toda a demanda mundial de hidrogênio, aproximadamente 94 Mt anuais (ref. 2021), fosse suprida a partir da produção via eletrólise da água, cerca de 4,9 x 10³ TWh de eletricidade por ano seriam necessários, o que corresponde a quase o dobro do total gerado anualmente em toda a União Europeia (2,6 x 10³ TWh) (IEA, 2019; IEA, 2022). Ainda, com relação à demanda hídrica, estima-se que seriam necessários cerca de 846 milhões de m³ de água, que é por volta de 1,8% do consumo global de água do setor energético (IEA, 2019, 2022b).

Atualmente, de um total de 68 projetos anunciados, para testes de tecnologias disruptivas para aplicação no setor siderúrgico, que possuem implantação prevista até o ano de 2030, somente 5 projetos-piloto, em fase operacional, envolvem a produção e uso de hidrogênio no setor. Essas iniciativas partiram de quatro países distintos: Suécia, com o projeto HYBRIT, Alemanha com os projetos GrInHy2.0 e WindH₂ (ambos do programa SALCOS), Áustria com

o projeto H₂FUTURE e os Emirados Árabes Unidos com o projeto Al Reyadah CCUS (IEA, 2022c).

A *Abu Dhabi National Oil Company* (ADNOC) fez parceria com a *Emirates Steel Industries* através do projeto *Al Reyadah CCUS*. O projeto é a combinação do processo de redução direta do minério de ferro, a partir da reforma do gás natural, método já existente de fabricação de aço, com a captura, uso e armazenamento do CO₂ emitido (ADNOC, 2016).

A planta de CCUS entrou em operação no ano de 2016. O CO₂ gerado a partir do processo de redução direta da siderúrgica *Emirates Steel* é comprimido, desidratado e transportado para injeção em poços de petróleo da região de Abu Dhabi (ADNOC, 2016).

O projeto *H₂FUTURE* é uma *joint venture* da *Voestalpine Group* (siderúrgica), *SIEMENS Austria* (fabricante do eletrolisador) e *VERBUND* (produtor da eletricidade). O projeto iniciou em 2017, com duração prevista de 4 anos e meio para operação (VERBUND, 2017).

O objetivo é o teste de um eletrolisador de escala industrial (6 MW – 1154 m³ H₂/h), do tipo PEM (do inglês, *Proton Exchange Membrane*), para produção de hidrogênio verde, ou seja, com eletricidade obtida de fontes renováveis (solar e eólica). O hidrogênio produzido será utilizado na redução direta do minério de ferro (VERBUND, 2017).

O projeto *GrInHy2.0* é uma *joint venture* da *SMS group*, *Salzgitter* (siderúrgica alemã), *Sunfire* (eletrolisador), dentre outras empresas. O projeto é um eletrolisador do tipo SOEC (do inglês, *Solid Oxide Electrolysis Cells*) para produção de hidrogênio verde (0,72 MW - 200 m³ H₂/h) a partir de fontes renováveis de energia, eólica e solar. A matéria-prima da eletrólise é o vapor residual do processo siderúrgico. O hidrogênio produzido será utilizado como redutor no processo de fabricação de DRI (SALCOS, 2021a).

O segundo projeto alemão é o *WindH₂*, iniciativa da *SALCOS* (*Salzgitter Low CO₂ Steelmaking*), assim como o projeto anterior, que é uma combinação de empresas com foco na descarbonização siderúrgica. Trata-se de dois eletrolisadores do tipo PEM (2 x 1,25 MW – 450 m³ H₂/h), alimentados com eletricidade proveniente de turbinas eólicas para fabricação de hidrogênio verde como redutor do minério de ferro (SALCOS, 2021b).

Por fim, o projeto Sueco *HYBRIT*, iniciado em 2021, é uma planta piloto de redução direta, com um eletrolisador dedicado para fabricação do hidrogênio, necessário para a redução do minério de ferro dessa planta piloto. O método do eletrolisador (4,5 MW – 978 m³ H₂/h) é a partir da aplicação de eletricidade em água alcalina para que suas moléculas sejam separadas em H₂ e O₂ (SSAB; LKAB; VATTENFALL, 2021).

3.6. Potencial brasileiro para mudança no setor siderúrgico com hidrogênio

A divulgação do hidrogênio como potencial energético no futuro data do século passado. Diversos países, incluindo o Brasil, vem desenvolvendo pesquisa e tecnologia para viabilizar a fabricação, armazenamento, uso e comercialização do gás, tornando-o comercialmente viável e passível de ser produzido e utilizado em escala industrial.

Porém, as iniciativas para fabricação de hidrogênio, visando a descarbonização, são relativamente recentes, visto que a maioria dos projetos e compromissos lançados mundialmente foram propostos após a assinatura do Acordo de Paris.

Em relação às perspectivas brasileiras acerca do tema, o Brasil tem potencial para produção de hidrogênio, com foco para descarbonização, envolvendo as rotas de reforma a vapor do gás natural, eletrólise da água, reforma do etanol e uso da biomassa (AHK, 2021).

Ainda, o Governo brasileiro está estudando os seus potenciais futuros. Em 2021, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) publicou a nota técnica EPE-DEA-NT-003/2021, denominada “Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio”, visando servir de parâmetro para a construção da estratégia brasileira de hidrogênio, que está em formação.

Em 2022, a EPE publicou outro estudo, em nota técnica EPE/DPG/SPG/01/2022, intitulada “Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural”, visando a pesquisa acerca do conhecimento da tecnologia de fabricação do hidrogênio cinza, abordando os principais aspectos técnicos, econômicos, logísticos, de segurança e estudos de caso.

Também em 2022 foi lançado o documento “Panorama do Hidrogênio no Brasil” pelo IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), em formato de texto para discussão, com o objetivo de fomentar o debate e oferecer subsídios à formulação e avaliação de políticas públicas. Portanto, a discussão do hidrogênio para estratégias de baixo carbono no Brasil ainda está em fase embrionária.

Em relação a projetos, foi anunciado em julho de 2022 o lançamento da pedra fundamental da primeira fábrica brasileira de hidrogênio verde, em Camaçari, na Bahia, com construção iniciada em 2020 e finalização prevista para 2023.

Iniciativa da empresa Unigel, uma das maiores indústrias químicas mundiais, a planta será composta por três eletrolisadores com capacidade total de 60 MW. Com capacidade de produção de 10 mil toneladas/ano de hidrogênio verde, a fonte de eletricidade da planta será energia eólica (UNIGEL, 2022).

Por enquanto, a área de produção de hidrogênio verde no Brasil ainda é uma promessa de futuro e a aplicação desse insumo nas siderúrgicas nacionais não está como prioridade nos planos de descarbonização declarados pelas maiores produtoras de aço do país.

Apesar disso, existem vários fóruns nacionais, congressos, programas de aceleração de projetos e investimentos internos e externos visando o desenvolvimento do mercado nacional de hidrogênio verde, que é favorecido principalmente devido à matriz elétrica brasileira ser majoritariamente renovável.

Uma vez que o mercado interno seja desenvolvido e o hidrogênio difundido como um insumo mais acessível às empresas instaladas no Brasil, o setor siderúrgico brasileiro deve seguir a tendência das siderúrgicas internacionais, principalmente da China e da Índia, que são as maiores produtoras mundiais e ambas traçaram planos de incluir o hidrogênio como parte da descarbonização de seu setor do aço.

4. METODOLOGIA

Com base nos objetivos citados anteriormente, a utilização de hidrogênio no processo siderúrgico foi avaliada sobre dois aspectos: i) desempenho ambiental e, ii) potencial de inserção do gás nos cenários atuais e cenários futuros.

No primeiro aspecto, a discussão foi pautada na estimativa das emissões de GEE, *i.e.*, pegada de carbono, calculadas a partir da análise de ciclo de vida do aço. Para tal três cenários foram considerados:

- i) Produção convencional de aço a partir de carvão mineral, com coque redutor, rota BF-BOF;
- ii) Produção convencional de aço a partir de carvão vegetal redutor, rota BF-BOF com altos-fornos a carvão vegetal;
- iii) Produção de aço via rota DR-EAF, considerando o hidrogênio como redutor dos óxidos de ferro em um reator de redução direta.

Os resultados foram comparados com estudo científicos e técnicos encontrados na literatura.

No segundo aspecto, as tendências do setor siderúrgico, mundial e nacional, considerando a descarbonização e o uso de hidrogênio no setor, foram discutidas sob perspectiva de relatórios setoriais e corporativos dos maiores influenciadores do mercado.

4.1. Desempenho Ambiental

O desempenho ambiental da produção de aço para este trabalho está na pegada de carbono calculada a partir de uma Análise de Ciclo de Vida (ACV).

A metodologia de ACV é padronizada, no Brasil, pelas normas brasileiras NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14044:2009, que determinam quatro fases básicas para a construção desse tipo de estudo: i) definição de objetivo e escopo; ii) elaboração do inventário; iii) avaliação de impactos ambientais; e iv) interpretação (ABNT, 2009a, 2009b).

O estudo foi pautado no processo siderúrgico moderno envolvendo três rotas de fabricação do aço: BF-BOF, BF-BOF com carvão vegetal e DR-H₂-EAF.

A rota integrada a coque mineral foi definida como Cenário 1 devido ao fato de ser a rota mais difundida de produção de aço, tanto no contexto das siderurgias brasileiras quanto na perspectiva internacional.

A rota integrada a carvão vegetal foi nomeada como Cenário 2, porque trata de uma realidade bem estabelecida e específica do contexto brasileiro. Além disso, o uso da biomassa

no processo siderúrgico está presente em diretivas nacionais e internacionais como uma das estratégias para descarbonização do setor.

Por fim, o Cenário 3 foi definido como a rota de redução direta seguida de aciarias elétricas. Apesar de ser uma tecnologia já consolidada mundialmente, ela não tem presença comercial no contexto brasileiro e é apontada como o futuro da siderurgia para o desdobramento de novas tecnologias, como é o caso do uso do gás hidrogênio como redutor. Esse cenário foi adaptado para ser analisado em condições brasileiras, pois não há modelos significativos dessa rota no país.

Ainda que as aciarias elétricas, abastecidas majoritariamente com sucata, representem quase 30% da produção de aço tanto no Brasil quanto no mundo, elas não foram consideradas como cenário, uma vez que são rotas semi-integradas e cerca de 90% das emissões de GEE do setor siderúrgico estão na etapa de redução das usinas integradas convencionais (SUER; TRAVERSO; AHRENHOLD, 2021; WSA, 2022a).

Nos cenários analisados, as fronteiras consideradas foram do tipo “do berço ao portão” (*cradle to gate*), abrangendo etapas desde a obtenção das matérias-primas até a fabricação do aço, desconsiderando a destinação final dos produtos após deixarem a produção.

Quando a origem de um insumo e os meios com os quais ele foi produzido são considerados, tem-se as emissões *upstream* de GEE, que podem variar consideravelmente ao ponto de o fato de um mesmo insumo ser adquirido nacionalmente ou internacionalmente fazer parte de uma estratégia de descarbonização.

Posto isso, o levantamento dos inventários para o cálculo da pegada de carbono no presente trabalho considerou as emissões *upstream* da produção do aço em cada cenário modelado e as emissões no consumo das matérias-primas que compõem a rota de fabricação desse produto.

A unidade funcional, para comparação entre os cenários, foi definida como uma tonelada de aço bruto (tab), que significa uma tonelada da produção proveniente do processo de lingotamento. A categoria de impacto considerada foi o potencial de aquecimento global, “pegada de carbono”, em função das emissões de GEE.

Os insumos elencados para a representação das rotas foram definidos conforme o padrão básico do tipo de indústria, buscando-se aproximar da realidade das maiores empresas siderúrgicas do país. Desse modo, em primeiro lugar, a fonte dos dados foram as próprias indústrias e, na falta de informações consideradas indispensáveis, utilizou-se o levantamento nacional de dados. Em última instância buscou-se literatura internacional.

Alguns insumos intrínsecos ao processo da indústria siderúrgica não foram contabilizados, são eles: consumo e produção de água de processo, de vapores e de ar soprado. São insumos sem carbono em sua composição, produzidos e consumidos na própria planta, portanto foi assumido que não há emissão direta de GEE relacionada a eles.

Já para os gases de processo, como esses insumos são *outputs* reaproveitados internamente; produtos de um sistema fechado da planta aproveitados como combustível, foi assumido que o CO_{2eq} emitido relacionado a eles já estaria contabilizado em suas matérias-primas de formação, nos *inputs*.

A sucata, matéria-prima que faz parte do processo da aciaria, foi considerada como resíduo interno do próprio processo, gerado e consumido dentro da planta, logo suas emissões de CO₂ não foram contabilizadas também.

Para a elaboração dos inventários dos cenários foram utilizados relatórios de empresas do setor siderúrgico brasileiro, o balanço energético nacional (BEN) (EPE, 2022a), a base de dados *Ecoinvent* (ECOINVENT, 2019) e as seguintes fontes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC): *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (GNGGI) (IPCC, 2006) e *Fifth Assessment Report* (AR5) (IPCC, 2014).

4.1.1. Definição dos fatores de emissão de GEE

Os fatores de emissão (FE) empregados no cálculo da pegada de carbono foram divididos de duas formas: fatores de emissão relacionados com a produção dos *inputs* (FE *upstream*), extraídos, em sua maioria, da base de dados *Ecoinvent* v. 3.6 (ECOINVENT, 2019) e fatores de emissão associados aos consumos desses *inputs* (FE consumo) que foram calculados.

Nos cenários em que há *input* de combustíveis (antracito, carvão mineral, carvão PCI, coque, carvão vegetal, óleo combustível, óleo diesel, GLP e gás natural), os FEs de consumo correspondem às parcelas de emissões de CO₂, CH₄ e N₂O, de acordo com a metodologia do GNGGI e o fator de aquecimento global (GWP) reportado para aqueles gases no AR5 (IPCC, 2006, 2014).

O poder calorífico e os fatores de combustão (subdivididos em CO₂, CH₄ e N₂O) de todos os insumos foram extraídos do documento GNGGI, vol. 2, cap. 1, tab. 1.2 e cap. 2, tab. 2.3 (contidos nos anexos A e B deste trabalho), com as palavras-chave *Anthracite, Coking Coal, Other Bituminous Coal, Charcoal, Coke Oven Coke and Lignite Coke, Liquefied Petroleum*

Gases, Gas/Diesel Oil e Natural Gas (IPCC, 2006). Por sua vez, a densidade foi obtida do BEN (EPE, 2022a).

Abaixo, na Tabela 7, é possível conferir os valores definidos para os FE *upstream* e FE consumo dos combustíveis utilizados nas siderúrgicas dos cenários modelados:

Tabela 7 – Fatores de emissão e suas respectivas referências para o cálculo de GEE dos combustíveis

Input combustíveis	FE upstream (kgCO_{2eq}/kg)	Inventário considerado (ECOINVENT, 2019):	FE consumo (kgGEE/kg)
Antracito	2,88E-01	hard coal mine operation and hard coal preparation hard coal APOS, U - RoW	CO ₂ : 2,62E+00 CH ₄ : 2,67E-04 N ₂ O: 4,01E-05
Carvão mineral			CO ₂ : 2,67E+00 CH ₄ : 2,82E-04 N ₂ O: 4,23E-05
Carvão PCI			CO ₂ : 2,44E+00 CH ₄ : 2,58E-04 N ₂ O: 3,87E-05
Carvão vegetal (fino e granulado)	5,02E-01	charcoal production charcoal Cutoff, U - GLO	CO ₂ : biogênico CH ₄ : 5,90E-03 N ₂ O: 1,18E-04
Coque e finos de coque	2,30E-02 (em kgCO _{2eq} /MJ)	coking coke Cutoff, U - RoW	CO ₂ : 3,02E+00 CH ₄ : 2,82E-04 N ₂ O: 4,23E-05
GLP	5,82E-01	liquefied petroleum gas production, petroleum refinery operation liquefied petroleum gas Cutoff, U - RoW	CO ₂ : 2,98E+00 CH ₄ : 4,73E-05 N ₂ O: 4,73E-06
Óleo diesel e óleo combustível (Cenário 2)	4,96E-01	diesel production, low-sulphur, petroleum refinery operation diesel, low-sulfur Cutoff, U - BR	CO ₂ : 3,19E+00 CH ₄ : 1,29E-04 N ₂ O: 2,58E-05
Óleo diesel (Cenário 1)			CO ₂ : 2,68E+00 CH ₄ : 1,08E-04 N ₂ O: 2,20E-05 (em kgGEE/m ³)
Gás natural	2,77E-01 (em kgCO _{2eq} /m ³)	market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, U - RoW	CO ₂ : 1,99E+00 CH ₄ : 3,60E-05 N ₂ O: 3,60E-06 (em kgGEE/m ³)

É importante destacar que, as emissões de CO₂ provenientes do consumo de carvão vegetal e seus finos, isto é, a utilização direta deles na rota siderúrgica, devido ao carbono emitido não ser proveniente de processos antrópicos e sim de processos fotossintéticos, foram caracterizadas como nulas e consideradas como biogênicas.

Por sua vez, as emissões de GEE dos óxidos de ferro (minério granulado, sinter, pelota e minério de ferro) e dos fundentes (cal calcítica e cal dolomítica) foram caracterizadas apenas com o FE *upstream* por não terem carbono em sua composição para contabilização das emissões no consumo desses materiais, portanto não possuem FEs de consumo associados.

O minério de ferro (finos de minério) e o minério granulado possuem o mesmo FE *upstream*, que é referente à extração mineral. Já o sinter e as pelotas têm o FE *upstream* referente à produção externa deles, em plantas de pelletização e sinterização. De mesmo modo, a cal, seja calcítica ou dolomítica, foi considerada como produzida em uma planta externa de calcinação. O mesmo ocorre com os gases criogênicos (nitrogênio, oxigênio e argônio).

A Tabela 8 apresenta os valores dos FE *upstream* e respectivas referências para os óxidos de ferro, fundentes e gases criogênicos.

