

**BEATRIZ NASSIF**

**ANÁLISE DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> NA SUBSTITUIÇÃO DE UM ALTO-FORNO DE  
UMA USINA INTEGRADA POR UM FORNO A ARCO ELÉTRICO**

**São Paulo  
2022**

**BEATRIZ NASSIF**

**ANÁLISE DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> NA SUBSTITUIÇÃO DE UM ALTO-FORNO DE  
UMA USINA INTEGRADA POR UM FORNO A ARCO ELÉTRICO**

Trabalho de Formatura em Engenharia  
Metalúrgica do curso de graduação do  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e  
de Materiais da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Breda Mourão

**São Paulo**

**2022**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Eu, Marcelo Breda Mourão, orientador desse trabalho, autorizo a publicação deste trabalho na biblioteca da USP, para fins de divulgação científica



Nassif, Beatriz

Análise das emissões de CO<sub>2</sub> na substituição de um alto-forno de uma usina integrada por um forno a arco elétrico / B. Nassif -- São Paulo, 2022.  
69 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Emissões de CO<sub>2</sub> 2.Usina integrada a coque 3.Forno a arco elétrico  
4.Ferro-esponja 5.Hidrogênio verde I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

Catalogação-na-publicação

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer meus pais, Renata e Luís, por sempre me incentivarem e me apoiarem durante minha graduação. Agradeço por todo amor, carinho e suporte minhas irmãs e sobrinhas: Dora, Mariana, Luiza, Clara e a pequena Catarina; avô e tios: Sebastiana, Marcelo e Inácia; e os companheiros dos meus pais, Eugênia e Luciano. Um agradecimento especial à minha tia Marina e avô Eduardo, que sempre se orgulharam de mim durante minha trajetória e que estarão para sempre em meu coração.

Agradeço meu namorado, Rodrigo, meus colegas de gestão do Centro Moraes Rêgo: Camila, Mariana, André, Gustavo e Danilo. Agradeço também os amigos que fiz durante minha trajetória do CMR: Renan, Paulo, Caio, Isabela, Guy, Kadota, Fábio, Madruga, Fanta, Júlia, Trindade, Panqueca, Benito, Lucão e Zagatti. Também não posso deixar de mencionar os amigos que fiz no colégio: Giulia, Matheus e Catarina, e amigas que fiz ao longo da faculdade: Carolinas, Sofias, Deborah e Lissa.

Por todo o apoio na realização desse trabalho, agradeço o meu orientador, Professor Marcelo Mourão, e colegas de trabalho, em especial Fernando Salina e José Noldin. Agradeço também colegas da CSN Energia pelo apoio na condução do trabalho em paralelo com o estágio. Estendo meus agradecimentos a todos os professores e funcionários do PMT, essenciais na minha formação.

## **Resumo**

Neste trabalho, foram calculadas as emissões de CO<sub>2</sub> de uma Usina Integrada a coque, possuindo alto-forno e conversores Linz-Donawitz, com base em dados reais, e as compara com um cenário hipotético, onde 40% de sua produção de aço é substituída pela rota do forno a arco elétrico, em dois casos: um com ferro-esponja reduzido a hidrogênio verde, e outro com a sucata. A metodologia adotada para realizar esses cálculos foi criada pela *World Steel Association*, e é representada por meio de uma planilha fornecida em seu site, que calcula o balanço de massa da Usina e retorna a intensidade de emissão em tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub>. Essa metodologia é usada por várias empresas do setor. Para a determinação do consumo dos insumos nos cenários hipotéticos, foram utilizados dados de literatura para realizar uma estimativa. As emissões pela rota tradicional foram de 2,30 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub>, as pela rota DRI-FEA foram 1,60 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub> e as pela rota sucata-FEA foram 1,58 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub>. Também foi feita uma breve análise das implicações desses cenários na infraestrutura da usina

## **Abstract**

In this paper, CO<sub>2</sub> emissions from steel production on an integrated steel plant with use of coke, containing blast furnaces and Linz-Donawitz converters were calculated based on real data, and compared with a hypothetic scenario, where 40% of its production is replaced by electric air furnace route, in two cases: one where Direct Reduced Iron (DRI) by green hydrogen was used, and the other with scrap. The methodology adopted for these calculations was created by World Steel Association and is represented by a spreadsheet provided on its website, which calculates the steel plant's mass balance and returns the CO<sub>2</sub> emission intensity, in tCO<sub>2</sub>/t<sub>steel</sub>. This methodology is used by many companies in the steel industry. To determine the consumption of the inputs on the hypothetic scenarios, data from literature was used to make an estimation. The emissions on the traditional route were 2,30 tCO<sub>2</sub>/t<sub>steel</sub>, on DRI-EAF route was 1,60 tCO<sub>2</sub>/t<sub>steel</sub> and on scrap-EAF route was 1,58 tCO<sub>2</sub>/t<sub>steel</sub>. A brief analysis of the implications of these scenarios on the steel plant's infrastructure was also made.

## **Lista de Figuras**

Figura 1 - Emissões de CO <sub>2</sub> na rota Alto-Forno - Conversor LD [18] .....	15
Figura 2 - Comparação entre rotas BF-BOF e FEA [22].....	17
Figura 3 - Rota sucata-EAF vs. Rota DRI-EAF [6].....	19
Figura 4 - Injeção de carbono e oxigênio no FEA [22].....	21
Figura 5 - Carcaça de um forno elétrico [21].....	22
Figura 6 - Esquema simplificado do FEA [21].....	23
Figura 7 - Produção de DRI por processo em 2021 [7].....	26
Figura 8 - Demanda de Hidrogênio na Indústria, 2020 [34] .....	28
Figura 9 - Fontes de produção de hidrogênio, 2020 [34] .....	29
Figura 10 - Produção global de hidrogênio nos cenários APS e NZE [34] .....	30
Figura 11 - Preço de produção do aço vs. Preço da energia elétrica para o ferro-esponja via GN e H <sub>2</sub> [34] .....	32
Figura 12 - Transição Midrex para a Economia de Hidrogênio [36].....	33
Figura 13 - Capacidade instalada de energia elétrica no Brasil por fonte (%) [38]	
.....	36
Figura 14 - Metodologia de cálculo de emissões de CO <sub>2</sub> – adaptado [42] .....	40
Figura 15 - Site data planilha WSA.....	41
Figura 16 - Fatores de conversão .....	41
Figura 17 - Resultados dos cálculos .....	42
Figura 18 - Resultados de emissão de CO <sub>2</sub> - Cenário Atual .....	54
Figura 19 - Resultados de emissão de CO <sub>2</sub> - Cenário Hipotético (DRI).....	56
Figura 20 - Resultados de emissão de CO <sub>2</sub> - Cenário Hipotético (Sucata)....	57

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Produção de aço produto por processo, por região [13].....	12
Tabela 2 - Emissões de CO <sub>2</sub> por rota de produção de aço [4].....	13
Tabela 3 - Comparativo entre Midrex NG, Midrex NG com adição de hidrogênio e Midrex H2 [36] .....	34
Tabela 4 - Fatores de Emissões Diretas (Escopo 1) [42] .....	43
Tabela 5 - Fatores de Emissão à Montante (Escopos 2 e 3) [42] .....	44
Tabela 6 - Produção de aço - 2020 .....	45
Tabela 7 - Materiais consumidos - Siderurgia 2020.....	46
Tabela 8 - Produção - Cenário Hipotético.....	47
Tabela 9 - Dados de coke rate, PCI rate e produção de gusa [46] .....	47
Tabela 10 - Produção de Gusa do Alto-Forno B [46].....	48
Tabela 11 - Consumo de Coque e PCI no Alto-Forno 2 .....	48
Tabela 12 - Dados de coque, carvão e PCI considerados na planilha WSA – Cenário Hipotético.....	48
Tabela 13 - Carga metálica hipotética AF-B [47] .....	49
Tabela 14 - Quantidade de ferro na carga metálica e no gusa [48] .....	49
Tabela 15 - Carga metálica AF-B em 2020 - Cenário Hipotético .....	50
Tabela 16 - Consumo de minério de ferro associado ao alto-forno B.....	50
Tabela 17 - Dados de minério de ferro, calcário, dolomita crua e pellets considerados na planilha WSA – Cenário Hipotético .....	51
Tabela 18 - Consumo de eletrodos de grafite e hidrogênio verde - Cenário Hipotético .....	52
Tabela 19 - Dados consolidados de consumo - Cenário Hipotético .....	53
Tabela 20 - Total de emissões de CO <sub>2</sub> por material - Cenário Atual .....	55
Tabela 21 - Total de emissões de CO <sub>2</sub> por material - Cenário Hipotético (DRI) .....	57
Tabela 22 - Total de emissões de CO <sub>2</sub> por material - Cenário Hipotético (Sucata).....	58
Tabela 23 - Plantas Midrex com capacidade superior a 1,73 Mt/ano [7] .....	59
Tabela 24 – Intensidade de emissões de CO <sub>2</sub> por rota .....	62

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

AF/BF – Alto-Forno (*Blast Furnace*)

APS – *Announced Pledged Scenarios*

BOF – Aciaria ou Conversor a oxigênio (*Basic Oxygen Furnace*)

DRI – Ferro-esponja (*Direct Reduced Iron*)

EAF/FEA – Forno a arco elétrico (*Electric Air Furnace*)

GEE – Gases de efeito estufa

GLP – Gás liquefeito de petróleo

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

NZE – *Net Zero Emissions by 2050 Scenario*

WSA – *World Steel Association*

## Sumário

1.	Introdução.....	10
2.	Objetivos.....	11
3.	Justificativa .....	11
4.	Revisão bibliográfica.....	11
4.1.	Rotas de produção do aço .....	11
4.2.	Rota BF-BOF .....	13
4.2.1.	Aspectos gerais .....	13
4.2.2.	Emissões de CO <sub>2</sub> no processo.....	15
4.3.	Rota EAF.....	16
4.3.1.	Diferença entre rota BF-BOF e EAF .....	16
4.3.2.	Carga do forno .....	17
4.3.3.	Operação do forno .....	19
4.3.4.	Características do forno .....	21
4.3.5.	Projetos mundiais.....	23
4.4.	Produção de ferro-esponja.....	25
4.4.1.	Uso do Hidrogênio .....	28
4.5.	Cálculo das emissões de CO <sub>2</sub> na siderurgia .....	37
5.	Materiais e Métodos.....	39
5.1.	Fatores de Emissão .....	42
5.2.	Dados considerados .....	45
5.2.1.	Cenário atual.....	45
5.2.2.	Cenário hipotético .....	46
6.	Resultados e Discussão .....	46
6.1.	Dados de produção no cenário hipotético .....	46
6.2.	Dados de consumo do cenário hipotético .....	47

6.2.1.	Carvão metalúrgico, coque externo e PCI .....	47
6.2.2.	Minério de Ferro, Pellet, Calcário e Dolomita.....	48
6.2.3.	Hidrogênio verde e eletrodos de grafite .....	51
6.2.4.	Consumo de Eletricidade .....	52
6.2.5.	Dados consolidados – Cenário hipotético .....	52
6.3.	Emissões de CO <sub>2</sub> .....	53
6.4.	Capacidade dos equipamentos.....	59
7.	Conclusão.....	62
	Referências .....	64

## **1. Introdução**

A indústria siderúrgica é o setor industrial que mais emite gases de efeito estufa, no mundo, correspondendo a aproximadamente 8% [1] das emissões totais, conforme a *World Steel Association*. Na categoria de indústria, a siderurgia responde por 1/3 [2] das emissões. Especialistas afirmam que o grande vilão das emissões de CO<sub>2</sub> são as usinas integradas, que utilizam o alto-forno como redutor e o coque metalúrgico como matéria-prima essencial na redução no alto-forno. A produção do aço pelas usinas integradas, ou seja, pela rota do alto-forno a coque, corresponde a 70% da produção mundial do aço, porém responde por, aproximadamente, 92% das emissões de CO<sub>2</sub>. [3][4]

Nos últimos anos, muito se tem discutido a respeito de alternativas para a redução da dependência de combustíveis fósseis, devido ao seu alto impacto nas emissões de gases de efeito estufa, que por sua vez aumentam ano após ano, contribuindo para o aumento do aquecimento global. Diversas conferências internacionais foram organizadas nos séculos XX e XXI, com o objetivo de determinar metas de redução de carbono, sendo a última delas a COP-26. Nela, o governo brasileiro se comprometeu a reduzir 50% das emissões totais de gases de efeito estufa até 2030, e neutralização total até 2050. [5]

É evidente o papel da siderurgia na meta de redução a carbono, pois a siderurgia é indústria de base, sendo essencial na indústria de materiais. Algumas empresas já adotam o uso do forno a arco elétrico para reduzir as emissões, seja com sucata ou com DRI reduzido a gás natural. A rota com sucata é a que menos libera gases de efeito estufa atualmente, no entanto a disponibilidade de sucata é limitada, e uma sucata de má qualidade resulta em aço da mesma qualidade. A rota com DRI via gás natural libera gases de efeito estufa tanto na reforma do gás, para obtenção do gás redutor, quanto no processo de redução do ferro, ainda que seja menos emissões do que pelo alto-forno. [6][7][8]

Sendo assim, é necessário encontrar alternativas que tornem possível a adoção do aço 100% verde em larga escala. Nesse aspecto, muitos referem-se ao hidrogênio como a fonte de energia limpa mais promissora. Sabendo que o hidrogênio é um agente capaz de reduzir o ferro, muitas empresas, como a ArcelorMittal e a SSAB, vêm adotando metas que envolvem a criação de plantas de produção do aço pelo forno a arco elétrico, utilizando como matéria-prima o ferro-esponja reduzido pelo

hidrogênio verde. Essas duas técnicas, considerando também a disponibilidade de energia renovável e em grandes quantidades, possibilitam a produção de aço com zero emissões de gás carbônico. [6][9][10][11]