Tabela 8 – FE *upstream* e as respectivas referências para os óxidos de ferro, fundentes e gases criogênicos

Input óxidos de ferro, fundentes e gases criogênicos	FE <i>upstream</i> (kgCO₂/kg)	Inventário considerado (ECOINVENT, 2019):
Minério granulado	2,24E-02	iron ore, beneficiated, 65% Fe iron ore, beneficiated, 65% Fe Cutoff, U - GLO
Minério de ferro		
Pelotas	3,00E-02	Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol. 3, cap. 4, tab. 4.1 (IPCC, 2006).
Sínter	3,90E-01	sinter production, iron sinter, iron Cutoff, U - RoW
Cal calcítica	1,16E+00	quicklime production, in pieces, loose quicklime, in pieces, loose Cutoff, U
Cal dolomítica		
Nitrogênio, oxigênio, argônio	1,38E+00	air separation, cryogenic nitrogen, oxygen, liquid, argon, crude, liquid Cutoff, U - RoW

Já os fundentes calcário e dolomita (crus), que são os minerais *in natura*, eles possuem carbono em sua composição. Dessa forma, além do FE *upstream* relacionado à extração mineral, para os cálculos das emissões de CO₂ desses insumos, foram estimados FEs de consumo distintos (por se tratar de minerais com composições diferentes), conforme demonstrado na Tabela 9 a seguir:

Tabela 9 - FEs e referências relacionados aos fundentes crus, calcário e dolomita

<i>Input fundentes</i>	<i>FE upstream (kgCO₂/kg)</i>	Inventário considerado (ECOINVENT, 2019):	FE consumo¹³ (kgCO₂/kg)
Calcário cru	4,04E-02	lime production, milled, loose lime Cutoff, U - RoW	4,40E-01
Dolomita crua	3,86E-02	dolomite production dolomite Cutoff, U - RoW	4,80E-01

Em questão das emissões relacionadas ao uso de eletricidade, para os Cenários 2 e 3, em que a energia elétrica utilizada no funcionamento da planta não foi gerada internamente, fez-se necessário estimar as emissões de CO₂ provenientes da geração externa dessa energia e dos combustíveis dessa fonte.

Para construção do FE *upstream* associado à eletricidade foi considerada a matriz elétrica brasileira dos últimos cinco anos (2018-2022) e a base de dados *Ecoinvent* v. 3.6 (ECOINVENT, 2019). Assim, o fator de emissão assumido foi de 0,129 tCO_{2eq}/MWh, o que difere dos valores médios reportados mensalmente pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2022), no mesmo intervalo de tempo (0,076 tCO_{2eq}/MWh), devido à não consideração do ciclo de vida da eletricidade.

Por último, para a definição do fator de emissão de produção do hidrogênio foram consideradas duas situações: a produção a partir da reforma a vapor do gás natural (hidrogênio cinza) e a produção a partir da eletrólise da água, considerando energia eólica como a fonte de energia para o alcance da reação (hidrogênio verde). Os valores encontrados de FE estão descritos na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10 – FE *upstream* considerados para duas formas de produção de hidrogênio

<i>Input hidrogênio</i>	<i>FE upstream (kgCO_{2eq}/kg)</i>	Obs. FE upstream:
Hidrogênio cinza	7,63E+00	Estimado a partir da ACV do carbono na produção de H ₂ a partir da reforma do Gás Natural, com eletricidade proveniente do Sistema Interligado Nacional Brasileiro. Adaptado de (CAPAZ, 2021)
Hidrogênio verde	6,62E-01	Estimado a partir da ACV do carbono na produção de H ₂ a partir da eletrólise da água, sistema alimentado por energia eólica de produção no nordeste do Brasil. Adaptado de (CAPAZ, 2021)

¹³ FE consumo extraídos do GNGGI, vol. 3, cap. 2, tab. 2.1 com as palavras-chave: *Calcite* e *Dolomite* (IPCC, 2006).

4.1.2. *Cenário 1*

A descrição da rota siderúrgica convencional, em condições brasileiras, baseou-se na maior produtora de aço do Brasil, a ArcelorMittal – Tubarão, como a usina representativa do mercado nacional. Ela foi responsável por 19,7% do aço produzido no país em 2021, fabricando 7,09 Mt de aço (IAB, 2022).

Os dados utilizados foram extraídos do Balanço Energético Global (BEG¹⁴) da empresa referente ao ano de 2016 (ARCELORMITTAL, 2017) por se tratar de um ano em que os dados estavam mais próximos de uma realidade típica, foram declarados de forma íntegra, sem interferência de grandes manutenções programadas.

A partir dos dados fornecidos no BEG, em unidades de MJ/tab, e dos respectivos fatores de conversão para os dados de consumo, em unidades de massa/tab ou volume/tab, também fornecidos pela empresa no mesmo documento, o balanço de massa foi elaborado e está descrito na Tabela 11. O balanço global de energia e os fatores de conversão estão descritos nos anexos C e D deste trabalho.

A ArcelorMittal – Tubarão é a única usina siderúrgica, de rota convencional, instalada no Brasil que é autossuficiente em eletricidade, portanto, o consumo de energia elétrica da planta não foi considerado no inventário para o Cenário 1. Além disso, devido à importância para o processo, os óxidos de ferro e os fundentes que não foram declarados no BEG da empresa foram estimados a partir dos dados do Projeto BRA/16/G31 “Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa” (SANTOS, 2020)

Ainda, no BEG da empresa foi considerada a produção e venda de outros produtos além do aço bruto (alcatrão, coque metalúrgico, gases criogênicos e energia elétrica), tal questão implicou na necessidade de realização de procedimento de alocação desses, que foi definido como a proporção de tais produtos com relação ao seu valor econômico atual. Os fatores de alocação e os valores de mercado considerados estão explicitados na Tabela 12.

¹⁴ O BEG pode ser reportado anualmente e de forma voluntária pelas siderúrgicas do Brasil para a Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM).

Tabela 11 - Balanço de massa elaborado para o Cenário 1 - Usina siderúrgica convencional BF-BOF

<i>Input</i> minério de ferro	Consumo	Unidade
Minério granulado	234,02	kg/tab
Pelotas	358,06	
Minério de ferro	722,25	
<i>Input</i> de carbono	Consumo	
Antracito	7,41	
Carvão metalúrgico	567,72	
Carvão PCI	198,67	
<i>Input</i> fundentes	Consumo	
Cal calcítica	49,99	
Cal dolomítica	9,74	
Calcário cru	119,20	
Dolomita crua	60,31	
<i>Input</i> energia	Consumo	
Gás Natural	4,920	m ³ /tab
Óleo diesel	0,002	
<i>Input</i> outros gases	Consumo	
Nitrogênio, oxigênio, argônio	225,89	

Tabela 12 - Produtos generalizados para uma usina siderúrgica brasileira a coque mineral e os valores considerados para o cálculo do fator de alocação

Output produtos	Produção (kg/tab)	Fator de alocação	Valor de mercado¹⁵ (R\$/unid.)	Obs.:
Aço bruto	1.000,00	81,23%	2.550,04	Média do preço do aço do histórico de março/2009 a maio/2023 (TRADING ECONOMICS, 2023)
Alcatrão	5,84	0,90%	4.853,65	Preço mais caro do alcatrão em 02/12/22 (ECHEMI, 2022)
Coque metalúrgico	91,28	7,69%	2.645,82	Cotação relacionada a abril de 2022 (MONEYTIMES, 2022)
Output gases criogênicos	Produção (Nm³/tab)	Fator de alocação	Valor de mercado (R\$/unid.)	Obs.:
Nitrogênio, oxigênio, argônio	15,84	6,05%	12,00	R\$ 12,00 foi considerado como o preço médio do metro cúbico desses gases (INCS, 2022)
Output eletricidade	Produção (kWh/tab)	Fator de alocação	Valor de mercado (R\$/unid.)	Obs.:
Energia elétrica	226,34	4,12%	0,57	Considerando a tarifa mais cara da tabela de tarifa média anual (2018) de distribuidoras para a classe industrial (ABRADEE, 2022)

4.1.3. Cenário 2

No cenário de rota a carvão vegetal, devido às mesmas questões citadas para o Cenário 1 acerca das particularidades de cada empresa que seguem a mesma rota, optou-se pela APERAM - Timóteo como siderúrgica representativa da fabricação de aço a partir do carvão vegetal, no Brasil. Responsável por 2,09% do aço nacional produzido em 2021, a APERAM fabricou 754 x 10³ toneladas de aço nesse mesmo ano (IAB, 2022).

A única particularidade dessa empresa, que a difere das demais de mesma rota, é a utilização de hidrogênio cinza em um dos fornos de reaquecimento da laminação, devido à produção de aço inox. Os dados foram extraídos do BEG da empresa, referente ao ano de 2015 (APERAM, 2016) assim como no Cenário 1, tal ano foi definido por se tratar de uma realidade típica da siderúrgica. Não foi necessário procedimento de alocação para este cenário.

¹⁵ Conversão Yuan para Real (conversão do aço bruto feita em 11 de mai. de 2023 e do alcatrão e coque metalúrgico em 03 de dez. 2022).

Os óxidos de ferro e os fundentes não estavam contabilizados no balanço de energia declarado pela empresa. Como são insumos importantes para o processo de produção do aço bruto, seus valores foram estimados a partir da tese de ÂNGELO (2013).

A partir dos dados fornecidos no BEG, em unidades de MJ/tab, e dos respectivos fatores de conversão para dados de consumo, também fornecidos pela empresa, em unidades de massa/tab ou volume/tab, o balanço de massa então foi determinado e pode ser verificado na Tabela 13 abaixo. O balanço global de energia e os fatores de conversão estão descritos nos anexos E e F deste trabalho.

Tabela 13 - Balanço de massa elaborado para o Cenário 2 - Usina siderúrgica BF-BOF a carvão vegetal

<i>Input</i> minério de ferro	Consumo	Unidade
Sínter	14,64	kg/tab
Minério de Ferro	500,57	
Pelota	476,92	
<i>Input</i> de carbono	Consumo	
Coque	14,67	
CV Granulado	298,63	
CV Finos	96,52	
<i>Input</i> fundentes	Consumo	
Calcário	64,77	
Dolomita	26,64	
<i>Input</i> energia	Consumo	
GLP	2,64	
Óleo Diesel	2,40	
Óleo Combustível	6,07	
Energia Elétrica	1.009,75	kWh/tab
Gás Natural	96,48	m ³ /tab
<i>Input</i> outros gases	Consumo	
Nitrogênio, oxigênio, argônio	283,35	
Hidrogênio	6,61	

4.1.4. Cenário 3

O Cenário 3 foi idealizado sobre dois princípios: a tendência da inclusão do hidrogênio nas rotas siderúrgicas que envolvem a DR – EAF e a importância da fonte de produção do hidrogênio para minimização das emissões de GEE.

Apesar da tecnologia da eletrólise para produção de hidrogênio já ser conhecida, ela ainda não está desenvolvida para escala industrial envolvendo a descarbonização da siderurgia. Dessa forma, os estudos disponíveis até o momento em literatura avaliaram o desempenho de uma unidade de eletrólise de forma isolada ou a aplicação de hidrogênio em áreas específicas que envolvem o contexto siderúrgico, de forma isolada.

Portanto, em vista da escassez de estudos envolvendo a rota completa DR – EAF com redução direta da carga metálica a partir do hidrogênio produzido por eletrólise com fontes renováveis, foi considerada a pesquisa de LI et al. (2022) com algumas adaptações para o Cenário 3 proposto por este trabalho.

Para determinação da rota proposta para este cenário, foi considerado o forno elétrico a arco, o forno de aquecimento para o gás redutor hidrogênio e o reator de redução direta com carga exclusiva de pelotas (produção considerada externa à planta) do estudo de LI et al. (2022). Nesse caso, a energia para o forno de rea aquecimento foi suprida por hidrogênio retornado da redução direta, não necessitando assim de combustível extra.

Dentro do Cenário 3, para a emissão *upstream* dessa rota, foram considerados dois caminhos de produção de hidrogênio: o hidrogênio cinza e o hidrogênio verde, chamados de Cenário 3A e Cenário 3B, respectivamente. Visto que, para alcançar a tecnologia de hidrogênio verde, a tendência é a implantação da redução direta com hidrogênio cinza para posterior aprimoramento dessa tecnologia, conforme verificado em literatura.

As duas vias de produção de hidrogênio foram consideradas como produção externa à planta. O hidrogênio cinza foi considerado como reforma do gás natural em condições brasileiras e o hidrogênio verde foi considerado com eletrólise utilizando energia elétrica de usinas eólicas.

Na aciaria elétrica, devido ao DRI ter sido produzido a partir de hidrogênio redutor, sem fontes de carbono, faz-se necessária a consideração de entrada de finos de coque como carburante na rota para ajuste da concentração de carbono do aço produzido.

Os *outputs* desse processo corresponderam somente ao aço bruto, sem necessidade de alocação. O balanço de massa final elaborado para o Cenário 3 pode ser visualizado na Tabela 14 a seguir:

Tabela 14 - Balanço de massa elaborado para o Cenário 3 - Usina siderúrgica DR – H₂ – EAF

Input minério de ferro	Consumo	Unidade
Pelotas	1.415,51	kg/tab
Input de carbono	Consumo	
Finos de coque	17,83	
Input fundentes	Consumo	
Calcário	38,98	
Input energia	Consumo	Unidade
Energia Elétrica	479,34	kWh/tab
Input outros gases	Consumo	Unidade
Hidrogênio	1117,69	m ³ /tab
Oxigênio	22,06	

4.2. Potencial do uso do hidrogênio na descarbonização do setor siderúrgico

Para prestação de conta aos seus *stakeholders*, as indústrias siderúrgicas, tanto nacionais quanto internacionais, publicam relatórios referentes ao seu negócio. São dados relacionados ao uso de recursos, gestão de resíduos, controle operacional, segurança, responsabilidade social, responsabilidade ambiental, dentre outros.

No quesito “mudanças climáticas”, como parte do setor industrial que mais emite CO₂, a maioria das siderúrgicas firmaram metas de redução de suas emissões, com acompanhamento de seu indicador de intensidade e desdobramento do plano de ação para alcance de seus objetivos.

Com vista para a realidade brasileira, foram analisados os relatórios integrados e de sustentabilidade para aferir sob qual nível o hidrogênio é considerado nos planos de descarbonização das empresas ArcelorMittal, CSN, Gerdau, Ternium e Usiminas. Essas empresas representaram, em 2021, quase 85% da produção de aço nacional.

De mesmo modo, para entendimento do panorama global de planos de descarbonização e inclusão do hidrogênio na estratégia dos maiores produtores mundiais, países ou grupos multinacionais, correlacionou-se os *rankings* dos maiores grupos siderúrgicos do mundo e dos 10 países de maior produção (WSA, 2022a).

Foram selecionados 9 grupos internacionais, 8 relacionados aos países em que se mais produz aço no mundo (*Baowu, Tata, Nippon, Nucor, NLMK, Posco e Erdemir*) e 1 grupo

relacionado à cobertura internacional e impacto de sua produção (*ArcelorMittal*), conforme Tabela 15.

Tabela 15 – Empresas selecionadas para análise do panorama global de descarbonização no setor siderúrgico

Empresa	Origem	Origem da produção de aço bruto (%)	Posição da empresa por produção de aço bruto (WSA, 2022)	Posição do país de origem por produção de aço bruto (WSA, 2022)
Baowu Steel Group (CHINA BAOWU STEEL GROUP, 2020)	China	100% China	1 ^a	1 ^o
Tata Steel Group (TATA STEEL GROUP, 2022)	Índia	60% Índia 15% País de Gales 20% Holanda 5% Tailândia	10 ^a	2 ^o
Nippon Steel Corp. (NIPPON STEEL CORPORATION, 2022b)	Japão	56% Japão 1% Suécia, Finlândia, Inglaterra 1% Arábia Saudita, Emirados Árabes 13% Índia 9% Indonésia, Malásia, Vietnã, Camboja, Tailândia 4% China 8% Brasil 7% México, EUA	4 ^a	3 ^o
Nucor Corp. (NUCOR CORPORATION, 2022)	EUA	100% EUA	15 ^a	4 ^o
NLMK (NLMK GROUP, 2021)	Rússia	95% Rússia 4% EUA 1% Dinamarca, Bélgica, França e Itália	21 ^a	5 ^o
POSCO (POSCO GROUP, 2021)	Coreia do Sul	Coreia do Sul, Turquia, Brasil, China, Indonésia, Vietnã, Tailândia, Myanmar	6 ^a	6 ^o
Erdemir (OYAK GROUP, 2022)	Turquia	100% Turquia	48 ^a	7 ^o
Thyssenkrupp (THYSSENKRUPP, 2022)	Alemanha	100% Alemanha	39 ^a	8 ^o

<p style="text-align: center;">ArcelorMittal (ARCELORMITTAL, 2022)</p>	<p style="text-align: center;">Luxemburgo</p>	<p style="text-align: center;">7% Canadá 5% México 16% Brasil 2% Argentina 11% Alemanha 7% Bélgica 14% França 9% Espanha 7% Polônia 3% Luxemburgo 2% Romênia, Marrocos e Bósnia e Herzegovina 5% Cazaquistão 7% Ucrânia 5% África do Sul</p>	<p style="text-align: center;">2ª</p>	<p style="text-align: center;">43º</p>
--	---	--	---------------------------------------	--

Não foram selecionados 10 relatórios, correspondentes ao *ranking* dos 10 países de maior produção de aço mundial, devido ao fato de que o 9º maior produtor é o Brasil e sua análise já está tratada de forma mais detalhada nos capítulos posteriores. Ainda, o 10º país é o Irã, do qual não foram encontrados dados de planos de descarbonização, tanto da maior produtora de aço iraniana, quanto do próprio governo.

Além disso, dentre o *ranking* dos 10 grupos maiores produtores de aço do mundo, 6 são chineses e estão localizados somente na China. Assim sendo, a visualização por abrangência multinacional de cada representante de cada país ajuda no enriquecimento de informações que tenha uma abrangência global.

Estudou-se o impacto da parcela de produção das empresas selecionadas nos países de onde vieram e aos quais estão inseridas, as matérias-primas disponíveis para a produção de aço em cada região, os compromissos assumidos pelo governo desses países, a relevância internacional dessas empresas, dentre outras questões.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De maneira geral, os resultados foram divididos em duas partes: na primeira os resultados da pegada de carbono calculada para os cenários modelados em condições brasileiras foram apresentados. Na segunda, foram levantadas as tendências reportadas na literatura científica e setorial sobre a descarbonização da siderurgia utilizando hidrogênio.

5.1. Desempenho Ambiental

5.1.1. Pegada de carbono referente aos cenários em condições brasileiras

As tabelas abaixo (Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18) demonstram os resultados do cálculo da pegada de carbono para cada cenário, separados por insumo e grupos de insumos, apontando as emissões *upstream* e emissões no consumo. Vale destacar que os resultados correspondentes ao Cenário 1 estão com seus valores considerando a alocação em aço bruto, unidade funcional de comparação entre os cenários.