Ressalva-se, no entanto, que atualmente o hidrogênio não possui preços competitivos, tornando o gás natural preferível para a produção do DRI. Portanto, ainda não existem plantas de produção de aço 100% verde ou fornos de redução direta pelo hidrogênio em larga escala. Consequentemente, se torna essencial que haja incentivos públicos, tanto para a produção do aço 100% verde, quanto para a produção do hidrogênio verde. [6]

## **2. Objetivos**

O objetivo desse trabalho é analisar as emissões de gás carbônico em uma Usina Integrada, utilizando os dados reais de uma empresa siderúrgica de grande porte, e compará-las com dois cenários, onde parte de sua produção é substituída pela rota do forno a arco elétrico, sendo um cenário com o uso de ferro-esponja reduzido pelo hidrogênio verde, e o outro pela sucata. Nesse cenário, trabalha-se com a premissa de que um dos dois alto-fornos da Usina é substituído pelo FEA.

## **3. Justificativa**

A motivação desse trabalho é a necessidade de se buscar tecnologias existentes e/ou novas tecnologias para a produção de aço de forma sustentável. A discussão sobre o aquecimento global e a poluição do ar tem sido muito presente no século XXI, em âmbito global, envolvendo até a criação de tratados (como o Acordo de Paris). Essa discussão abrange a necessidade de reduzir as emissões de gás carbônico e mantendo a qualidade do aço, produto insubstituível em várias de suas aplicações.

## **4. Revisão bibliográfica**

### **4.1. Rotas de produção do aço**

Existem duas rotas principais para a fabricação do aço. A mais utilizada no mundo é a rota de usinas integradas a coque, com conversor de oxigênio (BF-BOF ou BF-LD, onde BF se refere ao alto-forno a coque e BOF/LD se referem ao conversor a oxigênio). A segunda rota mais utilizada é a de produção do aço através de fornos a

arco elétrico (FEA ou EAF, em inglês). As usinas que possuem o forno elétrico podem seguir a rota sucata-FEA ou DRI-FEA, em que DRI corresponde ao ferro metálico obtido por redução direta, se tornando o ferro-esponja. As técnicas mais comuns de redução direta do minério de ferro são via gás natural e hidrogênio.

A aciaria tradicional do conversor Linz-Donawitz ainda é a mais utilizada para produção de aço, porém a aciaria elétrica vem ganhando cada vez mais espaço. A principal motivação para isso são as metas mundiais de redução de carbono, que vêm ganhando cada vez mais destaque, dentre eles o Protocolo de Kyoto, cujo objetivo é reduzir as emissões de gases de efeito estufa. A importância que vem sendo dada às metas de redução de carbono resulta em uma dependência financeira das empresas à redução de emissão. Estudos indicam que aproximadamente 14% do valor das empresas está em risco, caso elas não sejam capazes de reduzir suas emissões. [12]

No ano de 2021, foram produzidos 1,95 bilhões de toneladas de aço bruto no mundo, sendo que 28,9% foram pelo forno a arco elétrico e 70,8% foram via conversor a oxigênio. Desse total, aproximadamente 7% da produção utiliza ferro-esponja como matéria-prima do forno elétrico. No Brasil, 23,6% das 36 milhões de toneladas produzidas foram pelo FEA [13]. A Tabela 1 mostra a produção de aço bruto por região, separada também por processo.

Tabela 1 - Produção de aço produto por processo, por região [13]

<b>Região</b>	<b>Milhões de toneladas</b>	<b>Oxigênio (%)</b>	<b>FEA (%)</b>
União Europeia	152,60	56%	44%
Europa (Outros)	52,30	37%	63%
CIS + Ucrânia	105,40	62%	33%
NAFTA	117,20	31%	69%
América Latina	46,30	67%	32%
África	20,40	16%	84%
Oriente Médio	45,80	6%	94%
Ásia	1.403,40	81%	19%
Brasil	36,20	75%	24%
Mundo	1.949,90	71%	29%

Na Tabela 2 é possível comparar as emissões de gás carbônico associadas à produção do aço via forno a arco elétrico e via rota BF-BOF, com base em dados do ano de 2019. Nota-se, apesar da produção via EAF corresponder a 28% do total, as

suas emissões associadas correspondem a apenas 7% do total. A intensidade de emissão associada à produção via EAF foi de 0,4 tCO<sub>2</sub>/t<sub>Aço</sub>, enquanto a intensidade em usinas integradas à coque foi de 2,2tCO<sub>2</sub>/t<sub>Aço</sub>. Na tabela, MT é milhões de toneladas, e T é toneladas. [4]

Tabela 2 - Emissões de CO<sub>2</sub> por rota de produção de aço [4]

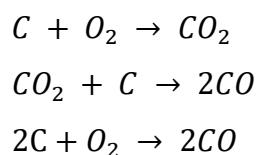
Processo	MT Aço	%	MT CO <sub>2</sub>	%	T CO <sub>2</sub> /T Aço
EAF	523	28%	209	7%	0,3996
BF-BOF	1.346	72%	2.961	93%	2,2000
Total	1.869		3.170		1,6962

## 4.2. Rota BF-BOF

### 4.2.1. Aspectos gerais

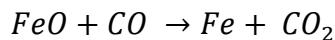
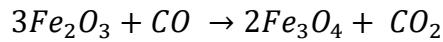
A produção do aço pela rota BF-BOF na Usina analisada se inicia no preparo do minério, por meio da sinterização, que produz o sinter, ou a pelotização, que produz a pelota. A carga metálica do alto-forno é composta do produto da sinterização, podendo ter também pelotas e minério de ferro. Em conjunto com essa carga, o alto-forno é abastecido com coque e fundentes. Em usinas integradas a coque, existem baterias de coque na própria planta, que o produzem a partir do carvão metalúrgico. Na coqueria, também é liberado o gás de coqueria (COG) [14].

No alto-forno, o objetivo é a redução da carga metálica para produção de ferrogusa. Nesse processo, é necessário o fornecimento de energia térmica por meio do ar soprado pelas ventaneiras, porém a maior parte é obtida do próprio coque, através de sua queima [14]. O ar soprado possui temperatura elevada e o oxigênio presente nele queima o combustível (coque), produzindo o monóxido de carbono, um gás redutor, conforme as reações abaixo, sendo a terceira a reação global [15].



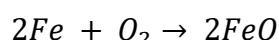
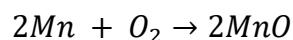
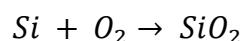
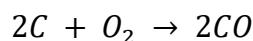
O gás redutor é responsável pela redução do minério de ferro, que se inicia pela hematita, transformando-se em magnetita, depois em wustita e, por fim, obtendo

o ferro metálico, sob a forma de ferro-gusa líquido. Essa liga possui em torno de 4 a 4,5% de carbono, e é o produto principal do alto-forno. Os outros produtos do alto-forno são a escória, e o gás de alto-forno (GAF), que é reaproveitado por meio de regeneradores e retorna ao processo para fornecer energia térmica. As reações de redução dos óxidos de ferro estão listadas abaixo [15].



Após esse processo, o ferro-gusa líquido é destinado à aciaria, onde passa por um processo de refino realizado em conversores a oxigênio. Esse refino consiste na redução da quantidade de carbono presente no material e no ajuste nas quantidades de outros elementos de liga, com o intuito de se obter as proporções que se enquadram nas propriedades desejadas. A energia necessária para as transformações químicas vem do calor latente do gusa líquido e das reações exotérmicas de oxidação do carbono, silício e de parte do ferro, e tem como produtos o aço, escória e o gás de aciaria (GLD) [16]. Após a conversão, o aço passa pelo lingotamento e eventualmente por conformação mecânica. As reações que ocorrem na aciaria estão listadas abaixo.

As reações do silício, manganês e fósforo abaixo têm como objetivo reduzir a proporção desses elementos de liga no aço. A reação de oxidação do ferro não é desejável, tampouco evitável, porém ocorre em menor escala. A reação de oxidação do carbono e produção do monóxido de carbono resulta na transformação do ferro gusa em aço, e é o maior objetivo do processo. [17].



#### 4.2.2. Emissões de CO<sub>2</sub> no processo

Conforme a Figura 1, em uma usina integrada que utiliza a rota BF-BOF para a fabricação do aço, a etapa de redução, representada pelo alto-forno a coque, representa aproximadamente 69% das emissões de CO<sub>2</sub> totais do processo. Assim como demonstrado pelas reações que ocorrem no alto-forno, a queima do coque para obter o agente redutor libera CO<sub>2</sub> na atmosfera, assim como o processo de redução pelo agente CO, em que todas as etapas resultam na liberação de CO<sub>2</sub>. [18]

As etapas de preparo das matérias-primas do alto-forno (sinterização, coqueificação e pelotização) representam aproximadamente 20% das emissões de CO<sub>2</sub> de todo o processo de fabricação do aço. Sendo assim, em uma usina típica integrada, apenas 11% das emissões são referentes à transformação do ferro gusa em aço na aciaria. [18]

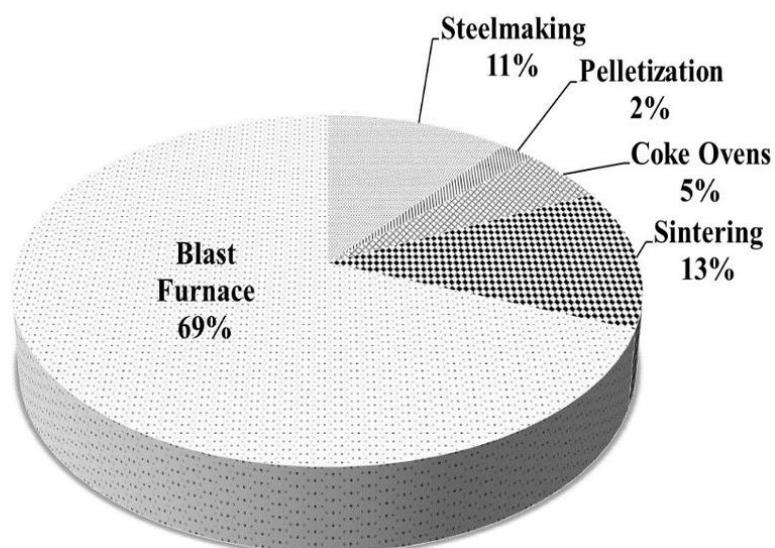


Figura 1 - Emissões de CO<sub>2</sub> na rota Alto-Forno - Conversor LD [18]

Vários projetos de descarbonização visam aumentar a eficiência dos altos-fornos e dos conversores à oxigênio. Apesar de essas medidas ajudarem na redução das emissões de CO<sub>2</sub>, não é possível obter um aço neutro em carbono utilizando o alto-forno a coque, devido à sua origem fóssil. Sendo assim, aumentar a eficiência dessa rota não é a medida indicada para neutralização das emissões a longo prazo. Por outro lado, deve-se ressaltar que essa medida não deve ser descartada no curto

e médio prazo, porque as tecnologias de produção de aço 100% verde ainda estão sendo desenvolvidas e/ou não possuem preços competitivos para implantação em larga escala.

#### **4.3. Rota EAF**

O forno elétrico foi criado em 1878 por W. Von Siemens, que patenteou o forno elétrico de irradiação, utilizando dois eletrodos que formam um arco elétrico. No entanto, a primeira instalação comercial do forno elétrico se deu apenas em 1907, nos Estados Unidos. No Brasil, os primeiros fornos elétricos surgiram na década de 40, e um crescimento notável ocorreu na década de 70 [19]. Atualmente, 24% da produção mundial de aço é pela rota sucata-EAF, e 5% pela rota DRI-EAF [20].

As usinas que realizam a produção do aço pelo forno elétrico a arco têm em operação as etapas de refino e lingotamento. Portanto, elas não necessitam de unidades de sinterização, coqueificação e do alto-forno. Isso ocorre porque a carga utilizada no forno elétrico é usualmente a sucata e/ou o ferro-esponja, então não é preciso do preparo da carga metálica pela sinterização, nem da produção do ferrogusa pelo alto-forno. Sua fonte de energia primária é a elétrica, mas também é necessária energia química, proveniente da injeção de oxigênio na carga. Enquanto o coque (carvão) é a principal fonte de energia na rota BF-BOF, a eletricidade é a principal na rota EAF.

O forno elétrico tem como função transformar o ferro em aço, ou obter o ferro líquido a partir de uma carga já metalizada. Algumas das principais vantagens no uso da rota do forno a arco elétrico para a obtenção do aço são [16][21]:

- Maior eficiência térmica;
- Maior versatilidade de carga;
- Menores emissões de CO<sub>2</sub>;
- Maiores quantidades de sucata recicladas.

##### **4.3.1. Diferença entre rota BF-BOF e EAF**

O arco elétrico tem como etapas a fusão e o refino da matéria-prima para obtenção do aço. No forno, ocorrem as mesmas reações químicas do que as citadas no conversor LD. Caso a sucata seja usada como matéria-prima, a qualidade do aço

obtido nesse processo depende diretamente da qualidade dela. Além disso, é possível aproveitar alguns elementos de liga da sucata e evitar outros, utilizando sucata de famílias específicas de aço para a operação no forno, conforme a composição química desejada para o produto [21].