Tabela 16 – Resultado das emissões calculadas para a siderúrgica BF-BOF (Cenário 1)

Input minério de ferro	Emissões <i>upstream</i>	Emissões consumo	Emissões totais	Unidade
Minério granulado	4,26	-	4,26	kgCO ₂ /tab
Pelotas	8,73	-	8,73	
Minério de ferro	13,15	-	13,15	
Subtotal	26,13	-	26,13	
Input carbono	Emissões <i>upstream</i>	Emissões consumo	Emissões totais	Unidade
Antracito (CO ₂)	1,73	15,80	17,53	kgCO _{2eq} /tab
Antracito (CH ₄)	-	0,05	0,05	
Antracito (N ₂ O)	-	0,06	0,06	
Carvão metalúrgico (CO ₂)	132,69	1.230,21	1.362,90	
Carvão metalúrgico (CH ₄)	-	3,64	3,64	
Carvão metalúrgico (N ₂ O)	-	5,17	5,17	
Carvão PCI (CO ₂)	46,43	393,87	440,30	
Carvão PCI (CH ₄)	-	1,17	1,17	
Carvão PCI (N ₂ O)	-	1,65	1,65	
Subtotal	180,86	1.651,62	1.832,48	
Input fundentes	Emissões <i>upstream</i>	Emissões consumo	Emissões totais	Unidade
Cal calcítica	46,90	-	46,90	kgCO ₂ /tab
Cal dolomítica	9,14	-	9,14	
Calcário cru	3,91	42,57	46,49	
Dolomita crua	1,89	23,38	25,27	
Subtotal	61,83	65,96	127,79	

<i>Input energia</i>	<i>Emissões upstream</i>	<i>Emissões consumo</i>	<i>Emissões totais</i>	<i>Unidade</i>
Gás natural (CO ₂)	1,11	7,96	9,07	kgCO _{2eq} /tab
Gás natural (CH ₄)	-	0,00	0,00	
Gás natural (N ₂ O)	-	0,00	0,00	
Óleo diesel (CO ₂)	0,62	0,00	0,62	
Óleo diesel (CH ₄)	-	0,00	0,00	
Óleo diesel (N ₂ O)	-	0,00	0,00	
Subtotal	1,73	7,96	9,69	
<i>Input outros gases</i>	<i>Emissões upstream</i>	<i>Emissões consumo</i>	<i>Emissões totais</i>	<i>Unidade</i>
Nitrogênio, oxigênio, argônio	377,81	-	377,81	kgCO ₂ /tab
Subtotal	377,81	-	377,81	
TOTAIS	648,36	1.725,55	2.373,91	kgCO_{2eq}/tab
	0,65	1,72	2,37	tCO_{2eq}/tab

Tabela 17 - Resultado das emissões calculadas para a BF-BOF a carvão vegetal (Cenário 2)

<i>Input minério de ferro</i>	<i>Emissões upstream</i>	<i>Emissões consumo</i>	<i>Emissões totais</i>	<i>Unidade</i>
Sínter	5,71	-	5,71	kgCO ₂ /tab
Minério de Ferro	11,22	-	11,22	
Pelota	14,31	-	14,31	
Subtotal	31,24	-	31,24	
<i>Input carbono</i>	<i>Emissões upstream</i>	<i>Emissões consumo</i>	<i>Emissões totais</i>	<i>Unidade</i>
Coque (CO ₂)	9,49	44,28	53,77	kgCO _{2eq} /tab
Coque (CH ₄)	-	0,12	0,12	
Coque (N ₂ O)	-	0,16	0,16	
CV granulado (CO ₂)	150,01	-	150,01	
CV granulado (CH ₄)	-	49,33	49,33	
CV granulado (N ₂ O)	-	9,34	9,34	
CV finos (CO ₂)	48,48	-	48,48	
CV finos (CH ₄)	-	15,95	15,95	
CV finos (N ₂ O)	-	3,02	3,02	
Subtotal	207,99	122,19	330,18	
<i>Input fundentes</i>	<i>Emissões upstream</i>	<i>Emissões consumo</i>	<i>Emissões totais</i>	<i>Unidade</i>
Calcário	2,62	28,48	31,10	kgCO ₂ /tab
Dolomita	1,03	12,71	13,74	
Subtotal	3,65	41,20	44,44	
<i>Input energia</i>	<i>Emissões upstream</i>	<i>Emissões consumo</i>	<i>Emissões totais</i>	<i>Unidade</i>
Gás natural (CO ₂)	26,74	192,25	218,99	kgCO _{2eq} /tab
Gás natural (CH ₄)	-	0,10	0,10	
Gás natural (N ₂ O)	-	0,09	0,09	
GLP (CO ₂)	1,54	7,88	9,41	
GLP (CH ₄)	-	0,00	0,00	
GLP (N ₂ O)	-	0,00	0,00	
Óleo diesel (CO ₂)	1,19	7,64	8,82	

Óleo diesel (CH ₄)	-	0,01	0,01	
Óleo diesel (N ₂ O)	-	0,02	0,02	
Óleo combustível (CO ₂)	3,01	19,35	22,36	
Óleo combustível (CH ₄)	-	0,02	0,02	
Óleo combustível (N ₂ O)	-	0,04	0,04	
Energia Elétrica	130,26	-	130,26	
Subtotal	162,73	227,40	390,13	
Input outros gases	Emissões upstream	Emissões consumo	Emissões totais	Unidade
Nitrogênio, oxigênio, argônio	583,43	-	583,43	kgCO _{2eq} /tab
Hidrogênio	4,54	-	4,54	
Subtotal	587,97	-	587,97	
TOTAIS	993,57	390,79	1.384,35	kgCO_{2eq}/tab
	0,99	0,39	1,38	tCO_{2eq}/tab

Tabela 18 - Resultado das emissões calculadas para a siderúrgica DR-H₂-EAF, com produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do gás natural e da eletrólise com fontes renováveis (Cenário 3A e Cenário 3B)

Input minério de ferro	Emissões upstream	Emissões consumo	Emissões totais	Unidade
Pelotas	42,47	-	42,47	kgCO ₂ /tab
Subtotal	42,47	-	42,47	
Input carbono	Emissões upstream	Emissões consumo	Emissões totais	Unidade
Finos de coque (CO ₂)	11,53	53,80	65,33	kgCO _{2eq} /tab
Finos de coque (CH ₄)	-	0,14	0,14	
Finos de coque (N ₂ O)	-	0,20	0,20	
Subtotal	11,53	54,14	65,68	
Input fundentes	Emissões upstream	Emissões consumo	Emissões totais	Unidade
Calcário	1,58	17,14	18,72	kgCO ₂ /tab
Subtotal	1,58	17,14	18,72	
Input energia	Emissões upstream	Emissões consumo	Emissões totais	Unidade
Energia Elétrica	61,83	-	61,83	kgCO _{2eq} /tab
Subtotal	61,83	-	61,83	
Input outros gases	Emissões upstream	Emissões consumo	Emissões totais	Unidade
Hidrogênio (Cenário 3A)	767,16	-	767,16	kgCO _{2eq} /tab
Hidrogênio (Cenário 3B)	0,43	-	0,43	
Oxigênio	45,42	-	45,42	
Subtotal (Cenário 3A)	812,58	-	812,58	
Subtotal (Cenário 3B)	45,85	-	45,85	
TOTAIS (Cenário 3A)	929,99	71,28	1.001,27	kgCO_{2eq}/tab
	0,93	0,07	1,00	tCO_{2eq}/tab
TOTAIS (Cenário 3B)	229,36	71,28	300,64	kgCO_{2eq}/tab
	0,23	0,07	0,30	tCO_{2eq}/tab

A separação dos insumos em 5 grupos permitiu a comparação dos focos de maior emissão de GEE de cada rota siderúrgica avaliada. A Tabela 19 apresenta o resumo global das emissões de CO₂ e dos grupos de insumos dos cenários modelados.

Tabela 19 – Intensidade de emissões das 5 categorias definidas para cada cenário proposto (tCO_{2eq}/tab)

Cenário	1	2	3A	3B
<i>Minério de ferro</i>	0,03 (0,03 + 0,00)*	0,03 (0,03 + 0,00)	0,04 (0,04 + 0,00)	0,04 (0,04 + 0,00)
<i>Carbono</i>	1,83 (0,18 + 1,65)	0,33 (0,21 + 0,12)	0,06 (0,01 + 0,05)	0,06 (0,01 + 0,05)
<i>Fundentes</i>	0,13 (0,06 + 0,07)	0,0402 (0,0002 + 0,04)	0,0201 (0,0001 + 0,02)	0,0201 (0,0001 + 0,02)
<i>Energia</i>	0,01 (0,002 + 0,008)	0,39 (0,16 + 0,23)	0,06 (0,06 + 0,00)	0,06 (0,06 + 0,00)
<i>Outros gases</i>	0,38 (0,38 + 0,00)	0,59 (0,59 + 0,00)	0,82 (0,82 + 0,00)	0,12 (0,12 + 0,00)
Total	2,37 (0,65 + 1,72)	1,38 (0,99 + 0,39)	1,00 (0,93 + 0,07)	0,30 (0,23 + 0,07)

*Valores entre parênteses: o primeiro refere-se às emissões no *upstream* e o segundo às emissões no consumo

Em um panorama geral, de acordo com a Tabela 19, o uso do carvão vegetal (Cenário 2) reduz em 41,8% as emissões de GEE quando comparado com o uso do coque (Cenário 1) em usinas convencionais. Já o modelo de redução direta, apesar de o hidrogênio ser cinza (Cenário 3A), reduz em 57,8% as emissões de GEE quando comparado ao modelo convencional (Cenário 1). No caso do hidrogênio verde, a redução sobe para 87,3% de emissões a menos que o Cenário 1.

Ainda em termos globais, o Cenário 3A em comparação ao Cenário 2 implicou em uma redução de 27,5% das emissões totais de GEE. Considerando o Cenário 3B, a redução de emissões entre ele e o Cenário 2 é mais significativa, 78,3% de redução quando a fonte do H₂ passa a ser renovável. Em termos gerais do Cenário 3, o Cenário 3B implica na redução de 70,0% das emissões totais de GEE do Cenário 3A.

Tendo em vista o Acordo de Paris e as métricas de cálculo de GEE adotadas pela maioria das entidades para projetar suas metas de descarbonização (que consideram a metodologia do *GHG protocol* e as emissões somente dos Escopos 1 e 2), ao analisar os cenários modelados por essa perspectiva neste trabalho, as emissões consideradas seriam as correspondentes somente às parcelas de “consumo”.

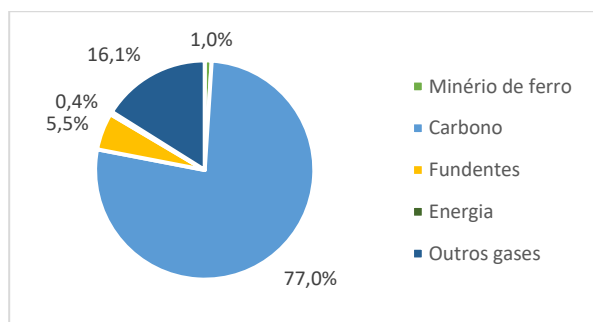
Todavia, a problemática dessa forma de avaliação é que, com exceção do Cenário 1 em que suas emissões no consumo ultrapassam as emissões *upstream*, ao se considerar somente a

parcela de consumo dos outros casos a real dimensão das emissões acaba sendo mascarada, pois, dessa forma, as reduções promovidas pelos cenários 2 e 3, em relação ao Cenário 1, seriam de 77,3% e 95,9%, respectivamente.

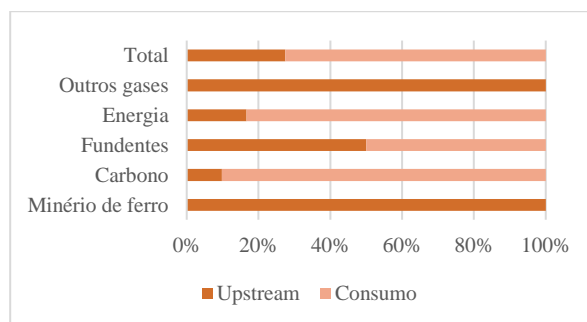
O fato de que essa parcela do consumo não é o maior dos impactos das siderúrgicas alternativas à rota BF-BOF convencional (Cenários 2 e 3) mostra a necessidade de contabilização das emissões *upstream* na perspectiva do produto. Tal questão sugere que a análise de ciclo de vida possa ser uma metodologia de cálculo de pegada de carbono mais condizente com a realidade do que está envolvido na produção do aço, para além do processo produtivo somente.

Uma vez que uma usina passe a se responsabilizar pelas emissões na produção de seus insumos de fonte externa, ela vai considerar a pegada de carbono do produto adquirido tendo em vista o processo empregado pelo fornecedor. Isso geraria competitividade entre os fornecedores para que melhorem a sustentabilidade de seus processos, mesmo que essas empresas não sejam parte dos maiores emissores de GEE, implicando na preocupação com a descarbonização por parte de mais entidades.

Sob outra perspectiva, para uma abrangência maior de detalhes na análise dos cenários calculados, as contribuições individuais dos grupos de cada caso (referentes às tabelas 16 a 18) foram ilustradas nas figuras a seguir. A Figura 4 corresponde ao Cenário 1, a Figura 5 ao Cenário 2 e o Cenário 3 está representado pela Figura 6 e pela Figura 7, sendo elas referentes ao 3A e 3B, respectivamente.

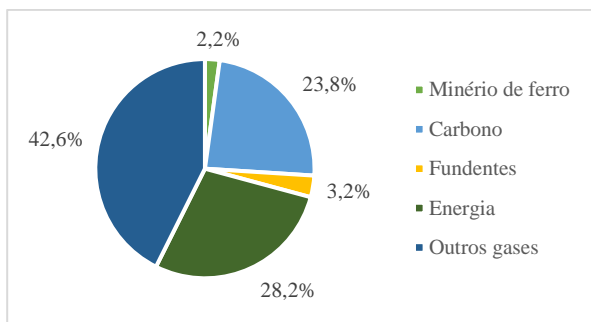


4a: Contribuição dos grupos de insumo no resultado

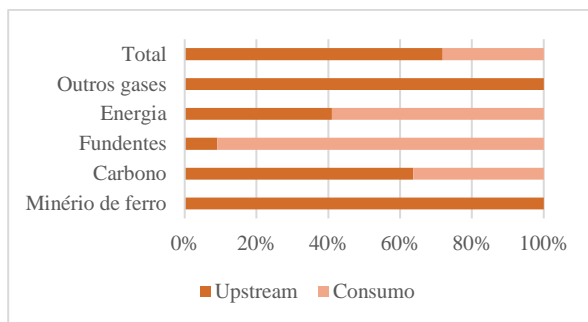


4b: Contribuição dos grupos de insumos entre emissões no *upstream* e no consumo

Figura 4 – Análise contribucional para o Cenário 1.

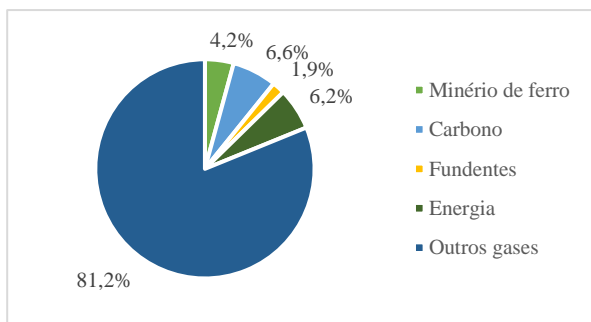


5a: Contribuição dos grupos de insumo no resultado

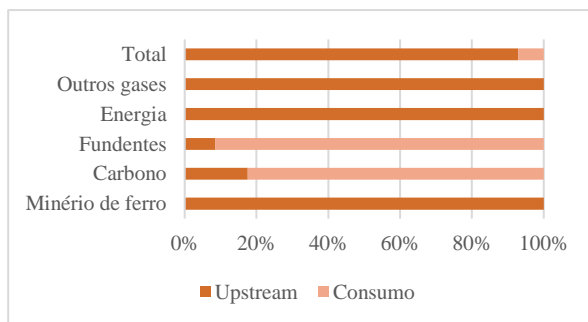


5b: Contribuição dos grupos de insumos entre emissões no *upstream* e no consumo

Figura 5 – Análise contribucional para o Cenário 2.

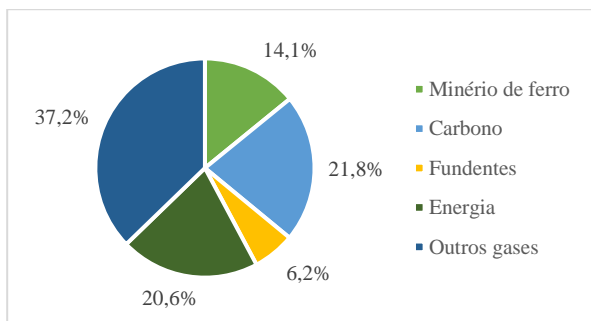


6a: Contribuição dos grupos de insumo no resultado

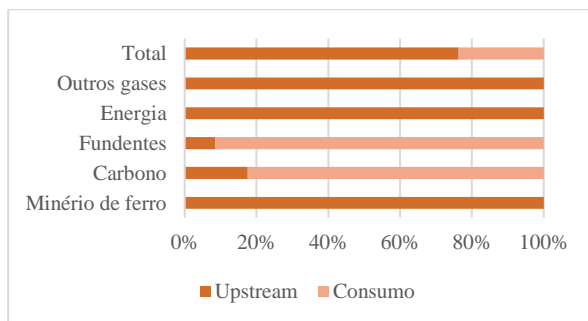


6b: Contribuição dos grupos de insumos entre emissões no *upstream* e no consumo

Figura 6 – Análise contribucional para o Cenário 3A.



7a: Contribuição dos grupos de insumo no resultado



7b: Contribuição dos grupos de insumos entre emissões no *upstream* e no consumo

Figura 7 – Análise contribucional para o Cenário 3B.

Analisando o apanhado global do Cenário 1 (Figura 4a), praticamente 80% de suas emissões correspondem ao chamado *input* de carbono. Correlacionando esse resultado com a Figura 4b, a maior emissão do *input* de carbono (90%) se deve ao seu consumo. Em um detalhe maior (Tabela 16), é possível identificar que a soma dos consumos de carvão metalúrgico e carvão PCI são os responsáveis por tal dimensão.

O carvão metalúrgico, em uma usina integrada a coque, é a principal matéria-prima, conforme já descrito nos capítulos anteriores. O carvão PCI é um material já consolidado nesse

tipo de rota que melhora o custo e a performance do processo dos altos-fornos, funcionando como combustível e redutor, permitindo a diminuição da carga de coque empregada.

O papel do carvão metalúrgico na formação do coque é crucial para abastecer os altos-fornos com as propriedades necessárias de produção. Todavia, assim como nas minas de minério de ferro, há uma redução da qualidade do carvão disponível atualmente, encarecendo o preço do material de melhor qualidade, incentivando estudos para alternativas que visam garantir condição semelhante de coque produzido com menor custo (ANAND et al., 2023).