Na Figura 2 - Comparaçāo entre rotas BF-BOF e FEA é possível observar as rotas de produção de aço via alto-forno e aciaria, e via forno a arco elétrico. Observa-se que, conforme comentado, as etapas necessárias para a produção do aço via rota EAF são o refino e lingotamento, não sendo necessárias as etapas de sinterização e coqueria. Ressalta-se que, na imagem abaixo, só está sendo considerada como matéria-prima do forno elétrico a sucata. Porém, poderia ser utilizado o ferro-esponja e mesmo ferro gusa sólido ou líquido. No próximo tópico serão descritas as diferentes cargas possíveis de serem utilizadas nessa rota.

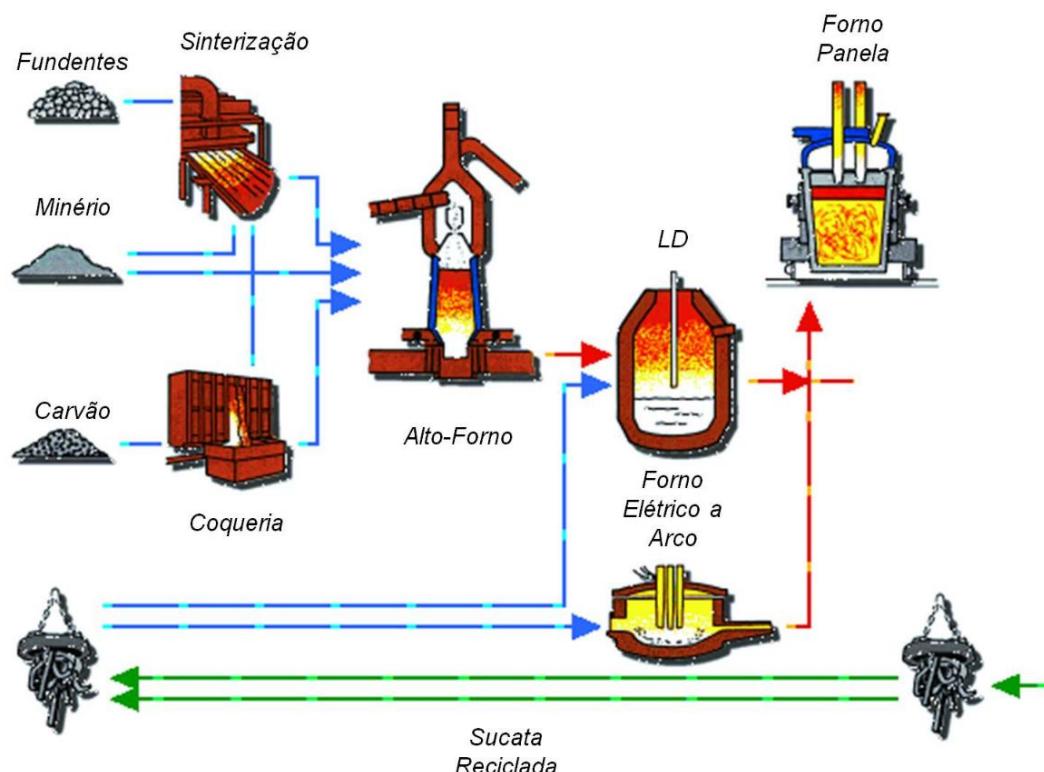


Figura 2 - Comparaçāo entre rotas BF-BOF e FEA [22]

#### 4.3.2. Carga do forno

Assim como no conversor Linz-Donawitz, a carga do forno elétrico também tem que ser o ferro metálico, porém em geral ela é sólida. A carga pode ser inteiramente de sucata reciclada, de ferro-esponja ou mesmo dos dois misturados. Para a obtenção

da sucata, basta reaproveitá-la de outros processos. É interessante saber a composição química da sucata, assim como a sua qualidade, para que o produto do forno tenha as propriedades físico-químicas desejadas. [21]

No preparo da carga, também deve ser levada em consideração a densidade da sucata, caso essa seja a matéria-prima de escolha. Se a densidade da sucata for muito baixa, é necessário balancear corretamente a carga para que não haja muitos carregamentos, o que compromete a produtividade [21]. Quando a sucata é a matéria-prima do processo, não há etapa de redução na rota de fabricação do aço, visto que a sucata já foi reduzida previamente. Sendo assim, o processo envolve principalmente o uso de eletricidade para fundir a carga. Portanto, as emissões de CO<sub>2</sub> diretas associadas são principalmente relacionadas ao consumo dos eletrodos de carbono do forno, e as indiretas à fonte de geração da energia elétrica.

A qualidade do aço obtido está diretamente relacionada à composição da sucata utilizada, o que limita a produção do aço por essa rota em grande escala. Isso ocorre porque a sucata possui elementos residuais, tais como o estanho, níquel e cromo, que não são possíveis de serem removidos durante o refino. Portanto, caso a sucata possua teor maior desses elementos do que o desejado para o aço, o produto não atingirá a composição química especificada, tornando-o impróprio para uso. Outro fator limitante é o acesso à quantidade de sucata necessária para tal. [23]

No caso do uso do ferro-esponja, também chamado de DRI (*Direct Reduced Iron*), como matéria-prima do forno, utiliza-se de processo de redução direta para a sua obtenção. O processo de redução direta consiste na redução do minério de ferro a ferro metálico, sem que ocorra sua fusão em nenhuma parte do processo (como ocorre no alto-forno), obtendo um produto sólido (ferro-esponja). O agente redutor pode ser sólido (carvão, que corresponde a 10% dos processos de redução direta) ou gasoso, como o gás natural e/ou hidrogênio [16], o que será mais abordado no tópico 4.4. Quando o gás natural e carvão são usados como agentes redutores do DRI, há a emissão de CO<sub>2</sub>, devido à sua origem fóssil. Aços obtidos pelo DRI podem atingir qualidade semelhante à de plantas integradas, devido aos elementos residuais já mencionados.

Na Figura 3 é possível comparar as rotas sucata-EAF e DRI-EAF. No preparo da carga pela rota da sucata, o principal insumo é a eletricidade consumida pelo forno para fundi-la, e no caso do DRI também são considerados como insumos o minério

de ferro e o agente redutor, que atualmente costuma ser o gás natural. As emissões de CO<sub>2</sub> que aparecem na imagem são associadas à fonte de energia elétrica disponível para os processos e à queima do gás natural para a produção do DRI, e são dados da empresa ArcelorMittal, em uma planta nos Estados Unidos. [6]

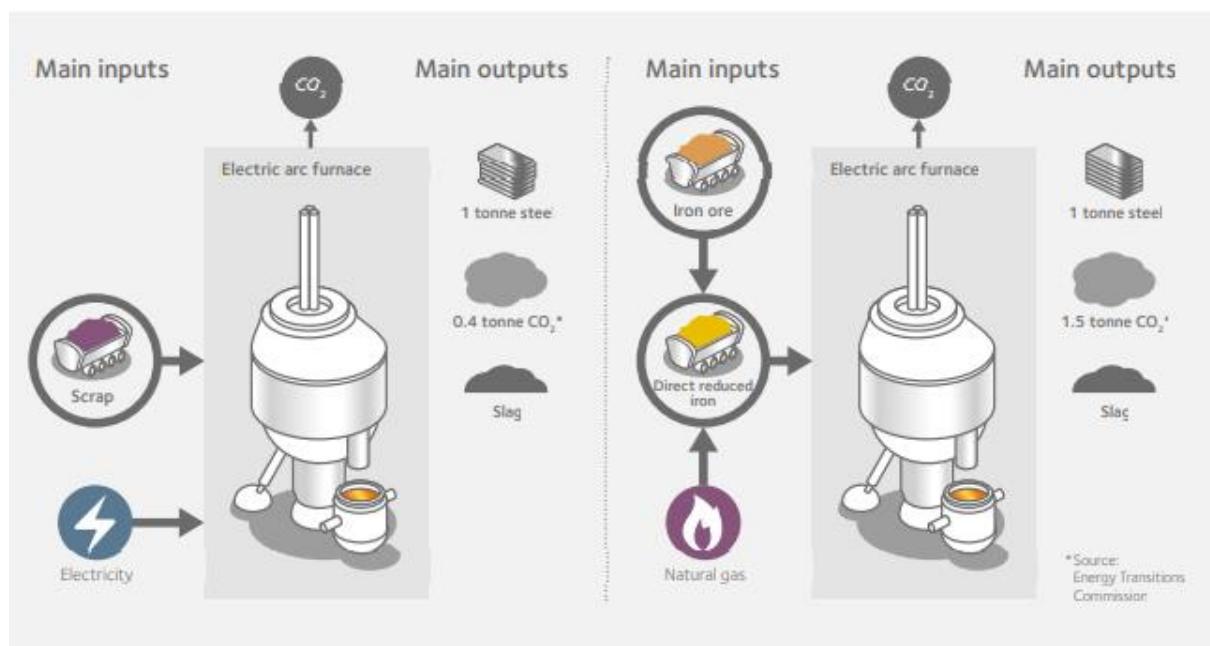


Figura 3 - Rota sucata-EAF vs. Rota DRI-EAF [6]

#### 4.3.3. Operação do forno

O processo de conversão do ferro metálico em aço no forno elétrico a arco segue quatro etapas: carregamento, fusão, refino e vazamento. Primeiro, é necessário o preparo da carga, que envolve a obtenção de fundentes para incluir na carga e a seleção da carga metálica com as propriedades desejadas, seja ela a sucata, o DRI ou uma mistura das duas.

Para o carregamento, a matéria-prima é preparada em um cestão, transportada por uma ponte rolante e depositada dentro do forno. Os eletrodos de grafite são posicionados acima da carga metálica, e a corrente elétrica acionada forma o arco elétrico entre os eletrodos e a carga metálica. Como resultado dessa transferência de energia, o eletrodo perfura a carga e ela começa a fundir [16].

Durante o processo de fusão, a carga líquida passa a ocupar um espaço menor do que anteriormente, então é realizado um segundo carregamento de carga. Após o segundo carregamento, o processo de fusão reinicia. Paralelamente ao processo de

fusão devido à energia elétrica, também ocorre a fusão da carga por meio da energia química proveniente da injeção de gases e/ou do carbono presente na carga [21].

Após a etapa de fusão, ocorre o refino da carga. Esse processo consiste na formação de escória espumante na carga, que por sua vez é a criação de escória em torno do arco elétrico, responsável pela absorção de impurezas no aço, como o fósforo. Para formar a escória espumante, é preciso injetar oxigênio no ferro líquido, conforme a reação na Figura 4. Para ocorrer a espumação, são injetados materiais carburantes, como finos de carvão, que reagem com a wustita conforme a primeira reação, abaixo. Na Figura 4 é possível observar um esquema de forno elétrico, e as reações que ocorrem ao injetar carbono e oxigênio no material. O consumo dos eletrodos de grafite e injeção dos finos de carvão resultam em uma emissão de, aproximadamente, 53 kgCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub>. O restante das emissões da operação do forno é associado à fonte de energia elétrica. [24]

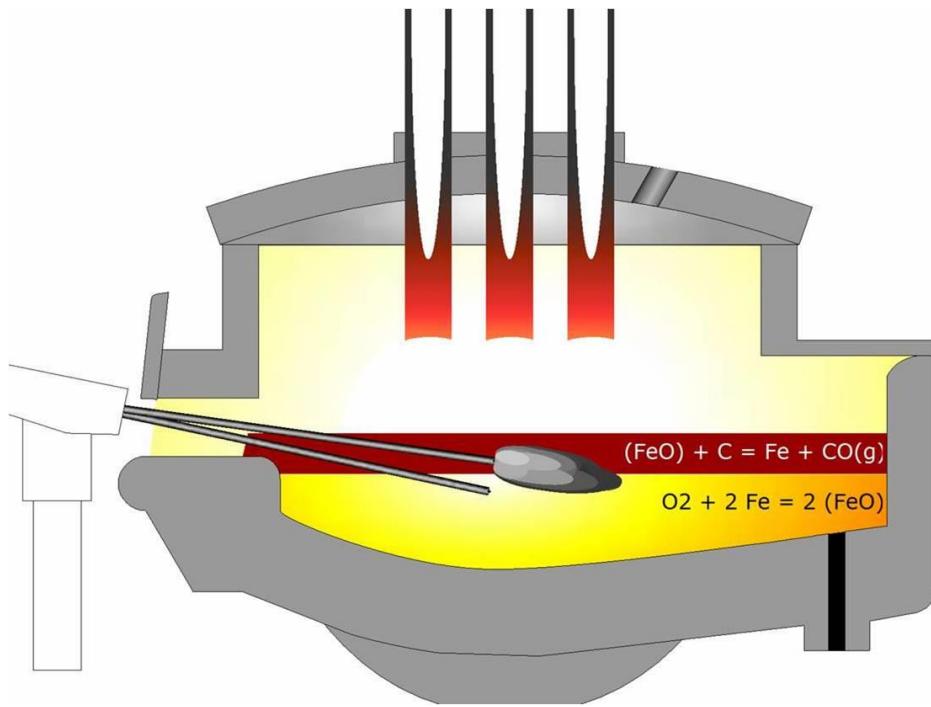


Figura 4 - Injeção de carbono e oxigênio no FEA [22]

Ao controlar a tensão superficial e viscosidade da escória, é possível reter o monóxido de carbono formado, e essa retenção aumenta o volume da escória, formando a espuma. A condição da escória espumante depende do equilíbrio entre a formação do FeO, por meio da injeção do oxigênio, e da formação do CO, por meio da injeção dos finos de carvão, responsáveis também por evitar a superoxidação da carga. Durante o refino, também ocorre o aquecimento do aço até a temperatura adequada para o vazamento [21].