Nesse sentido, um meio alternativo consolidado de se produzir coque metalúrgico, nas usinas integradas convencionais, com redução de emissões totais de CO₂ de 1% a 5%, é a utilização do biocoque (*biocoke*), que consiste em uma mistura de carvões minerais e biomassa carbonizada para essa produção de coque. A grande questão é que a taxa da mistura dessa biomassa com a de carvão varia na faixa de 2% a 10% do total, raramente alcançando o extremo maior desse intervalo para além dos testes de bancada (JAYASEKARA et al., 2023; SAFARIAN, 2023).

A biomassa utilizada para a produção do biocoque pode ser desde finos de carvão vegetal, que também têm bom desempenho como substituto de carvão PCI injetado nas ventaneiras dos altos-fornos, até resíduos de agricultura pirolisados e briquetados que entram na mistura de carvões para a coqueria. Porém, as características que essa biomassa vegetal confere no coque final produzido limitam a quantidade a ser misturada a 2% por conta da garantia de qualidade do produto que deve ir aos altos-fornos (LIZIERO et al., 2016).

Alguns estudos preliminares apontam o uso de microalga carbonizada como uma alternativa viável ao da biomassa vegetal na mistura de carvões. Além da redução de custo e de emissões de GEE que o acréscimo de biomassa no geral já oferece na mistura (por utilizar menos carvão mineral), a utilização da microalga não compromete a estrutura do coque formado, podendo alcançar a porcentagem de até 10% da mistura de carvões (ANAND et al., 2023; JAYASEKARA et al., 2023; SAFARIAN, 2023).

Em relação ao carvão PCI, seu uso está na consolidação de que, a depender de cada alto-forno, existe uma taxa ótima de injeção desse carvão pulverizado que reduz ao máximo a demanda de coque, o que por consequência, em comparação aos altos-fornos que não possuem a injeção desse material, reduz custo e emissões de GEE devido à carga de coque ser menor com o uso do carvão PCI. Entretanto, a completa substituição é impraticável, visto que reduz a temperatura da reação, o que prejudica a estrutura do forno, e a carga precisa de uma estrutura

específica para a fusão correta do material, o que exige uma quantidade mínima de coque (RAHMATMAND et al., 2023; WANG et al., 2023; ZHANG et al., 2022).

Wang *et al.* (2023) e Zhang *et al.* (2022) destacam a injeção combinada de gás natural e carvão PCI como uma boa técnica para diminuir a dependência dos carvões. Contudo, os autores de ambos os trabalhos concluíram que não existe uma simulação matemática capaz de determinar a proporção ótima, sendo necessária a determinação dessa quantidade por experimento devido às particularidades de cada alto-forno.

Segundo o estudo, o comportamento dos fornos são variáveis entre si e dependem desde a matéria-prima de abastecimento, passando pela estrutura e composição refratária, até as reações que ocorrem internamente, devendo a equipe técnica de cada forno prever sua mistura tradicional de matérias-primas e quais os insumos substitutos de melhor desempenho (WANG et al., 2023; ZHANG et al., 2022).

Em relação às ventaneiras dos altos-fornos, a injeção de gás natural pode aumentar a demanda por oxigênio e a injeção de hidrogênio pode prejudicar a estrutura das camadas de coque, aumentando essa demanda. Em termos de composição da carga, o carvão vegetal é o único capaz de substituir o coque em 100%, contudo pode modificar as características de outros parâmetros como a composição do BFG gerado, que prejudica a possibilidade do seu reaproveitamento, como também não é viável para composição da carga dos altos-fornos com a dimensão tradicional de abastecimento a coque mineral (RAHMATMAND et al., 2023).

Sendo assim, em questão de *input* de carbono e dos demais grupos de insumos, a otimização da rota BF-BOF e sua eficiência energética visando a descarbonização são condições particulares de cada usina. É necessário avaliar a disponibilidade e a pegada de carbono das matérias-primas, a sustentabilidade da usina em conflito com o desempenho dos processos, dentre outros.

Em uma análise do segundo grupo de insumos de maior representatividade no Cenário 1, “outros gases”, esse também tem emissões significativas nos demais cenários, sendo o maior emissor de GEE do Cenário 2 e do Cenário 3A. Ele é basicamente representado pela produção dos gases criogênicos (nitrogênio, oxigênio e argônio). Somente no Cenário 3A que a produção de hidrogênio via gás natural ultrapassa as emissões desses gases no grupo.

Essa quantidade de emissões se deve à forma de produção dos gases criogênicos, que é por compressão, resfriamento e armazenamento a frio, o que demanda muita energia. Ademais, esse fator de emissão foi extraído da base de dados *Ecoinvent* e envolve estimativas, em sua

maioria, de produtoras europeias que podem diferir das condições nacionais, além do fato de a produção ser considerada como externa à planta.

A melhoria desse número para os gases criogênicos seria através de uma mudança na fonte energética utilizada para essa produção. E, no caso do cenário 3A, sobre o hidrogênio produzido com gás natural, a mudança de cenário seria para a migração da tecnologia envolvendo a produção de H₂ via eletrólise, com fonte elétrica renovável e/ou produção via gás natural associada a CCUS, em um momento intermediário de transição tecnológica.

O último grupo com emissões significativas nos cenários avaliados é o grupo “energia”. Suas emissões estão relacionadas ao uso de combustíveis fósseis nas usinas, principalmente o uso do gás natural. A substituição dos combustíveis fósseis depende do investimento em autoprodução de energias renováveis (instalação de turbinas eólicas, placas solares, dentre outros), eletrificação e cogeração interna com subprodutos gerados (por exemplo, uso dos gases de processo para gerar eletricidade).

Ademais, para fins de ratificação dos resultados obtidos na análise de ciclo de vida dos cenários deste trabalho, foram verificados estudos na literatura que estimaram a pegada de carbono do aço considerando rotas siderúrgicas semelhantes. A Tabela 20 abaixo traz um resumo do que foi encontrado em comparação com os resultados dos cenários 1, 2 e 3.

Tabela 20 – Resumo da comparação entre os cenários calculados neste trabalho e estudos semelhantes da literatura científica (valores expressos em tCO₂/tab).

Fonte	BF-BOF convencional	BF-BOF carvão vegetal	DR-EAF hidrogênio cinza	DR-EAF hidrogênio verde
Este estudo	2,37 (0,65 + 1,72)	1,38 (0,99 + 0,39)	1,00 (0,93 + 0,07)	0,30 (0,23 + 0,07)
(JAHANSHAHI et al., 2015)	2,17 (0,10 + 2,07)	1,48 (n.a.**. + n.a.)	-	-
(WICH-KONRAD et al., 2020)	2,17 (0,31 + 1,86)	-	-	0,45 (0,25 + 0,20)
(SUER; TRAVERSO; AHRENHOLD, 2021)	2,12 (0,56 + 1,56)	-	-	-
(LI et al., 2022)	2,05 (n.a. + 2,05)	-	-	0,18 (n.a. + 0,18)
(ZANG et al., 2023)	1,99 (n.a. + n.a.)	-	1,06 (n.a. + n.a.)	-
*Valores entre parênteses: o primeiro refere-se às emissões no <i>upstream</i> e o segundo às emissões no consumo. **n.a.: sem valor declarado no estudo de referência.				

Considerando a ACV de produção do aço em uma usina BF-BOF convencional, com base na tabela 20, a pegada de carbono calculada para representar a condição brasileira (Cenário

1), em comparação com os trabalhos semelhantes de JAHANSHAHI et al. (2015), WICH-KONRAD et al. (2020), SUER; TRAVERSO; AHRENHOLD (2021), LI et al. (2022) e ZANG et al. (2023), é a de maior valor global, somando as parcelas *upstream* e consumo. Suas emissões *upstream* resultam no maior valor em relação aos demais trabalhos analisados.

Isto posto, com relação aos grupos de insumos relacionados às emissões *upstream* do Cenário 1, o maior responsável pelo valor são os gases criogênicos, considerados como produção externa. Ressalta-se que nenhum dos demais trabalhos citados em comparação consideraram esses gases em suas pesquisas.

Logo, para fins de comparação, a pegada de carbono *upstream* do Cenário 1 poderia ser ajustada para 0,27 tCO₂/tab, ao se descontar a parcela de 0,38 tCO₂/tab referente aos gases criogênicos do total de 0,65 tCO₂/tab. Dessa forma, o número global se equipararia ao de ZANG et al. (2023), 1,99 tCO₂/tab, e as emissões *upstream* estariam dentro do intervalo dos valores levantados pelos outros trabalhos analisados.

Tendo em vista os insumos geralmente considerados para a análise *upstream* da produção do aço, dois são inerentes ao processo e a variação das emissões deles depende da localização da planta avaliada. As maiores emissões de GEE acerca de matéria-prima no Cenário 1, no quesito *upstream*, têm relação com os carvões, que são de importação. Conforme declarado anteriormente, a matriz elétrica brasileira é um diferencial do país, como há um outro diferencial de o Brasil ser o segundo maior exportador de minério de ferro do mundo. (STATISTA, 2022).

A Austrália é a maior exportadora de minério de ferro mundial e é um dos maiores exportadores de carvão, o que pode justificar a emissão *upstream* baixa no trabalho de JAHANSHAHI et al. (2015), feito em condições australianas, apesar da matriz elétrica do país ser 71% de fontes fósseis. Já a Alemanha, além de precisar importar minério e carvão, sua matriz elétrica é 56% fóssil, o que pode justificar a pegada *upstream* de carbono mais alta dos dois trabalhos alemães, o de WICH-KONRAD et al. (2020) e o de SUER; TRAVERSO; AHRENHOLD (2021) (IEA, 2022d; OUR WORLD IN DATA, 2022; STATISTA, 2022).

O trabalho de ZANG et al. (2023) tem a menor emissão global do cenário BF-BOF, tal fato pode ter relação com as considerações e métodos da pesquisa. No levantamento para a análise de ciclo de vida, os autores consideraram eventuais créditos associados aos coprodutos além de estimarem as emissões através de balanço de energia. Dessa forma, não é possível distinguir qual a pegada de carbono abatida pelos coprodutos, qual é considerada pelo *upstream* e qual é considerada para consumo.

Já o trabalho de LI et al. (2022) leva em consideração somente as emissões de consumo do cenário BF-BOF, em condições chinesas e seu valor final tem abatimento de emissões devido a créditos relacionados aos coprodutos. Além disso, em seu inventário de análise de ciclo de vida, os autores avaliaram outros insumos não considerados no Cenário 1 e nos demais trabalhos, que é o caso de vapor, água, ar comprimido, sucata, dentre outros.

Com vista para a rota a carvão vegetal, JAHANSHAHI et al. (2015) estimou as emissões de GEE considerando todas as possibilidades de substituição que o carvão vegetal e seus finos podem abranger dentro de uma usina integrada BF-BOF, chegando em 1,48 tCO₂/tab. Além disso, os autores também citam a predominância fóssil da matriz elétrica australiana como um parâmetro contribuinte com o aumento das emissões de GEE.

Em contrapartida, o cenário brasileiro (Cenário 2), com 1,38 tCO₂/tab, tem sua fragilidade na condição de não ser uma usina autossuficiente e ter grande dependência de produções externas de insumos, o que deixa a sua pegada de carbono próxima à dos autores citados, com possibilidade de ser menor caso fosse uma usina autossuficiente.

Apesar das condições adversas das duas situações da rota a carvão vegetal, em um geral, sua pegada de carbono permanece abaixo dos valores relacionados à produção BF-BOF tradicional, sinalizando uma possibilidade de redução de emissões de GEE por volta de 30% a 50% devido ao uso do insumo vegetal, comparando os trabalhos avaliados e os cenários modelados.

Na rota de produção DRI-H₂-EAF, considerando o hidrogênio cinza, o Cenário 3A deste trabalho considerou a produção do hidrogênio contabilizando o fator de emissão *upstream* relacionado à reforma a vapor do gás natural. No trabalho de ZANG et al. (2023), a planta estudada inclui a produção de hidrogênio, então os parâmetros relacionados a ela foram considerados nas emissões diretas, tendo ainda insumos combustíveis como diesel e gás natural, diferente do Cenário 3A. Além disso, a eletricidade do *grid* americano, utilizado no trabalho de ZANG et al. (2023), tem uma pegada maior que a do *grid* brasileiro devido à predominância fóssil de 60% (OUR WORLD IN DATA, 2022).

Por fim, analisando os estudos acerca da rota DRI-H₂-EAF a partir do hidrogênio verde, a diferença está na forma de obtenção do hidrogênio. Os autores LI et al. (2022) e WICH-KONRAD et al. (2020) consideraram uma produção interna do H₂, avaliando os insumos e parâmetros de uma eletrólise internamente à planta siderúrgica. Enquanto isso, para o Cenário 3 foi assumido uma produção externa de hidrogênio. Ainda, o estudo de WICH-KONRAD et al. (2020) objetivou mesclar uma usina siderúrgica e uma planta química de produção de

metanol, o que pode ter contribuído para sua emissão ser a maior, pois pode haver quantidades de insumos relacionadas a esse acréscimo condicional.

Conforme os métodos de contabilização de emissões de GEE se tornam mais detalhados e mais usinas siderúrgicas se voluntariaram a disponibilizar seu inventário de GEE e quantificar suas emissões, o acompanhamento do indicador específico médio global (tCO_{2eq}/tab) vem sofrendo mudanças ao longo do tempo.

Há pelo menos três grupos importantes que se relacionam com o setor siderúrgico e analisam a evolução global da área, a IEA, o IPCC e a WSA. Os valores levantados por cada uma dessas entidades, para as rotas siderúrgicas apontadas neste trabalho, podem ser vistos na Tabela 21 abaixo, com exceção da rota BF-BOF a carvão vegetal que não tem representatividade fora do Brasil.

As metodologias de levantamento de emissões adotadas para fins globais de comparação por essas entidades fazem menção ao método do *GHG protocol* e citam a abrangência das emissões dentro dos Escopos 1 e 2, que podem ser colocados em comparação à ACV feita para os cenários deste trabalho.

Tabela 21 - Intensidade de emissões, em tCO₂/tab, das rotas siderúrgicas levantadas pelas principais entidades

Rota	BF-BOF		DRI-EAF	
	Escopo 1	Escopo 2	Escopo 1	Escopo 2
IEA	1,20	1,00	1,00	0,40
IPCC	1,46	-	0,7	-
WSA	2,32		1,65	

O estudo publicado pela IEA foi desenvolvido em formato de *roadmap* para a indústria de ferro e aço percorrendo sobre uma produção mais sustentável no setor. O cálculo das médias levantadas, acerca das emissões de GEE relacionadas com a indústria do aço, foi embasado no quantitativo energético de cada rota siderúrgica, dividido pela produção de aço bruto divulgado por elas (IEA, 2020a).

Em relação ao IPCC, o documento GNGGI, lançado em 2006, trouxe uma média do indicador de intensidade de emissões de GEE correlacionando indústrias semelhantes e a opinião de especialistas das áreas, o resultado compreendeu somente as emissões diretas (IPCC, 2006).

A WSA possui a própria metodologia de levantamento de emissões de GEE para o setor siderúrgico e faz o acompanhamento do indicador desde 2007. Conforme mais siderúrgicas se voluntariam a compartilhar seus dados, mais acurado se torna o indicador. Em 2022, a

associação divulgou os números pela primeira vez com a separação das rotas, porém o número considera os Escopos 1 e 2 já somados e, em alguns casos, soma-se também alguma parte de Escopo 3, sem detalhamento (WSA, 2022b).

Comparando o valor das emissões do Cenário 1 deste trabalho, para os Escopos 1 e 2, que foi de 1,72 tCO_{2eq}/tab, com as emissões médias estimadas pelas entidades citadas, que variaram entre 2,20 tCO_{2eq}/tab e 2,32 tCO_{2eq}/tab, o cenário modelado em condições brasileiras tem uma pegada de carbono menor. Tal questão pode ter relação com as emissões de Escopo 2, de consumo de energia elétrica da rede, pois o Cenário 1 é autossuficiente.

Caso fossem consideradas as emissões de consumo de eletricidade da base de dados da usina que foi fonte de informação para a modelagem do Cenário 1, o consumo de eletricidade seria de 407,05 kWh/tab (ARCELORMITTAL, 2017), multiplicado pelo fator de emissão considerado para a condição brasileira (0,129 tCO₂/MWh), resultando em um acréscimo de 0,053 tCO₂/tab no número final, que ficaria em 1,77 tCO_{2eq}/tab, ainda abaixo do estimado pelas entidades citadas, provavelmente pelas características da matriz elétrica do Brasil.

Ainda, caso a análise fosse somente pelo Escopo 1, visto que as emissões de consumo do Cenário 1 são referentes a esse Escopo, o valor de 1,72 tCO_{2eq}/tab é bem acima dos valores do IEA e do IPCC de 1,20 e 1,46, respectivamente.

Como não é possível verificar em detalhe o que foi ou não considerado para encontrar os valores das entidades, não é possível identificar com clareza qual a diferença entre eles, visto que 1,65 tCO_{2eq}/tab dos 1,72 tCO_{2eq}/tab são as emissões referentes à entrada de carvões da usina modelada e a metodologia para cálculo do fator de emissão utilizado foi também retirada do documento base do IPCC (GNGGI).

Comparando as rotas DRI-EAF, que levam em consideração somente a reforma a vapor do gás natural, a pegada de carbono (Escopos 1 e 2) do Cenário 3A seria 0,07 (Escopo 1) somado a 0,77 (valor referente à produção do hidrogênio cinza, pois a produção do redutor deve ser considerada *in loco* nessa comparação) e somado a 0,06 (Escopo 2), resultando em 0,90 tCO_{2eq}/tab, muito abaixo do estimado pelas entidades internacionais (entre 1,40 e 1,65). Tal questão pode ser devido à matriz elétrica brasileira e seu baixo fator de emissão, visto que as emissões de 0,06 tCO_{2eq}/tab do Escopo 2 do Cenário 3A é 85% menor que as emissões de 0,40 tCO_{2eq}/tab do inventário do IEA.

Já comparando somente o Escopo 1 dessas rotas, o Cenário 3A com 0,84 tCO_{2eq}/tab é 17% maior que o valor declarado pelo IPCC (0,70 tCO_{2eq}/tab) e 16% abaixo do declarado pelo IEA (1,00 tCO_{2eq}/tab). Nesse caso, o que pode justificar a diferença entre as projeções são as

metodologias distintas de cálculo de fator de emissão e de levantamento dos dados para composição do inventário de GEE.

O Cenário 3A teve a base de dados extraída de um artigo com estimativas de consumo a partir de modelos matemáticos, o levantamento do IEA foi a partir da conversão do balanço energético de usinas que envolvem a América do Norte e a Europa, para um inventário de CO₂ e o IPCC utilizou a própria metodologia que tem embasamento em usinas da Europa e da América do Norte, bem como a experiência de especialistas desses mesmos continentes. Além disso, o Cenário 3A considera a redução dos óxidos de ferro com hidrogênio puro, a partir de uma origem fóssil, já as rotas descritas pelas entidades consideram a redução com gás natural, separado em CO e H₂, conforme descrição no item 3.2.3 deste trabalho.

Em uma análise geral, é possível identificar as vantagens do contexto do Brasil quanto à produção de aço em território nacional. A disponibilidade de biomassa para a produção de carvão vegetal, que pode ser aplicada na redução dos óxidos de ferro, é um diferencial. Além disso, a matriz elétrica brasileira colabora com a redução de emissões de GEE quando comparada a outros países de matriz majoritariamente fóssil.

A matriz elétrica brasileira ser mais de 80% composta por fontes renováveis, por um lado valoriza o fator de emissão relacionado a ela, reduzindo a pegada de carbono de quem usa o Sistema Integrado Nacional, por outro pode dificultar o investimento em projetos que podem aumentar essa porcentagem de energias renováveis, uma vez que já possui valorização e destaque pela porcentagem atual (EPE, 2022d).

No quesito do carvão vegetal, em 2021, das 33,78 milhões de toneladas de gusa produzidas (somando usinas e produtores independentes), 7,64 milhões de toneladas foram feitas a partir desse insumo, um consumo estimado de 4,25 milhões de toneladas de carvão vegetal para essa produção (IBA, 2022; SINDIFER, 2022). Caso o total de gusa produzido tivesse sido feito com carvão vegetal, seriam necessárias mais 14,55 milhões de toneladas, totalizando 18,80 milhões de toneladas de carvão vegetal consumidos.

No ano de 2021, no Brasil, foram estimados 9,93 milhões de hectares de área plantada para fins comerciais, desse total, 12% foi destinado ao setor siderúrgico, o correspondente a 1,19 milhões de hectares (IBA, 2022). Associando tais dados aos dados do parágrafo anterior, caso o consumo estimado de carvão vegetal para a produção nacional de gusa de 2021 fosse atendida, seriam necessários mais 4,08 milhões de ha de área plantada para tal fim, um aumento de 3,42 vezes da condição existente, totalizando 5,27 milhões de hectares.

Vale destacar que, além dos 12% destinados ao setor siderúrgico, os 88% restantes das áreas plantadas para fins comerciais são destinados para celulose e papel (36%), painéis e pisos (6%), investidores financeiros (10%), produtores independentes (29%), produtos sólidos (4%) e outros (3%) (IBA, 2022).

Os 5,27 milhões de hectares calculados para a produção de gusa total de 2021 correspondem a 53% da área total destinada para fins comerciais, o que demonstra as limitações existentes relacionadas à matéria prima caso a rota a carvão vegetal fosse a única direção a ser seguida para a descarbonização do setor siderúrgico do país, sem contar as limitações industriais devido à adequação de uma usina BF-BOF para abastecimento com esse insumo (questões elucidadas no item 3.2.2).

5.2. Potencial do uso do hidrogênio na descarbonização do setor siderúrgico

5.2.1. Comparação dos reports nacionais e internacionais

As metodologias de levantamento de emissões adotadas para fins globais de comparação pelos grupos do setor siderúrgico, conforme mencionado anteriormente, fazem menção ao método do *GHG protocol* e citam a abrangência das emissões dentro dos escopos dessa metodologia, que podem ser colocados em comparação à ACV feita para os cenários deste trabalho.

O *China Baowu Steel Group* está posicionado como o maior produtor de aço da China e do mundo, sua produção corresponde a pouco mais que 5% da produção total mundial. Sua atuação como siderúrgica está toda em território chinês. Sua produção BF-BOF corresponde a 93,5% de seu total, com o restante sendo EAF abastecido com sucata (GHOSH, 2021).

Como meta de descarbonização, a empresa declarou que seu pico de emissões de CO₂ acontecerá no ano de 2023, que reduzirá 30% de suas emissões até 2035 e alcançará o *net-zero* até 2050. O foco de seu investimento para alcance da meta está no aumento do consumo de sucata e no desenvolvimento de altos-fornos com injeção de H₂ nas ventaneiras (BF com H₂) (CHINA BAOWU STEEL GROUP, 2020; GHOSH, 2021).

O *Tata Steel Group* é proveniente do 2º país maior produtor mundial de aço, a Índia. O grupo corresponde ao 10º maior produtor mundial. Além do país de origem, também está presente na Europa e na Tailândia. 86% de suas usinas siderúrgicas são BF-BOF. Seu indicador médio global de emissões é 2,62 tCO_{2eq}/tab de Escopo 1 e 2 somado a 0,33 tCO_{2eq}/tab de Escopo 3 (TATA STEEL GROUP, 2022).

O grupo assumiu duas metas, uma correspondente às empresas presentes na União Europeia e uma meta sobre a abrangência na Índia. O grupo almeja reduzir as emissões europeias em 30% até 2030 e alcançar a neutralidade de carbono até 2050. Já a meta para as instalações na Índia é de reduzir o indicador para abaixo de 2,00 tCO_{2eq}/tab até 2025 e abaixo de 1,8 tCO_{2eq}/tab até 2030 (TATA STEEL GROUP, 2022).

Como plano de ação, o *Tata Steel Group* está investindo no aumento do consumo de sucata e economia circular, nas melhores técnicas disponíveis de operação, na melhora da qualidade das matérias-primas, no aumento da quota produzida e utilizada de energias renováveis, na precificação interna de carbono, no H₂ combustível e redutor em BF-BOF e DR-EAF, com investimento inicial em gás natural e investindo em CCUS (TATA STEEL GROUP, 2022).

A *Nippon Steel Corporation* é a 4ª maior produtora de aço do mundo e pertence ao 3º país maior produtor. De origem Japonesa, 56% de sua produção acontece em seu país natal, mas está presente em 15 países. Sendo assim, a corporação assumiu sua meta de redução de emissões de CO₂ considerando todas as suas unidades, se comprometendo a alcançar 30% de redução até 2030 e neutralidade de carbono até 2050 (NIPPON STEEL CORPORATION, 2022b, 2022a).

Com indicador médio global de emissões de 1,88 tCO_{2eq}/tab, seu plano de ação envolve o desenvolvimento de tecnologia para injeção de hidrogênio em altos-fornos com tecnologia de CCUS para as emissões residuais de CO₂, desenvolvimento de fornos EAF maiores, para alcançar a produtividade da rota tradicional e substituição do gás natural por hidrogênio nas plantas de DRI (NIPPON STEEL CORPORATION, 2022b, 2022a).

A *Nucor Corporation*, sediada nos EUA, 4º maior produtor de aço do mundo, tem todas as suas plantas siderúrgicas funcionando no país natal. É a 15ª maior produtora mundial de aço, com 100% de suas plantas produzindo com sucata, DRI e EAF. Com indicador médio global de 0,44 tCO_{2eq}/tab de Escopo 1 e 2 somado a 0,32 tCO_{2eq}/tab de Escopo 3, se comprometeu a reduzir suas emissões de CO₂ em 35% até 2030 e prosseguir para o *net-zero*, sem prazo definido (NUCOR CORPORATION, 2022).

Seu plano de ação abrange o aumento do uso de energias renováveis, a eficiência energética de suas plantas, investimento na economia circular da sucata e investimento em pesquisas de novas tecnologias de baixo carbono, como a CCUS (NUCOR CORPORATION, 2022).

O *NLMK Group* é sediado na Rússia, 5º país maior produtor mundial de aço, mas tem operações nos EUA, Dinamarca, França, Bélgica e Itália. É o 21º produtor de aço do mundo, com 77% de sua produção BF-BOF e 23% EAF. Com indicador médio global de emissões de CO₂ de 1,88 tCO_{2eq}/tab, se comprometeu a reduzir suas emissões em 10% até 2030 e alcançar a neutralidade de carbono até 2050 (NLMK GROUP, 2021).

Seu plano de ação envolve investimento na eletrificação de suas plantas, desenvolvimento de briquetes de DRI e utilização de gás natural e energia nuclear para posterior migração para o uso de hidrogênio. Pretende investir em pesquisas de tecnologias de baixo carbono e na eficiência energética de suas plantas (NLMK GROUP, 2021).

O *POSCO Group* tem suas origens na Coreia do Sul, 6º país maior produtor de aço do mundo, e é a 6ª maior produtora de aço também. Com 96,5% de sua produção proveniente de usinas BF-BOF, sua meta de redução de CO₂ é reduzir em 20% suas emissões até 2030, 50% em 2040 e ser carbono neutro em 2050 (POSCO GROUP, 2020, 2021).

O plano de ação do grupo consiste no aumento do uso de sucata, desenvolvimento de tecnologias para uso de CCUS e de fabricação de aço com hidrogênio, produção de aço de alta resistência e de aço elétrico para eficiência em seu uso, participação em iniciativas de políticas de carbono e investimento no desenvolvimento de siderurgias baixo carbono (POSCO GROUP, 2020, 2021).

A *Erdemir* é uma das duas siderúrgicas integradas pertencentes ao *OYAK Group*, na subdivisão *OYAK Mining Metallurgy*. Sendo a 48ª maior fabricante de aço do mundo, sua localização está na Turquia, seu país de origem, que ocupa a 7ª posição em produção de aço globalmente (OYAK GROUP, 2022).

O *OYAK Group* possui duas siderúrgicas integradas, que respondem por quase 25% da produção de aço da Turquia. A empresa não declara seu indicador de intensidade de emissões e ainda está estudando sua meta e plano de ação para descarbonização, fazendo parte de iniciativas e pesquisas a respeito do assunto (OYAK GROUP, 2022).

Um dos seguimentos do grupo *Thyssenkrupp* é a produção de aço em uma planta integrada localizada na Alemanha. A empresa é a 39ª maior produtora de aço mundial e seu país de origem é o 8º maior produtor. Seu indicador médio global de emissões de CO₂ está relacionado à quantidade de vendas e às emissões do grupo como um todo, não só a siderurgia, não podendo ser quantificado para comparação com os outros grupos (THYSSENKRUPP, 2022).

O plano de ação para a descarbonização de sua planta siderúrgica iniciou em 2018 com CCU, aplicando o CO₂ na produção de Metanol. A empresa está estudando a injeção de H₂ nas ventaneiras dos altos-fornos e construirá uma unidade de DR a gás natural para posterior migração para H₂. O foco também é a eficiência energética, a otimização dos processos e o investimento em pesquisa e tecnologia baixo carbono (THYSSENKRUPP, 2022).

A *ArcelorMittal* é a 2ª maior produtora mundial de aço e já esteve na primeira posição por vários anos. Como siderurgia atua em 17 países, com 51% da produção em 5 países pertencentes à União Europeia. Com 54% de suas usinas na rota BF-BOF, seu indicador médio global de emissões (Escopos 1, 2 e 3) é 2,02 tCO_{2eq}/tab, sendo 2,36 tCO_{2eq}/tab BF-BOF e 0,50 tCO_{2eq}/tab EAF (ARCELORMITTAL, 2022).

Sua meta está dividida em plano global e plano europeu. Pretende reduzir suas emissões globais em 25% e as europeias em 35% até 2030, visando o *net-zero* até 2050. Seu plano de ação é regionalizado, envolve a transição da tecnologia BF-BOF para DR-EAF, a combinação de energia limpa com CCUS, biomassa e hidrogênio, o aumento do uso de sucata, a compra de energia limpa certificada, o incentivo de crédito de carbono e o investimento em pesquisa e tecnologia baixo carbono (ARCELORMITTAL, 2021).

No Brasil, 9º país maior produtor mundial de aço, a *ArcelorMittal* é a maior produtora. Em seu relatório de sustentabilidade do país, apresenta as emissões absolutas da empresa, cita o plano global de descarbonização do grupo e a meta de redução de emissões de 25% até 2030. O plano de ação envolve os caminhos já citados no plano global e não há menção a nada específico para o contexto brasileiro (ARCELORMITTAL BRASIL, 2021).

A Gerdau é a 2ª maior produtora de aço do Brasil, suas demais unidades produtoras envolvem as Américas do Norte e do Sul. Possui uma usina integrada tradicional e duas integradas a carvão vegetal em território brasileiro, as demais são usinas EAF abastecidas com sucata. Seu indicador médio global de intensidade de emissões de CO₂ é 0,90 tCO_{2eq}/tab (GERDAU S.A., 2021).

Sua meta de redução de emissões declarada é abater o valor de 0,93 tCO_{2eq}/tab, do ano base 2020, para 0,83 tCO_{2eq}/tab em 2031, referentes aos Escopos 1 e 2, utilizando 4 caminhos: eficiência energética e operacional, ampliação do uso de sucata, expansão da base florestal e investimento em energia renovável e em novas tecnologias (GERDAU S.A., 2021).

A Ternium é um grupo que teve sua origem em Luxemburgo, porém sua maior atuação no setor siderúrgico está nos países México, Brasil e Argentina. É a 3ª maior produtora de aço do Brasil, com 63% de rota BF-BOF em sua operação. Seu indicador médio global de

intensidade de emissões é 1,73 tCO_{2eq}/tab Escopo 1 e 2 somado a 0,07 tCO_{2eq}/tab Escopo 3 (TERNIUM, 2021).

A meta declarada da empresa é de reduzir em 20% suas emissões de CO₂ até 2030. O plano de ação corresponde a aumentar para 40% o uso de energias renováveis, investir em eficiência energética, aumentar o uso de sucata, incluir biomassa na mistura de carvões, instalar CCUS nas usinas DRI e só expandir a capacidade com tecnologias de baixo carbono (TERNIUM, 2021).

O 4º maior produtor de aço do Brasil é o Grupo CSN. Possui 6 siderúrgicas, 3 no Brasil, 1 nos EUA, 1 em Portugal e 1 na Alemanha. Em seu projeto de descarbonização considera somente as usinas integradas, duas brasileiras e a usina alemã. Seu indicador médio global de intensidade de emissões é 1,98 tCO_{2eq}/tab para as três siderúrgicas (GRUPO CSN, 2021).

Sua meta declarada é a redução de suas emissões de CO₂ em 10% até 2030 e em 20% até 2035. Seu plano de ação de descarbonização envolve tecnologia de fabricação de ferro de baixo carbono, uso de biomassa, uso de hidrogênio e amônia, CCUS, otimização de processos e eficiência energética (GRUPO CSN, 2021).

A Usiminas é a 5ª maior produtora de aço do Brasil, suas siderúrgicas estão localizadas em Ipatinga - MG e Cubatão - SP. Não declarou meta de redução de emissões de GEE para grupo e nem especificamente para as siderurgias, também não divulgou seu indicador específico de emissões de CO₂, portanto não há plano de ação declarado para esse aspecto (USIMINAS, 2021).

A Tabela 22 abaixo apresenta um resumo dos resultados de pegada de carbono (tCO_{2eq}/tab) do aço produzido pelos grupos siderúrgicos analisados neste trabalho.

Tabela 22 – Resumo dos dados relacionados à pegada de carbono referente aos principais grupos siderúrgicos

Grupo siderúrgico	Abrangência da siderurgia	Tipo de rota	Pegada de carbono (Escopos 1 e 2)	Meta definida de redução	Plano de ação	Meta de redução das localidades
<i>China Baowu Steel Group</i>	China	94% BF-BOF	ND	30% até 2035	Sucata BF com H ₂	China: Pico em 2030
<i>Tata Steel Group</i>	Europa e Índia	86% BF-BOF	2,62	U.E.: 30% até 2030 Índia: <1,8 até 2030	Sucata BAT En. Renov. Precif. Carb. BF com H ₂ DR com H ₂ CCUS	U.E.: 55% até 2030 Índia: 45% até 2030

<i>Nippon Steel Corp.</i>	Multinacional	ND	1,88	30% até 2030	BF com H ₂ CCUS maior prod. EAF DR com H ₂	Japão: 46% até 2030
<i>Nucor Corp.</i>	EUA	EAF DRI e sucata	0,44	35% até 2030	En. Renov. Ef. Energ. Sucata Tec. Low Carb.	EUA: 50- 52% até 2030
<i>NLMK Group</i>	Multinacional	77% BF- BOF	1,83	10% até 2030	Ef. Energ. Tec. Low Carb. Eletrificação En. Nuclear e GN	Rússia: Pico em 2030
<i>POSCO Group</i>	Coreia do Sul	97% BF- BOF	2,05	20% até 2030	Sucata CCUS H ₂ Tec. Low Carb.	Coreia S.: 40% até 2030
<i>Erdemir</i>	Turquia	BF-BOF	ND	ND	Participação em iniciativas de Tec. Low Carb.	Turquia: 41% até 2030
<i>Thyssenkrupp</i>	Alemanha	BF-BOF	ND	30% até 2030	Sucata CCUS BF-BOF para DR com H ₂ e BF com H ₂ Ef. Energ. BAT Tec. Low Carb.	Alemanha: 65% até 2030
<i>ArcelorMittal</i>	Multinacional	54% BF- BOF	2,02 (Escopos 1, 2, 3)	U.E.: 35% até 2030 Global: 25% até 2030	BF-BOF para DR com H ₂ e BF com -H ₂ CCUS Biomassa Sucata En. Renov. Cred. Carb. Tec. Low Carb.	U.E.: 55% até 2030
<i>Gerdau</i>	Multinacional	ND	0,90	~11% até 2031	Ef. Energ. BAT En. Renov. Tec. Low Carb. Sucata Biomassa	Brasil: 43% até 2030
<i>Ternium</i>	Multinacional	63% BF- BOF	1,73	20% até 2030	Ef. Energ. En. Renov. Tec. Low Carb. Sucata Biomassa CCUS	Brasil: 43% até 2030

<i>CSN</i>	Brasil e Alemanha	BF-BOF	1,98	10% até 2030	Ef. Energ. En. Renov. Tec. Low Carb. Sucata H ₂ Biomassa CCUS	Brasil: 43% até 2030 Alemanha: 65% até 2030
<i>Usiminas</i>	Brasil	ND	ND	ND	ND	Brasil: 43% até 2030

A análise da Tabela 22 tem seu ponto de partida considerando que geralmente o setor industrial corresponde a 10% das emissões de GEE dos países e, no caso do setor siderúrgico, a *World Steel Association* é a primeira referência para a maioria dos grupos nacionais e internacionais, tanto em termos de diretrizes quanto em termos de comparação de situações (EUROPEAN PARLIAMENT, 2023; WSA, 2022b).