Por fim, a última etapa do processo é o vazamento do aço para uma panela. Durante esse processo, a quantidade de escória vazada do forno para a panela deve ser controlada, por ela ser rica em óxidos de ferro e de fósforo, o que eleva o consumo de desoxidantes na etapa de refino secundário na panela [21].

#### 4.3.4. Características do forno

O forno elétrico é composto por uma carcaça, que é uma estrutura cilíndrica com duas aberturas. Uma delas é o bico de vazamento, de onde sai o metal em estado líquido do forno, e a outra é a porta de escória, de onde sai a escória e onde são

injetadas algumas das matérias-primas, como o oxigênio. Um esquema da carcaça pode ser verificado na Figura 5. [21]

No forno também há uma abóboda, cuja abertura permite que o carregamento da carga seja realizado. A abóboda pode ser feita de tijolos refratários ou de painéis refrigerados. Ela é acoplada a um sistema hidráulico giratório, e esse movimento é necessário para as operações de vazamento do metal líquido e retirada da escória. Os painéis refrigerados que compõem a abóboda também podem ser utilizados como revestimento da parede do forno, com exceção da região central, que possuem os furos para a passagem dos eletrodos de grafite. A região dos eletrodos de grafite é composta de materiais refratários, a fim de evitar um possível curto-circuito. Um esquema simplificado do forno pode ser observado na Figura 6. [21]

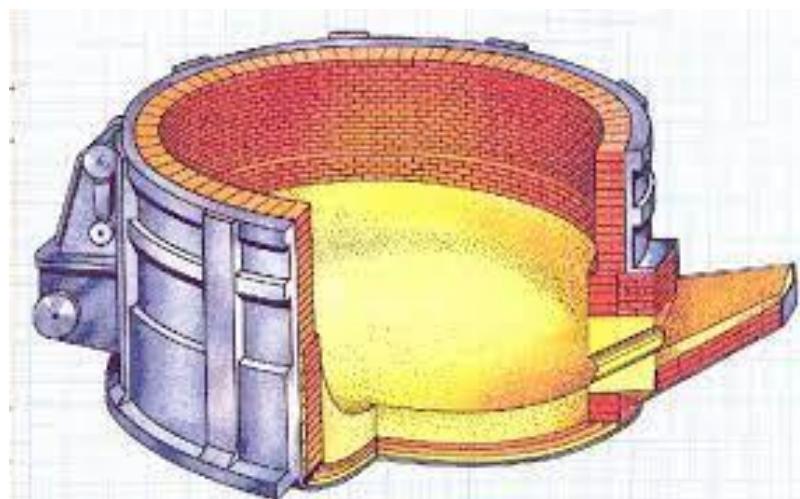


Figura 5 - Carcaça de um forno elétrico [21]

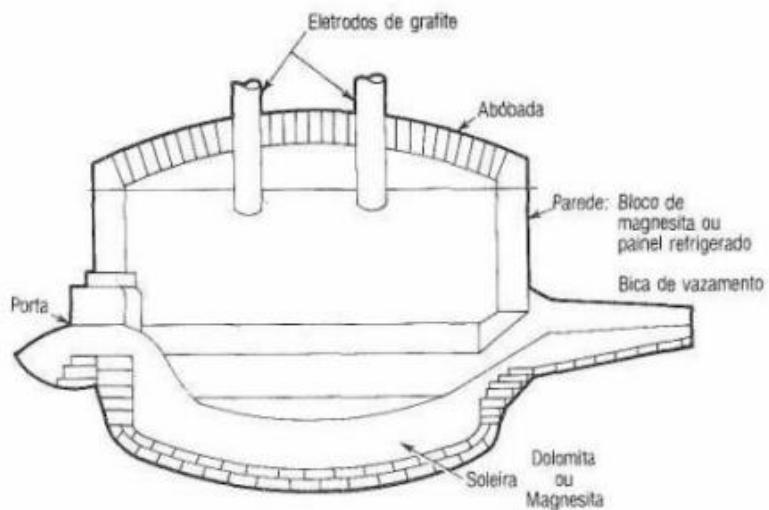


Figura 6 - Esquema simplificado do FEA [21]

#### 4.3.5. Projetos mundiais

Nos últimos anos, muitos países têm iniciado uma transição gradual da rota de siderurgia utilizando o alto forno, pela rota com forno elétrico. O motivo disso é que o processo de fabricação do aço seja mais limpo e sustentável. Com o desenvolvimento da tecnologia do forno elétrico, se tornou possível fabricar diversos tipos de aço e em grande escala por meio desse processo, portanto uma série de países está adotando essa tecnologia como meio de redução de emissões de carbono na indústria siderúrgica. Nos próximos tópicos serão abordadas três empresas que estão fazendo essa transição.

##### 4.3.5.1. Canadá

No Canadá, o governo deu incentivos de até 420 milhões de dólares canadenses (em torno de R\$ 1,68 bilhões na cotação atual) para que a empresa Algoma, que possui uma usina integrada de produção de aço, substituisse seu alto-forno e aciaria por dois fornos elétricos a arco, até 2024. O ministro Justin Trudeau acredita que, com essa iniciativa, o país se torne um dos líderes na iniciativa de fabricar o aço de forma limpa e sustentável. [25][26]

De acordo com a própria empresa, a previsão é de que as emissões de carbono sejam reduzidas em aproximadamente 70%, correspondendo a uma redução de 3 milhões de toneladas por ano, até 2030. Além disso, prevê-se que a capacidade

produtiva da Algoma aumente em 1/3, passando de 2,8 milhões de toneladas de aço anuais para 3,7 milhões. A instalação dos fornos deve ser finalizada em 2024, e a partir disso a empresa fará uma transição gradual da rota AF-BOF para a rota EAF, conforme mais potência elétrica se torne disponível na rede [25][26][27].

No ano de 2021, quase metade de todo o aço bruto produzido no Canadá foi por forno elétrico. No total, foram produzidas 13 milhões de toneladas de aço, sendo que 45,3% foram pela rota EAF. Com a transição total da operação da Algoma, essa porcentagem representaria, atualmente, quase 70%. [13]

#### 4.3.5.2. Suécia

A iniciativa HYBRIT (*Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology*) é um consórcio entre três grandes empresas da Suécia para reduzir as emissões de carbono na siderurgia. As três empresas envolvidas são a LKAB (empresa estatal, sendo a maior produtora de minério de ferro do país), a Vattenfall (líder na produção e comercialização de energia elétrica) e a SSAB (empresa fabricante de aço). Além do investimento dessas três empresas, a Agência de Energia Sueca concedeu um auxílio governamental de SEK 599 milhões (equivalentes a 311 milhões de reais) [9][10].

Essa tecnologia visa utilizar o hidrogênio verde e a energia elétrica para a fabricação do aço, substituindo os combustíveis fósseis. O hidrogênio é o agente redutor do ferro, que substituirá o carvão e o coque nessa função, sendo utilizado para a fabricação do ferro-esponja, que será matéria-prima na fabricação do aço, por meio do forno a arco elétrico.