A WSA estimou a pegada de carbono média mundial do aço em 1,91 tCO_{2eq}/tab (WSA, 2022b), incluindo as rotas BF-BOF, EAF sucata e DRI-EAF. Dessa forma, as empresas de rotas mistas que performaram próximas a esse valor e os países em que estão inseridas não declararam planos muito restritivos de descarbonização, definiram metas de redução de emissões entre 10% e 20% até 2030.

Os países e grupos de países considerados como maiores emissores de GEE são China, EUA, U.E., Índia e Rússia, em ordem decrescente de quantidade de emissões. A China tem um plano governamental que é renovado a cada 5 anos, porém não se comprometeu em reduzir emissões até 2030. Os EUA têm plano de redução de 50-52% até esse período, a Índia definiu 45% e a Rússia não definiu redução até o fim da década de 2020 (EUROPEAN PARLIAMENT, 2023; PARIS AGREEMENT PARTIES, 2023).

A União Europeia almeja ser o primeiro “continente” a se tornar carbono neutro até 2050, para seguir essa aspiração definiu tratados e políticas que seus países-membro devem usar como diretrizes para a descarbonização de seus setores. Os membros do grupo precisam propor ações que alcancem pelo menos 55% de redução de emissões até 2030. A Alemanha como maior emissora do grupo, tem a meta mais restritiva (EUROPEAN COMMISSION, 2023; EUROPEAN PARLIAMENT, 2023).

Tal questão também afeta as empresas que se instalaram em países-membro da U.E. Dessa forma, é possível visualizar que as metas de redução de siderúrgicas dentro da U.E. são mais desafiadoras e os planos de ação envolvem testes e pilotos nessas localidades, principalmente ao se tratar de tecnologias disruptivas. O grupo como um todo pretende liderar uma nova revolução industrial (EUROPEAN COMMISSION, 2023).

Já o Japão, que no ranking de emissões globais de GEE é o 6º país em sequência da Rússia, propôs o plano de crescimento *Green Growth Strategy* para alcançar a neutralidade de carbono em 2050. Sendo assim, todos os aspectos relacionados à descarbonização no país seguem diretrizes desse plano, por isso a contabilização das emissões da siderurgia é a partir de metodologia própria (EUROPEAN PARLIAMENT, 2023; METI, 2022).

O *Tata Steel Group* é o maior emissor de GEE da Tabela 22 e possui duas metas de redução de emissões, uma envolvendo a União Europeia e a outra envolvendo a Índia. Em um cálculo dos dados declarados, seu indicador de emissões na Índia ultrapassa 3,0 tCO_{2eq}/tab, portanto, sua meta de reduzir esse valor para abaixo de 1,8 tCO_{2eq}/tab corresponde a reduzir no mínimo 40% dessas emissões (TATA STEEL GROUP, 2022).

O grupo inaugurou uma planta de CCUS associada aos altos-fornos de sua usina *Jamshedpur* e segue com testes de injeção de gás enriquecido com hidrogênio nas ventaneiras. A empresa se juntou ao *Sea Cargo Charter*, se comprometendo a reduzir suas emissões em rotas marítimas. Ainda, está investindo em biocombustíveis e veículos elétricos para transporte de seus insumos e produtos (TATA STEEL GROUP, 2022).

Avaliando todos os planos de descarbonização declarados, 54% citam o H₂ como um passo a ser dado para cumprimento das metas declaradas, porém somente 31% das empresas fazem menção ao investimento em redução direta com o objetivo claro de uso futuro do H₂ como redutor. É importante destacar que a condição de redução direta com hidrogênio puro é considerada por essas empresas após investimento, primeiramente, em reforma a vapor do gás natural e em testes e pesquisas acerca da transição para o hidrogênio.

Uma outra tecnologia considerada para o uso do H₂ como estratégia de descarbonização é a injeção do gás nas ventaneiras dos altos-fornos, 38% das entidades citam esse investimento. Tal condição é um próximo passo para as localidades em que a injeção de gás natural é amplamente utilizada, principalmente em países que o gás natural tem custo baixo. Nas propostas sobre essa tecnologia, como a injeção de H₂ não cobre 100% das emissões do alto-forno, esses estudos estão associados também à aplicação de CCUS nas emissões residuais.

Apesar das intenções e perspectivas de que a rota tradicional siderúrgica será correlacionada com DRI, uso de hidrogênio redutor e CCUS como caminho natural em curto-médio prazo da descarbonização do setor, é unânime de que o primeiro passo antes desse investimento será acerca da busca das melhores técnicas disponíveis, da eficiência energética, da preferência pelas energias renováveis e do incentivo à pesquisa e tecnologia envolvendo o

que já existe. Do total analisado, 77% dos grupos consideram investir primeiro nessa melhoria dos processos existentes.

A otimização das unidades do processo siderúrgico tradicional a partir das melhores técnicas disponíveis (BAT) é tido como o primeiro caminho para a redução de emissões de GEE, capaz de reduzir as emissões das usinas BF-BOF convencionais em 26% sem grandes investimentos e modificações (MPP, 2022).

O BAT envolve a implementação do Sistema de Gestão Ambiental (SGA, de acordo com a NBR ISO 14001), de projetos de eficiência energética (redução de perdas, cogeração de energia, automatização e monitoramento online, pré-aquecimento e conservação do calor de estruturas utilizadas em altas temperaturas, priorização de energias renováveis), de gestão de materiais para controle da qualidade com foco em redução de desperdício, reaproveitamento, reciclagem e prevenção de poluição, com a gestão de coprodutos e resíduos que podem ser aplicados em outras indústrias, dentre outros (REMUS et al., 2013).

Considerando o alinhamento do cenário brasileiro atual com os resultados discutidos neste trabalho, os primeiros passos relacionados à descarbonização siderúrgica nacional apontam para o aumento do uso de EAF-sucata (que representam 23,3% da produção nacional), aumento da produção via carvão vegetal (que hoje é cerca de 24% da produção nacional de gusa) e investimento em BAT nos cenários BF-BOF a coque (IAB, 2022; SINDIFER, 2022).

A implantação de usinas de redução direta com H₂ no Brasil, atualmente, demandaria investimento primeiramente em redução direta via gás natural para posterior transição para H₂ (conforme as tendências declaradas nos relatórios dos grupos influentes do setor mundial analisados neste trabalho), o que na condição brasileira implicaria na construção de novas plantas siderúrgicas ou no aumento de produção das plantas existentes com construção anexa desses reatores.

Além disso, o alto custo atual do gás natural no país faz com que esse tipo de investimento não seja prioridade nas metas declaradas pelos líderes do mercado nacional. Contudo, com a maturidade futura da tecnologia de produção de hidrogênio, aliada ao desenvolvimento de usinas que fariam uso do H₂ verde, tal cenário possa se tornar atrativo nos próximos anos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em um panorama geral, tendo em vista condições brasileiras, o uso do carvão vegetal (Cenário 2 – 1,38 tCO_{2eq}/tab) reduz em 41,8% as emissões de GEE quando comparado com o uso do coque (Cenário 1 – 2,37 tCO_{2eq}/tab) em usinas convencionais. Já o modelo de redução direta, apesar de o hidrogênio ser cinza (Cenário 3A – 1,00 tCO_{2eq}/tab), há uma redução de 57,8% das emissões de GEE quando comparado ao modelo convencional. No caso do hidrogênio verde (Cenário 3B – 0,30 tCO_{2eq}/tab), a redução sobe para 87,3% de emissões a menos que o Cenário 1. Em termos gerais do Cenário 3, o uso do hidrogênio verde implica na redução de 70% das emissões totais de GEE quando comparado com o uso do hidrogênio cinza.

Em uma divisão do cálculo de pegada de carbono a partir da análise de ciclo de vida, o fato de que o consumo não é o maior dos impactos nas rotas alternativas à rota BF-BOF convencional (Cenários 2 e 3) mostra a necessidade de contabilização das emissões *upstream*. Tal questão sugere que a ACV possa ser uma metodologia de inventário de GEE mais condizente com a realidade da produção do aço, pois avalia a pegada de carbono do produto e não da empresa, conforme os grupos que utilizam métodos semelhantes ao *GHG protocol*.

A comparação dos cenários deste trabalho com os seis estudos semelhantes acerca da pegada de carbono da produção nas rotas BF-BOF convencional, BF-BOF carvão vegetal e DR-H₂-EAF, evidencia a fragilidade em que as metodologias variadas utilizadas entre os trabalhos e as particularidades locais definem as pegadas de carbono. Diferentes fatores de emissão para um mesmo insumo e a consideração ou não de outros insumos trazem alterações importantes para os resultados de emissões de GEE.

A metodologia que mais se aproxima de uma homogeneidade entre as usinas siderúrgicas ao redor do mundo é a proposta pelo WSA, apesar de ela desconsiderar particularidades locais, seus fatores de emissão e insumos são padronizados, dessa forma, as usinas que fazem o levantamento de suas emissões por esse método são comparadas sob as mesmas condições.

Em uma análise geral, é possível identificar as vantagens do contexto do Brasil quanto à produção de aço em território nacional. A disponibilidade de biomassa para a produção de carvão vegetal, que pode ser aplicada na redução dos óxidos de ferro, é um diferencial. Além disso, a matriz elétrica brasileira colabora com a redução de emissões de GEE quando comparada a outros países de matriz majoritariamente fóssil.

A matriz elétrica brasileira ser mais de 80% composta por fontes renováveis, por um lado valoriza o fator de emissão relacionado a ela, reduzindo a pegada de carbono de quem usa

o Sistema Integrado Nacional, por outro pode dificultar o investimento em projetos que podem aumentar essa porcentagem de energias renováveis, uma vez que já possui valorização e destaque pela porcentagem atual.

Ainda, em um cálculo de estimativa da área plantada necessária para suprir a produção de ferro-gusa nacional a partir do carvão vegetal, o resultado foi de utilização de 53% do total de 9,93 milhões de hectares que se tem hoje destinado para fins comerciais. A grande questão é que, do total dessa área, somente 12% é de fato destinado para as siderurgias.

Caso fosse realmente considerada a produção nacional de gusa com carvão vegetal, haveria a necessidade de aumento da condição existente (1,19 milhões de hectares) em 3,42 vezes. Além disso, existem as limitações industriais devido à adequação de uma usina BF-BOF para abastecimento com carvão vegetal, que implicaria na redução da produção das usinas tradicionais existentes, pois os altos-fornos precisam ser menores e na construção de novas usinas ou de novos altos-fornos.

A evolução das pesquisas acerca da descarbonização do setor siderúrgico mostrou que são necessárias políticas públicas de incentivo para que tecnologias sejam desenvolvidas em uma associação de empresas, governos e academias, que sejam adaptadas a condições locais. É preciso também de um caminho intermediário de transição, da situação atual para a condição futura almejada.

Avaliando todos os planos de descarbonização declarados, 54% citam o H₂ como um passo a ser dado para cumprimento das metas declaradas, porém somente 31% das empresas fazem menção ao investimento em redução direta com o objetivo claro de uso futuro do H₂ como redutor. É importante destacar que a condição de redução direta com hidrogênio puro é considerada por essas empresas após investimento, primeiramente, em reforma a vapor do gás natural e em testes e pesquisas acerca da transição para o hidrogênio.

Apesar das intenções e perspectivas de que a rota tradicional siderúrgica será correlacionada com DRI, uso de hidrogênio redutor e CCUS como caminho natural em curto-médio prazo da descarbonização do setor, é unânime de que o primeiro passo antes desse investimento deva ser acerca da busca pelas melhores técnicas disponíveis para os cenários já existentes, da eficiência energética, da preferência pelas energias renováveis e do incentivo à pesquisa e tecnologia.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Para desenvolvimento posterior do tema explorado neste trabalho, alguns pontos podem ser enriquecidos e detalhados em trabalhos futuros que desejam discutir a descarbonização do setor siderúrgico em condições brasileiras. São eles:

- Estender a avaliação do desempenho ambiental da produção do aço para outras categorias ambientais além da categoria “pegada de carbono”. O setor siderúrgico pode compreender impactos na qualidade do ar, do solo e das águas (subterrâneas e superficiais), assim como em impactos sobre a vizinhança e as outras áreas direta e indiretamente afetadas pelo empreendimento;
- Complementar a análise das possíveis rotas de descarbonização da siderurgia com a avaliação dos impactos econômicos associados às modificações e implantações necessárias, bem como elaboração de uma curva de hierarquização de tecnologias, associando potencial de descarbonização e custo envolvido.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **ABNT NBR ISO 14040**. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009a.

ABNT. **ABNT NBR ISO 14044**. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009b.

ABRADEE. **Tarifas de energia**. Disponível em: <<https://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/tarifas-de-energia>>. Acesso em: 2 dez. 2022.

ADNOC. **AL REYADAH: PROJECT DETAILS**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.geos.ed.ac.uk/scs/project-info/622>>. Acesso em: 3 nov. 2022.

AHK. **Portal Hidrogênio Verde: Aliança Brasil-Alemanha. Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha**, 2021. Disponível em: <<https://www.h2verdebrasil.com.br/no-brasil/>>. Acesso em: 3 nov. 2022

ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. **Processos de Conformação dos Materiais - Introdução aos processos de conformação parte I**. 2012.

ANAND, A. et al. Bio-coke: A sustainable solution to Indian metallurgical coal crisis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 171, p. 105977, maio 2023.

ANDERSSON, J.; GRÖNKVIST, S. A comparison of two hydrogen storages in a fossil-free direct reduced iron process. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 56, p. 28657–28674, 13 ago. 2021.

ANDERSSON, J.; GRÖNKVIST, S. Improving the economics of fossil-free steelmaking via co-production of methanol. **Journal of Cleaner Production**, v. 350, 20 maio 2022.

ÂNGELO, M. M. **Construção e simulação de um algoritmo que permita prever os efeitos da injeção de diferentes materiais pulverizados pelas ventaneiras em altos-fornos**. Dissertação de Mestrado—Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil: Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, 2013.

ANTONIOLI, A. Alternative Routes to Steel Based on Hydrogen From Cheap Hydroelectric Power . **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 7, n. 6, p. 507–517, 1982.

APERAM. **Balanco Energético Global 2015 - Aperam Timóteo. 37º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades** Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), , 2016.

ARCELORMITTAL. **Balço Energético Global 2016 - ArcelorMittal Tubarão. 38º Seminário de Balços Energéticos Globais e Utilidades** Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), , 2017.

ARCELORMITTAL. **Climate Action Report 2**. [s.l.] ArcelorMittal Group, 2021.

ARCELORMITTAL. **Fact Book**. Luxemburgo: ArcelorMittal, 2022.

ARCELORMITTAL BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2021**. [s.l: s.n.].

ARENS, M.; ÅHMAN, M.; VOGL, V. **Which countries are prepared to green their coal-based steel industry with electricity? - Reviewing climate and energy policy as well as the implementation of renewable electricity. Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 1 jun. 2021.

ARZT, K. **Beginners Guide to Metal Casting. Metalworking 101: The Basics of Metalworking**, 2015.

ASTIER, J.; KRUG, J. C.; DE PRESSIGNY, Y. D. L. Technico-Economic Potentialities of Hydrogen Utilization for Steel Production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 7, n. 8, p. 671–679, 1982.

BABICH, A.; SENK, D. **Coke in the Iron and Steel Industry. New Trends in Coal Conversion: Combustion, Gasification, Emissions, and Coking**, 2019.

BAILERA, M. et al. **A review on CO2 mitigation in the Iron and Steel industry through Power to X processes. Journal of CO2 Utilization** Elsevier Ltd, , 1 abr. 2021.

BARARZADEH LEDARI, M. et al. Greening steel industry by hydrogen: Lessons learned for the developing world. **International Journal of Hydrogen Energy**, jun. 2023.

BATAILLE, C.; STIEBERT, S. P. E.; LI, F. G. N. **Global facility level net-zero steel pathways: technical report on the first scenarios of the Net-zero Steel Project**. IDDRI: Institute for Sustainable Development and International Relations, 2021.

BP P.L.C. **bp Statistical Review of World Energy**. , 2022.

CÂNDIDO, M. R. **Aplicação da transformada Wavelet na análise da qualidade de energia em fornos elétricos a arco**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.

CAPAZ, R. S. **Alternative aviation fuels in Brazil: Environmental performance and economic feasibility**. Tese de Doutorado—Campinas, São Paulo: UNICAMP, 2021.

CGEE. **TR 25 - Aciaria LD - Situação Atual e Tendência para 2025**. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

CGEE. **Siderurgia no Brasil 2010-2025**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos—Brasília, DF: Série Documentos Técnicos, nov. 2010.

CGEE. **Modernização da Produção de Carvão Vegetal no Brasil**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos—Brasília, DF: Subsídios para Revisão do Plano Siderurgia, 2015.

CHINA BAOWU STEEL GROUP. **Corporate Social Responsibility Report**. China: China Baowu Steel Group Corporation Limited, 2020.

CHOI, W.; KANG, S. Greenhouse gas reduction and economic cost of technologies using green hydrogen in the steel industry. **Journal of Environmental Management**, v. 335, 1 jun. 2023.

COSTA, A. R.; WAGNER, D.; PATISSON, F. Modelling a new, low CO2 emissions, hydrogen steelmaking process. **Journal of Cleaner Production**, v. 46, p. 27–35, 2013.

ECEMI. **Preço unitário do alcatrão**. Disponível em: <<https://www.echemi.com/pcp/high-temperature-coal-tar-pd2202071049.html>>. Acesso em: 2 dez. 2022.

ECOINVENT. **Ecoinvent database version 3.6**. Zurich, Switzerland, 2019. Disponível em: <<https://ecoinvent.org/>>. Acesso em: 1 fev. 2023

ELSHEIKH, H.; EVELOY, V. Assessment of variable solar- and grid electricity-driven power-to-hydrogen integration with direct iron ore reduction for low-carbon steel making. **Fuel**, v. 324, 15 set. 2022.

EPE. **Balço Energético Nacional 2022**. [s.l.] Empresa de Pesquisa Energética, 2022a.

EPE. **Produção e Consumo de Hidrogênio em Refinarias no Brasil**. [s.l.] Empresa de Pesquisa Energética, 2022b.

EPE. **Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural**. [s.l.] Empresa de Pesquisa Energética, 2022c.

EPE. **Matriz energética e Elétrica**. [s.l.] Empresa de Pesquisa Energética, 2022d.

ETC. **Mission Possible - Reaching Net-Zero Carbon Emission From Hard to Abate Sectors**. [s.l.] The Energy Transitions Commission, 2018.

EUROPEAN COMMISSION. **Delivering the European Green Deal**. European Union: [s.n.].

EUROPEAN PARLIAMENT. **Emissões de gases com efeito de estufa por país e setor (Infografia)**. [s.l.] European Union, 2023.

FAN, Z.; FRIEDMANN, S. J. **Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy**. JouleCell Press, , 21 abr. 2021.

FAO. **Forestry Production and Trade**. [s.l.] Food and Agriculture Organization of The United Nations, 2020.

FISCHEDICK, M. et al. Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, n. 1, p. 563–580, 2014.

GEERDES, M.; VLIET, C. VAN DER; TOXOPEUS, H. **Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction**. , 2004.

GERDAU S.A. **Relatório Anual 2021**. [s.l: s.n.].

GHOSH, A. China's decarbonization goals get boost from Baowu's carbon reduction plans. **S&P Global** , 2021.

GHOSH, A. M.; VASUDEVAN, N.; KUMAR, S. **Energy-Efficient Technology Options for Direct Reduction of Iron Process (Sponge Iron Plants)**. New Delhi: The Energy and Resources Institute (TERI), 2021.

GIELEN, D. CO₂ Removal in the Iron and Steel Industry. **Energy Conversion and Management**, v. 44, p. 1027–1037, 2003.

GIELEN, D.; MORIGUCHI, Y. Modelling CO₂ Policies for the Japanese Iron and Steel Industry. **Environmental Modelling & Software**, v. 17, p. 481–495, 2002a.

GIELEN, D.; MORIGUCHI, Y. CO₂ in the Iron and Steel Industry: An Analysis of Japanese Emission Reduction Potentials. **Energy Policy**, v. 30, p. 849–863, 2002b.

GRETZ, J.; KORF, W.; LYONS, R. Hydrogen in the Steel Industry. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 16, n. 10, p. 691–693, 1991.

GRUPO CSN. **Relato Integrado 2021**. [s.l.] Companhia Siderúrgica Nacional, 2021.

HEBEDA, O. et al. Pathways for deep decarbonization of the Brazilian iron and steel industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 401, p. 136675, maio 2023.

HYDROGEN EUROPE. **Hydrogen Enabling a Zero-Emission Society**. , 2021.

IAB. **A Indústria do Aço no Brasil**. Brasília: Instituto Aço Brasil, 2017.

IAB. **Brazil Steel Databook: Anuário estatístico 2022**. Brasília: Instituto Aço Brasil, 2022.

IBA. **Relatório Anual 2022**. São Paulo, SP: Indústria Brasileira de Árvores, 2022.

IEA. **The Future of Hydrogen**. IEA: International Energy Agency, 2019.

IEA. **Iron and Steel Technology Roadmap - Towards more sustainable steelmaking Part of the Energy Technology Perspectives series**. IEA: International Energy Agency, 2020a.

- IEA. **Energy Technology Perspectives 2020**. IEA: International Energy Agency, 2020b.
- IEA. **World Energy Outlook 2022**. IEA: International Energy Agency, 2022a.
- IEA. **Global Hydrogen Review 2022**. IEA: International Energy Agency, 2022b.
- IEA. **Hydrogen Projects Database**. IEA: International Energy Agency, 2022c.
- IEA. **Coal Market Update**. [s.l.] International Energy Agency, 2022d.
- IEA. **Direct CO₂ emissions from industry in the Net Zero Scenario, 2000-2030**. Chart Licenced CC BY 4.0—Paris: International Energy Agency, 2023a.
- IEA. **CO₂ Emissions in 2022**. IEA: International Energy Agency, mar. 2023b.
- INCS. **Mapa de Cotações**. Disponível em: <<https://incs.org.br/wp-content/uploads/2020/06/Mapa-de-Cota%C3%A7%C3%B5es.pdf>>. Acesso em: 2 dez. 2022.
- INFOMET. **Processo Siderúrgico**. , 2013.
- IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. [s.l.] Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.
- IPCC. **AR5 - Fifth Assessment Report**. UNEP - IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- IPCC. **Global Warming of 1.5°C**. UNEP - IPCC: International Panel on Climate Change , 2019.
- ISENMANN, A. **O processo do Alto-Forno e a Produção de Aço. Processos Industriais - Módulo Aço**, 2009.
- JAHANSHAH, S. et al. **Development of Low-Emission Integrated Steelmaking Process**. *Journal of Sustainable Metallurgy* Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, , 1 mar. 2015.
- JANKOV, I. R.; HAYASHI, N. N. **Soluções de Modernização de Sistemas de Controle de Poluição Atmosférica nas Plantas de Sinterização**. 45º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 16º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 3º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro—Rio de Janeiro, RJ: ABM WEEK, ago. 2015.
- JAYASEKARA, A. S. et al. Microalgae blending for sustainable metallurgical coke production – Impacts on coking behaviour and coke quality. *Fuel*, v. 344, 15 jul. 2023.
- JUNIOR, F. L. C. C. **“Caracterização Tecnológica de Misturas de ‘Sinter-feed’ e ‘Pellet-feed’ Empregando Diferentes Rotas de Sinterização em Escala Piloto”**. Dissertação de Mestrado—Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

JUNIOR, J. H. N. **Contribuição ao Estudo da Cinética de Redução de Briquetes Autorredutores**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro, RJ: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio, 2002.

KAZMI, B.; TAQVI, S. A. A.; JUCHELKOVÁ, D. State-of-the-art review on the steel decarbonization technologies based on process system engineering perspective. **Fuel**, v. 347, 1 set. 2023.

LANG, K.; AUER, B. R. **The economic and financial properties of crude oil: A review**. **North American Journal of Economics and Finance** Elsevier Inc., , 1 abr. 2020.

LI, F. et al. **Quantifying the Energy Saving Potential and Environmental Benefit of Hydrogen-Based Steelmaking Process: Status and Future Prospect** **Applied Thermal Engineering**. China: Elsevier Ltd, 5 jul. 2022.

LIZIERO, G. et al. **UTILIZAÇÃO DE FINOS DE CARVÃO VEGETAL PARA PRODUÇÃO DE BIOCOQUE METALÚRGICO***. 17º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro—ABM Week, Rio de Janeiro, RJ: 4º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 2016.

LU, L. **Quality requirements of iron ore for iron production** **Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability**. [s.l.] Elsevier, 2015.

MATSUMIYA, T. Steelmaking technology for a sustainable society. **Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry**, v. 35, n. 4, p. 627–635, dez. 2011.

MCTI. **Fator médio - Inventários corporativos**. [s.l.] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2022.

METI. **Green Growth Strategy Through Achieving Carbon Neutrality in 2050**. Japão: [s.n.].

MIDREX TECHNOLOGIES, I. **MIDREX NG: MIDREX Process Fueled by Natural Gas**. , 2022. Disponível em: <<https://www.midrex.com/technology/midrex-process/midrex-ng/>>. Acesso em: 17 maio. 2022

MONEYTIMES. **Preços do carvão metalúrgico e coque caem na China com mercado spot mais lento**. Disponível em: <<https://www.moneytimes.com.br/precos-do-carvao-metalurgico-e-coque-caem-na-china-com-mercado-spot-mais-lento>>. Acesso em: 2 dez. 2022.

MORRIS, A. E. **Iron Resources and Direct Iron Production**. California, USA: Pergamon, , 2001. (Nota técnica).

MOURÃO, J. M. Aspectos Conceituais Relativos à Pelotização de Minérios de Ferro. jan. 2017.

MOURÃO, M. B. et al. Introdução à siderurgia. p. 428, 2007.

MPP. **Making Net-Zero Steel Possible**. [s.l.] Mission Possible Partnership, 2022.

NIPPON STEEL CORPORATION. **Sustainability Report**. Japão: Nippon Steel Corporation, 2022a.

NIPPON STEEL CORPORATION. **Integrated Report**. Japão: Nippon Steel Corporation, 2022b.

NLMK GROUP. **Annual Report**. Rússia: NLMK Group, 2021.

NUCOR CORPORATION. **Corporate Social Responsibility**. EUA: Nucor Corporation, 2022.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Brasil 2045 - Construindo uma potência ambiental**. Brasil: Propostas para a Política Ambiental Brasileira em 2023–2024, 2022.

OLIVEIRA, A. C. et al. **Otimização da Produção do Carvão Vegetal por meio do Controle de Temperaturas de Carbonização**. Viçosa-MG: Revista Árvore, 2013.

OLIVEIRA, R. C. DE. **TD 2787 - Panorama do Hidrogênio no Brasil. Texto para Discussão**, 4 ago. 2022. Disponível em: <https://portalantigo.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/2787_218762_td_2787_web.pdf>

OLIVEIRA, G. C. **A FORMAÇÃO DE PREÇOS DE COMMODITIES E O PROCESSO DE FINANCEIRIZAÇÃO DO SETOR**. Trabalho de Conclusão de Curso—Uberlândia, MG: UFU - Universidade Federam de Uberlândia, 2020.

OUR WORLD IN DATA. **Per capita electricity generation by source, 2022. Ember’s Yearly Electricity Data; Ember’s European Electricity Review; Energy Institute Statistical Review of World Energy**, 2022. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-electricity-source-stacked?stackMode=relative&facet=none&country=OWID_WRL~CHN~IND~USA~JPN~DEU~GBR~BRA~FRA~CAN~SWE~ZAF~AUS>. Acesso em: 12 ago. 2023

OYAK GROUP. **Integrated Annual Report 2022**. Metallurgy—Istanbul: OYAK Group Companies, 2022.

PARDO, N.; MOYA, J. A. Prospective scenarios on energy efficiency and CO₂ emissions in the European Iron & Steel industry. **Energy**, v. 54, p. 113–128, 1 jun. 2013.

PARIS AGREEMENT PARTIES. **Nationally Determined Contributions Registry (NDC Registry)**. [s.l.] United Nations, 2023.

PÉREZ-FORTES, M. et al. **CO₂ capture and utilization in cement and iron and steel industries**. Energy Procedia. **Anais...Elsevier Ltd**, 2014.

PETRII, O. A. **CHEMISTRY, ELECTROCHEMISTRY, AND ELECTROCHEMICAL APPLICATIONS | Hydrogen**. Moscow, Russia: Elsevier Science, , 2009. (Nota técnica).

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008**. (LTC, Ed.)Rio de Janeiro, RJ, 2009.

POSCO GROUP. **POSCO's Dialogue for Climate Action**. [s.l: s.n.].

POSCO GROUP. **Corporate Citizenship Report**. Coreia do Sul: Posco Holdings Corporation Limited, 2021.

RAHMATMAND, B. et al. **A technical review on coke rate and quality in low-carbon blast furnace ironmaking**. **Fuel**Elsevier Ltd, , 15 mar. 2023.

REMUS, R. et al. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. **Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)**. Joint Research Centre Reference Report, 2013.

REN, L. et al. **A review of CO₂ emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**Elsevier Ltd, , 1 jun. 2021.

RODRIGUES, G. F. **Estudo da Redução de Pelotas de Minérios de Ferro por Hidrogênio e Mistura de Hidrogênio com Monóxido de Carbono**. Tese de Doutorado—São Paulo, SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, 7 maio 2014.

SAFARIAN, S. **To what extent could biochar replace coal and coke in steel industries?** **Fuel**Elsevier Ltd, , 1 maio 2023.

SALCOS. **GrInHy2.0: Green Industrial Hydrogen**. , 2021a. Disponível em: <<https://salcos.salzgitter-ag.com/en/grinhy-20.html>>. Acesso em: 3 nov. 2022

SALCOS. **WindH2**. , 2021b. Disponível em: <<https://salcos.salzgitter-ag.com/en/windh2.html>>. Acesso em: 3 nov. 2022

SANTOS, M. M. DE O. **Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**. Projeto BRA/16/G31—Brasil: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2020.

SEGUINEAUD, C. **Assessing Steel Decarbonisation Progress Ready for the Decade of Delivery?** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.oecd.org>>. Acesso em: 7 abr. 2023.

SERRAMETAL. **Lingotamento Convencional**. , 2022.

SHAHABUDDIN, M.; BROOKS, G.; RHAMDHANI, M. A. **Decarbonisation and hydrogen integration of steel industries: Recent development, challenges and technoeconomic analysis**. *Journal of Cleaner Production* Elsevier Ltd, , 1 abr. 2023.

SILVA, N. S. G. DA et al. **Evolução da Produção de Carvão Vegetal do Brasil**. : IV Congresso Internacional das Ciências Agrárias, 2019.

SILVA, J. N. S. **Siderurgia**. Sistema Escola Técnica Aberta do Brasil – e-tec Brasil— Belém, PA: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA/Belém e Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, 2011.

SINDIFER. **Anuário Estatístico**. [s.l.] Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais, 2022.

SINGH, R. **Production of steel**. *Applied Welding Engineering*, 2020.

SSAB; LKAB; VATTENFALL. **HYBRIT: Fossil-Free Steel**. , 2021. Disponível em: <<https://www.hybritdevelopment.se/en/research-project-1/>>. Acesso em: 3 nov. 2022

STATISTA. **Distribution of global iron ore exports in 2022, by major country**. *Mining, Metals & Minerals*, 2022. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/300328/top-exporting-countries-of-iron-ore/>>. Acesso em: 12 ago. 2023

SUER, J.; TRAVERSO, M.; AHRENHOLD, F. Carbon footprint of scenarios towards climate-neutral steel according to ISO 14067. *Journal of Cleaner Production*, v. 318, 10 out. 2021.

TATA STEEL GROUP. **Integrated Report and Annual Accounts**. Índia: Tata Steel Limited, 2022.

TENOVA AND DANIELI. **Energiron (HYL) ZR**. , 2022. Disponível em: <<https://www.energiron.com/energiron-zr/>>. Acesso em: 17 maio. 2022

TERNIUM. **Sustainability Report 2021**. [s.l.] Ternium, 2021.

THYSSENKRUPP. **Annual Report**. Alemanha: Thyssenkrupp, 2022.

TRADING ECONOMICS. **Média do preço do aço do histórico de março/2009 a maio/2023**. Disponível em: <<https://pt.tradingeconomics.com/commodity/steel>>. Acesso em: 10 maio. 2023.

UNEP. **UNEP: 50 years of Environmental Milestones**. [s.l.] The United Nations Environment Programme, 2022.

UNFCCC. **Adoption of the Paris Agreement**. Conference of the Parties—Paris, França: United Nations, 2016.

UNIGEL. **Unigel fecha contrato com a thyssenkrupp nucera e investe US\$ 120 milhões na primeira fábrica de hidrogênio verde do Brasil**. , 2022. Disponível em: <<https://www.unigel.com.br/unigel-fecha-contrato-com-a-thyssenkrupp-nucera-e-investe-us-120-milhoes-na-primeira-fabrica-de-hidrogenio-verde-do-brasil/>>. Acesso em: 3 nov. 2022

UNITED NATIONS. The United Nations Climate Change Conference. nov. 2021.

USIMINAS. **Relatório de Sustentabilidade 2021**. [s.l.] Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A, 2021.

VERBUND. **H2FUTURE Green Hydrogen**. , 2017. Disponível em: <<https://www.h2future-project.eu/>>. Acesso em: 3 nov. 2022

VIEIRA, L. A. et al. **Utilização dos Gases da Carbonização da Madeira Proveniente de um Forno Industrial por Micro-ondas para Obtenção de Energia Elétrica**. Uberaba-MG: II Encontro de Desenvolvimento de Processos Agroindustriais, 2018.

VOGL, V.; ÅHMAN, M.; NILSSON, L. J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, p. 736–745, 1 dez. 2018.

WANG, K. et al. Numerical study of natural gas and pulverized coal co-injection into an ironmaking blast furnace. **Applied Thermal Engineering**, v. 230, 25 jul. 2023.

WICH-KONRAD, T. et al. Assessment of Industrial Greenhouse Gas Reduction Strategies Within Consistent System Boundaries. **Chemie-Ingenieur-Technik**, v. 92, n. 10, p. 1393–1402, 1 out. 2020.

WRI; WBCSD. **Greenhouse Gas Protocol**. Organization—USA and SWITZERLAND: World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2023.

WSA. **World Steel in Figures 2022**. Bruxelas Bélgica: World Steel Association, 2022a.

WSA. **Sustainability Indicators 2022 Report**. [s.l.] World Steel Association, 2022b.

YILMAZ, C.; WENDELSTORF, J.; TUREK, T. Modeling and simulation of hydrogen injection into a blast furnace to reduce carbon dioxide emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 154, p. 488–501, 15 jun. 2017.

ZANG, G. et al. Cost and Life Cycle Analysis for Deep CO₂ Emissions Reduction for Steel Making: Direct Reduced Iron Technologies. **Steel Research International**, v. 94, n. 6, 1 jun. 2023.

ZHANG, C. et al. Blast furnace hydrogen-rich metallurgy-research on efficiency injection of natural gas and pulverized coal. **Fuel**, v. 311, 1 mar. 2022.

ZHANG, X. et al. **A review on low carbon emissions projects of steel industry in the World. Journal of Cleaner Production** Elsevier Ltd, , 15 jul. 2021.

ANEXO A – Tabela de extração do poder calorífico dos combustíveis utilizados para o cálculo da pegada de carbono dos cenários deste trabalho (IPCC, 2006)

TABLE 1.2 DEFAULT NET CALORIFIC VALUES (NCVs) AND LOWER AND UPPER LIMITS OF THE 95% CONFIDENCE INTERVALS ¹				
Fuel type English description		Net calorific value (TJ/Gg)	Lower	Upper
Crude Oil		42.3	40.1	44.8
Orimulsion		27.5	27.5	28.3
Natural Gas Liquids		44.2	40.9	46.9
Gasoline	Motor Gasoline	44.3	42.5	44.8
	Aviation Gasoline	44.3	42.5	44.8
	Jet Gasoline	44.3	42.5	44.8
Jet Kerosene		44.1	42.0	45.0
Other Kerosene		43.8	42.4	45.2
Shale Oil		38.1	32.1	45.2
Gas/Diesel Oil		43.0	41.4	43.3
Residual Fuel Oil		40.4	39.8	41.7
Liquefied Petroleum Gases		47.3	44.8	52.2
Ethane		46.4	44.9	48.8
Naphtha		44.5	41.8	46.5
Bitumen		40.2	33.5	41.2
Lubricants		40.2	33.5	42.3
Petroleum Coke		32.5	29.7	41.9
Refinery Feedstocks		43.0	36.3	46.4
Other Oil	Refinery Gas ²	49.5	47.5	50.6
	Paraffin Waxes	40.2	33.7	48.2
	White Spirit and SBP	40.2	33.7	48.2
	Other Petroleum Products	40.2	33.7	48.2
Anthracite		26.7	21.6	32.2
Coking Coal		28.2	24.0	31.0
Other Bituminous Coal		25.8	19.9	30.5
Sub-Bituminous Coal		18.9	11.5	26.0
Lignite		11.9	5.50	21.6
Oil Shale and Tar Sands		8.9	7.1	11.1
Brown Coal Briquettes		20.7	15.1	32.0
Patent Fuel		20.7	15.1	32.0
Coke	Coke Oven Coke and Lignite Coke	28.2	25.1	30.2
	Gas Coke	28.2	25.1	30.2
Coal Tar ³		28.0	14.1	55.0
Derived Gases	Gas Works Gas ⁴	38.7	19.6	77.0
	Coke Oven Gas ⁵	38.7	19.6	77.0
	Blast Furnace Gas ⁶	2.47	1.20	5.00
	Oxygen Steel Furnace Gas ⁷	7.06	3.80	15.0
Natural Gas		48.0	46.5	50.4
Municipal Wastes (non-biomass fraction)		10	7	18
Industrial Wastes		NA	NA	NA
Waste Oil ⁸		40.2	20.3	80.0
Peat		9.76	7.80	12.5

TABLE 1.2 (CONTINUED)				
DEFAULT NET CALORIFIC VALUES (NCVs) AND LOWER AND UPPER LIMITS OF THE 95% CONFIDENCE INTERVALS ¹				
Fuel type English description		Net calorific value (TJ/Gg)	Lower	Upper
Solid Biofuels	Wood/Wood Waste ⁹	15.6	7.90	31.0
	Sulphite lyes (black liquor) ¹⁰	11.8	5.90	23.0
	Other Primary Solid Biomass ¹¹	11.6	5.90	23.0
	Charcoal ¹²	29.5	14.9	58.0
Liquid Biofuels	Biogasoline ¹³	27.0	13.6	54.0
	Biodiesels ¹⁴	27.0	13.6	54.0
	Other Liquid Biofuels ¹⁵	27.4	13.8	54.0
Gas Biomass	Landfill Gas ¹⁶	50.4	25.4	100
	Sludge Gas ¹⁷	50.4	25.4	100
	Other Biogas ¹⁸	50.4	25.4	100
Other non-fossil fuels	Municipal Wastes (biomass fraction)	11.6	6.80	18.0
<p>Notes:</p> <p>¹ The lower and upper limits of the 95 percent confidence intervals, assuming lognormal distributions, fitted to a dataset, based on national inventory reports, IEA data and available national data. A more detailed description is given in section 1.5.</p> <p>² Japanese data; uncertainty range: expert judgement</p> <p>³ EFDB; uncertainty range: expert judgement</p> <p>⁴ Coke Oven Gas; uncertainty range: expert judgement</p> <p>^{5,7} Japan and UK small number data; uncertainty range: expert judgement</p> <p>⁸ For waste oils the values of "Lubricants" are taken</p> <p>⁹ EFDB; uncertainty range: expert judgement</p> <p>¹⁰ Japanese data ; uncertainty range: expert judgement</p> <p>¹¹ Solid Biomass; uncertainty range: expert judgement</p> <p>¹² EFDB; uncertainty range: expert judgement</p> <p>¹³⁻¹⁴ Ethanol theoretical number; uncertainty range: expert judgement;</p> <p>¹⁵ Liquid Biomass; uncertainty range: expert judgement</p> <p>¹⁶⁻¹⁸ Methane theoretical number uncertainty range: expert judgement;</p>				

ANEXO B – Tabela de extração dos fatores de emissão relacionados à combustão dos combustíveis utilizados para o cálculo da pegada de carbono dos cenários deste trabalho (IPCC, 2006)

TABLE 2.3 DEFAULT EMISSION FACTORS FOR STATIONARY COMBUSTION IN <u>MANUFACTURING INDUSTRIES AND CONSTRUCTION</u> (kg of greenhouse gas per TJ on a Net Calorific Basis)										
Fuel	CO ₂			CH ₄			N ₂ O			
	Default Emission Factor	Lower	Upper	Default Emission Factor	Lower	Upper	Default Emission Factor	Lower	Upper	
Crude Oil	73 300	71 100	75 500	r 3	1	10	0.6	0.2	2	
Orimulsion	r 77 000	69 300	85 400	r 3	1	10	0.6	0.2	2	
Natural Gas Liquids	r 64 200	58 300	70 400	r 3	1	10	0.6	0.2	2	
Gasoline	Motor Gasoline	r 69 300	67 500	73 000	r 3	1	10	0.6	0.2	2
	Aviation Gasoline	r 70 000	67 500	73 000	r 3	1	10	0.6	0.2	2
	Jet Gasoline	r 70 000	67 500	73 000	r 3	1	10	0.6	0.2	2
Jet Kerosene	71 500	69 700	74 400	r 3	1	10	0.6	0.2	2	
Other Kerosene	71 900	70 800	73 700	r 3	1	10	0.6	0.2	2	
Shale Oil	73 300	67 800	79 200	r 3	1	10	0.6	0.2	2	
Gas/Diesel Oil	74 100	72 600	74 800	r 3	1	10	0.6	0.2	2	
Residual Fuel Oil	77 400	75 500	78 800	r 3	1	10	0.6	0.2	2	
Liquefied Petroleum Gases	63 100	61 600	65 600	r 1	0.3	3	0.1	0.03	0.3	
Ethane	61 600	56 500	68 600	r 1	0.3	3	0.1	0.03	0.3	
Naphtha	73 300	69 300	76 300	r 3	1	10	0.6	0.2	2	
Bitumen	80 700	73 000	89 900	r 3	1	10	0.6	0.2	2	
Lubricants	73 300	71 900	75 200	r 3	1	10	0.6	0.2	2	
Petroleum Coke	r 97 500	82 900	115 000	r 3	1	10	0.6	0.2	2	
Refinery Feedstocks	73 300	68 900	76 600	r 3	1	10	0.6	0.2	2	
Other Oil	Refinery Gas	n 57 600	48 200	69 000	r 1	0.3	3	0.1	0.03	0.3
	Paraffin Waxes	73 300	72 200	74 400	r 3	1	10	0.6	0.2	2
	White Spirit and SBP	73 300	72 200	74 400	r 3	1	10	0.6	0.2	2
	Other Petroleum Products	73 300	72 200	74 400	r 3	1	10	0.6	0.2	2
Anthracite	98 300	94 600	101 000	10	3	30	r 1.5	0.5	5	
Coking Coal	94 600	87 300	101 000	10	3	30	r 1.5	0.5	5	
Other Bituminous Coal	94 600	89 500	99 700	10	3	30	r 1.5	0.5	5	
Sub-Bituminous Coal	96 100	92 800	100 000	10	3	30	r 1.5	0.5	5	
Lignite	101 000	90 900	115 000	10	3	30	r 1.5	0.5	5	
Oil Shale and Tar Sands	107 000	90 200	125 000	10	3	30	r 1.5	0.5	5	
Brown Coal Briquettes	n 97 500	87 300	109 000	n 10	3	30	n 1.5	0.5	5	
Patent Fuel	97 500	87 300	109 000	10	3	30	r 1.5	0.5	5	
Coke	Coke Oven Coke and Lignite Coke	r 107 000	95 700	119 000	10	3	30	r 1.5	0.5	5
	Gas Coke	r 107 000	95 700	119 000	r 1	0.3	3	0.1	0.03	0.3
Coal Tar	n 80 700	68 200	95 300	n 10	3	30	n 1.5	0.5	5	
Derived Gases	Gas Works Gas	n 44 400	37 300	54 100	r 1	0.3	3	0.1	0.03	0.3
	Coke Oven Gas	n 44 400	37 300	54 100	r 1	0.3	3	0.1	0.03	0.3
	Blast Furnace Gas	n260 000	219 000	308 000	r 1	0.3	3	0.1	0.03	0.3
	Oxygen Steel Furnace Gas	n 182 000	145 000	202 000	r 1	0.3	3	0.1	0.03	0.3
Natural Gas	56 100	54 300	58 300	r 1	0.3	3	0.1	0.03	0.3	

TABLE 2.3 (CONTINUED)
DEFAULT EMISSION FACTORS FOR STATIONARY COMBUSTION IN MANUFACTURING INDUSTRIES AND CONSTRUCTION
(kg of greenhouse gas per TJ on a Net Calorific Basis)

Fuel	CO ₂			CH ₄			N ₂ O			
	Default Emission Factor	Lower	Upper	Default Emission Factor	Lower	Upper	Default Emission Factor	Lower	Upper	
Municipal Wastes (non-biomass fraction)	n 91 700	73 300	121 000	30	10	100	4	1.5	15	
Industrial Wastes	n143 000	110 000	183 000	30	10	100	4	1.5	15	
Waste Oils	n 73 300	72 200	74 400	30	10	100	4	1.5	15	
Peat	106 000	100 000	108 000	n 2	0.6	6	n 1.5	0.5	5	
Solid Biofuels	Wood / Wood Waste	n 112 000	95 000	132 000	30	10	100	4	1.5	15
	Sulphite lyes (Black Liquor) ^a	n 95 300	80 700	110 000	n 3	1	18	n 2	1	21
	Other Primary Solid Biomass	n 100 000	84 700	117 000	30	10	100	4	1.5	15
	Charcoal	n 112 000	95 000	132 000	200	70	600	4	1.5	15
Liquid Biofuels	Biogasoline	n 70 800	59 800	84 300	r 3	1	10	0.6	0.2	2
	Biodiesels	n 70 800	59 800	84 300	r 3	1	10	0.6	0.2	2
	Other Liquid Biofuels	n 79 600	67 100	95 300	r 3	1	10	0.6	0.2	2
Gas Biomass	Landfill Gas	n 54 600	46 200	66 000	r 1	0.3	3	0.1	0.03	0.3
	Sludge Gas	n 54 600	46 200	66 000	r 1	0.3	3	0.1	0.03	0.3
	Other Biogas	n 54 600	46 200	66 000	r 1	0.3	3	0.1	0.03	0.3
Other non-fossil Fuels	Municipal Wastes (biomass fraction)	n100 000	84 700	117 000	30	10	100	4	1.5	15

(a) Includes the biomass-derived CO₂ emitted from the black liquor combustion unit and the biomass-derived CO₂ emitted from the kraft mill lime kiln.
n indicates a new emission factor which was not present in the 1996 Guidelines
r indicates an emission factor that has been revised since the 1996 Guidelines

ANEXO C – Tabelas de conversão de energia para unidade dos insumos utilizados para cálculo da pegada de carbono do cenário 1 (ARCELORMITTAL, 2017)

	Fontes Energéticas	Unidade	Gcal/unid.	GJ/unid.
COMBUSTÍVEIS	Carvão vegetal	t	7,0000000	29,3076000
	Carvão Met. Importado	t	7,6000000	31,8196800
	Carvão PCI	t	6,5000000	27,2142000
	Antracito	t	6,5000000	27,2142000
	Coque Grosso	t	6,9000000	28,8889200
	Moinha de Coque (finos)	t	6,5000000	27,2142000
	Pó de CDQ	t	6,5000000	27,2142000
	Alcatrão / Antraceno	t	8,8000000	36,8438400
	Gás de Coqueria	Ndam ³	4,3856200	18,3617138
	Gás de Alto Forno	Ndam ³	0,8296460	3,4735619
	Gás de Aciaria	Ndam ³	2,0287800	8,4940961
	GLP	t	12,0000000	50,2416000
	Gás Natural	Ndam ³	8,9000000	37,2625200
	Óleo combustivel	t	10,0000000	41,8680000
	Óleo Diesel	m ³	9,1910000	38,4808788
	Querosene	m ³	9,1910000	38,4808788
	Gasolina	m ³	8,2880000	34,7001984
	Álcool	m ³	5,3800000	22,5249840

	UTILIDADES	Unidade	Gcal/unid.	GJ/unid.
UTILIDADES	Água Bruta	dam ³	0,0000000	0,0000000
	Água Clarificada	dam ³	0,5126307	2,1462822
	Água Potável	dam ³	1,0746502	4,4993455
	Água Recirculada	dam ³	0,0000000	0,0000000
	Água Desmineralizada	dam ³	1,9777271	8,2803478
	Água do Mar	dam ³	0,3623191	1,5169576
	Energia Elétrica	MWh	2,5000000	10,4670000
	Ar Comprimido	Ndam ³	0,3207950	1,3431045
	Oxigênio	Ndam ³	1,3331023	5,5814327
	Nitrogênio	Ndam ³	1,3331023	5,5814327
	Argônio	Ndam ³	1,3331023	5,5814327
	Vapor B. Pressão	t	0,6780000	2,8386504
	Vapor A. Pressão	t	0,7596483	3,1804955
	Ar Soprado AF 1 e 3 e FOX 5	Ndam ³	0,2310759	0,9674686
	Ar Soprado AF2 e FOX 4	Ndam ³	0,2447155	1,0245749
	MP	Gusa Sólido	t	2,4979158
Sucata Comprada		t	2,4979158	10,4582739
Vapor SOL Coqueria		t	0,7596483	3,1804955

ANEXO D – Balanço global de energia dos dados utilizados para cálculo da pegada de carbono do cenário 1 (ARCELORMITTAL, 2017)

Produção de Aço Bruto: 7.033.753		MJ / t (placas)										Total	Balanço	%		
Funções ou Unidades Industriais	Produção (t)	Combustíveis Secundários			Utilidades			O2+N2+Ar	Vapor	E.E.	Águas	Ar	Total	Balanço	%	
		Carvão	Coque	Petróleo	Alcool	Ar	Águas									O2+N2+Ar
COQUERIA	1.361.162	8.124,8	697,0	23,9	12,9	12,3	270,5	51,0	-437,1				9.192	1.277	16,7%	5,86%
			-5.556,0	-1.922,3									-7.915			
SOL COQUERIA	1.579.156	9.939,8	-8.445,8	115,3					-1.857,6				10.055	1.752	18,2%	8,04%
				0,0									-8.303			
SINTERIZAÇÃO	5.233.947	201,7	856,9	36,4				4,6					1.459	1.459	2,6%	6,70%
													0			
ALTO FORNO 1	3.489.345	2.512,1	4.219,1	940,1	10,7			289,5					8.626	5.849	15,6%	26,84%
			-2.582,7	-194,2									-2.777			
ALTO FORNO 2	1.233.080	960,4	1.448,7	786,0	0,3			99,7					3.520	2.591	6,4%	11,89%
			-928,7										-929			
ALTO FORNO 3	2.736.839	1.854,2	3.897,0	620,8	9,0			218,1					6.969	4.988	12,7%	22,89%
			-2.010,6										-2.011			
ACIARIA	7.194.156		139,8	74,3				480,4					1.286	258	2,3%	1,18%
			-1.027,7										-1.028			
CONDICIONAMENTO	2.918.558				2,6								60	60	0,1%	0,27%
													0			
LTO	3.998.412		742,6	4,9									1.267	1.267	2,3%	5,81%
													0			
OUTROS			19,0	163,2				102,9					390	390	0,7%	1,76%
													0			
SIST. ENERGIA			3.460,7	0,3				14,6					10.747	377	18,5%	1,73%
													-10.370			
PERDAS			814,8					64,4					1.522	1.522	2,8%	6,99%
													0			
TOTAIS		23.672,9	10.221,7	8.256,9	255,4			1.325,1					55.123,7	21.791	100,0%	100,00%
			-12.001,9	-8.471,9				-1.349,3					-33.332,5			
BALANÇO			-1.780,2	-215,1	255,4			-24,1					23.928,4	21.791		
													-2.137,1			

ANEXO E - Tabela de conversão de energia para unidade dos insumos utilizados para cálculo da pegada de carbono do cenário 2 (APERAM, 2016)

COMBUSTÍVEIS	UNIDADE	GJ/unidade	FONTE
Coque	t	30,135	Padrão ArcelorMittal (CTO-EN-ST-002.00)
Carvão Vegetal	t	29,000	ArcelorMittal Timóteo
Finos de Carvão Vegetal	t	25,000	ArcelorMittal Timóteo
Gás de Alto-forno	Ndam ³	3,708	Aperam Timóteo (2015)
Gás de F.E.R.	Ndam ³	9,200	ArcelorMittal Timóteo
Óleo Combustível	t	39,845	Padrão ArcelorMittal (CTO-EN-ST-002.00)
Óleo Diesel	t	41,982	Padrão ArcelorMittal (CTO-EN-ST-002.00)
GLP	t	46,030	Padrão ArcelorMittal (CTO-EN-ST-002.00)
Gás Natural	Ndam ³	38,669	Aperam Timóteo (2015) - Gasmig

ANEXO F - Balanço global de energia dos dados utilizados para cálculo da pegada de carbono do cenário 2 (APERAM, 2016)

PRODUÇÃO BRUTA : 709.130 ton/ano		UTILIDADES										TOTAL
FUNÇÃO OU UNIDADE INDUSTRIAL	PRODUÇÃO ANUAL (ton)	COMBUSTÍVEIS					UTILIDADES					TOTAL
		REDUTORES	SECUNDÁRIOS	PETRÓLEO	GÁS NATURAL	ENERGIA ELÉTRICA	ÁGUAS	AR COMPRIMIDO	O ₂ + N ₂ + Ar	HIDROGÊNIO	VAPOR	
1- Altos-fornos	471.258	12.342,1	1.438,4 (4.146,7)	3,2	62,6	892,6	149,0	71,0	154,5		23,2	15.136,5 (4.146,7)
2- F.E.R.	-	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0	0,0			0,0
3- Aciaria AODL	382.548	428,8	0,0	55,0	79,2	1.910,9	51,0	0,0	555,8		169,8	3.250,4
4- Aciaria MRPL	326.582	13,4	54,7	49,4	379,6	868,9	58,9	0,0	221,8		169,8	1.816,4
5- Lingotamento Contínuo	709.130			36,4		140,1	33,0	87,2	2,7			299,4
6- Laminação a Quente - Tiras	751.801		389,3	0,0	1.739,2	1.034,1	116,0	28,2	160,6		26,1	3.493,6
7- Laminação a Frio - Inox	336.894		284,7	7,0	1.052,7	1.465,9	42,4	103,3	84,1		4,1	3.257,0
8- Laminação a Frio - Silício	163.055		290,5	6,9	265,8	2.003,2	48,9	57,1	48,2		115,7	3.018,2
9- Outros			87,5	100,6	2,8	150,4	30,4	28,8	17,5		141,1	559,0
10- Perdas			562,7				9,8	0,0			217,7	780,4
11- Sistemas de Energia			1.038,9	242,0	151,6	971,8	(539,4)	(375,6)			0,0	2.414,0
TOTAL	Consumo	12.784,3	4.146,7	500,5	3.733,5	9.437,9	539,4	375,6	1.245,2	119,8	1.142,1	34.024,9
	(Produção)		(4.146,7)				(539,4)	(375,6)			(1.142,1)	(6.203,8)
Balanço		12.784,3	0,0	500,5	3.733,5	9.437,9	(0,0)	(0,0)	1.245,2	119,8	0,0	27.821,1
% Consumo Total		37,6%	12,2%	1,5%	11,0%	27,7%	1,6%	1,1%	3,7%	0,4%	3,4%	100,0%