As unidades fabris da SSAB nos Estados Unidos já utilizam o forno a arco elétrico à base de sucata, e pretendem utilizar apenas energias de fonte renováveis até o final de 2022. Em uma das unidades da Suécia (SSAB Luleå), está sendo construída a unidade de redução do ferro pelo hidrogênio (fabricação do ferro-esponja) e na unidade de Oxelösund, ambos os alto-fornos devem ser substituídos por um forno elétrico a arco. Com essa iniciativa, a maior parte das emissões de carbono dessa unidade devem ser eliminadas [10].

O objetivo inicial era que, até 2045, todas as unidades fabris da SSAB se tornassem independentes de combustíveis fósseis. Porém, houve um rápido avanço

e esse objetivo já foi reduzido para 2035. Ao bater a meta, prevê-se que as emissões totais de carbono da Suécia sejam reduzidas em 10%, e da Finlândia em 7% [10][11].

#### **4.3.5.3. Áustria**

Na Áustria, a iniciativa de descarbonizar a produção do aço vem da empresa Voelstapine. Eles têm como meta substituir três de seus alto-fornos por dois fornos elétricos a arco, sendo que as construções se iniciarão em 2024, caso haja aprovação do conselho da empresa em 2023. Espera-se que os fornos iniciem a operação em 2030. Além disso, o grupo pretende utilizar apenas energia de fontes renováveis para alimentar o forno, de forma que as emissões de carbono sejam reduzidas para o menor valor possível.

Com o sucesso do projeto, estima-se que as emissões de carbono do grupo Voelstapine sejam reduzidas em 30%, o que corresponde a 3 a 4 milhões de toneladas de gás carbônico, e que reduziria em 5% as emissões totais da Áustria. A empresa espera atingir produção de aço completamente neutra até 2050, utilizando eletricidade e hidrogênio verdes. No entanto, para que o projeto seja bem-sucedido, é necessário que haja fornecimento suficiente de energia elétrica renovável, visto que a indústria siderúrgica é eletrointensiva e os fornos elétricos consomem uma grande quantia de energia [28][29][30][31].

### **4.4. Produção de ferro-esponja**

Seguindo a tendência de descarbonização da indústria siderúrgica, a cada ano são produzidas mais toneladas de ferro-esponja. Em 2021, foram produzidas 119,2 milhões de toneladas, representando um aumento de 13,7% em relação a 2020, e 10,2% maior que 2019, quando foram produzidas 108,1 milhões de toneladas, um recorde na época. Nos anos de 2020 e 2021, a produção somada da Índia e Irã representaram mais de metade da produção total. Na Figura 7, é possível observar a produção de DRI por processo. A produção por meio do processo Midrex correspondeu a quase 60% do total de ferro-esponja produzido. [7]

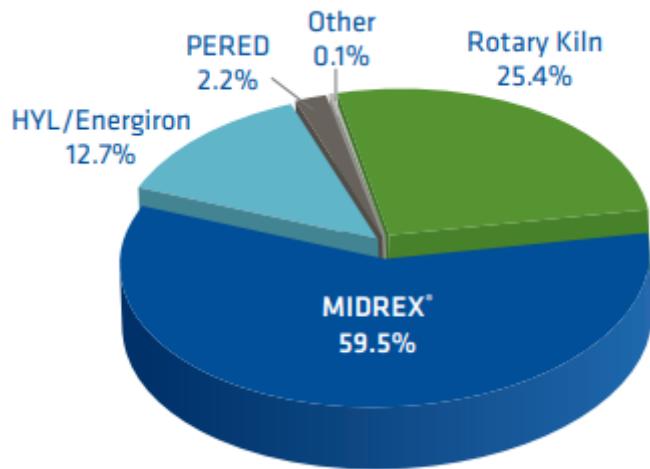
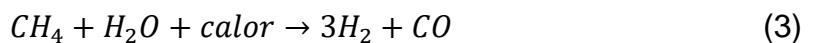


Figura 7 - Produção de DRI por processo em 2021 [7]

A maior parte do ferro-esponja produzido pelo processo Midrex tem como agente redutor o gás natural. Para isso, é preciso realizar a reforma do gás natural, que transforma o metano em um gás redutor, composto majoritariamente pelo hidrogênio e o monóxido de carbono. O gás natural passa pela reforma principalmente em reformadores da Midrex (*MIDREX Reformer*), mas também em reformadores a vapor. As equações 1 e 2 descrevem o processo nos reformadores Midrex. A diferença entre os produtos dessas equações é a proporção de H<sub>2</sub>/CO na mistura, sendo que na reforma pela água, essa proporção é maior. [7][8]

A reforma do gás natural em reformadores a vapor é representada pelas equações 3 e 4 tem duas etapas – a reforma do gás natural (3), onde há o aquecimento da mistura de gás natural e vapor d'água, produzindo o monóxido de carbono e hidrogênio; e a reação de mudança do vapor d'água (4), na qual o monóxido de calor gerado pela reforma do gás natural reage com a água, formando hidrogênio, dióxido de carbono e uma pequena quantidade de calor. Esse processo é uma das formas de produção do hidrogênio. [32]

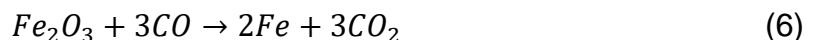


A matéria-prima do processo de redução do ferro são pelotas e/ou minério de ferro. As reações que ocorrem no processo Midrex podem ser observadas abaixo. Nota-se pela equação 6, que a redução do ferro com o uso desses agentes redutores ainda libera gases de efeito estufa devido ao uso do monóxido de carbono, por mais que sejam em menor quantidade que no alto-forno. Parte dos gases liberados como subprodutos são reaproveitados para a reforma do gás natural descrita acima. O fato do CO<sub>2</sub> emitido no processo de redução ser reaproveitado para a reforma significa que é necessário menos gás natural para obter o gás redutor desejado, o que representa, também, menos emissões de gases de efeito estufa. Observa-se, também, que o uso de hidrogênio como agente redutor tem apenas H<sub>2</sub>O como subproduto, não liberando gás carbônico, conforme equação 5. [8]

Redução endotérmica da hematita pelo H<sub>2</sub>:



Redução exotérmica da hematita pelo CO:



Conforme a *World Steel Association*, a intensidade de emissão média de gás carbônico foi 1,89 toneladas CO<sub>2</sub>/tonelada de aço produzido, no ano de 2020, considerando todas as rotas de produção do aço. Atualmente, a rota que utiliza DRI via gás natural e forno a arco elétrico é a rota que utiliza minério de ferro virgem que menos emite CO<sub>2</sub>, mantendo-se em uma intensidade média de 1,1 a 1,2 tCO<sub>2</sub>/t aço produzido. Ressalta-se que esses valores correspondem à utilização do MIDREX NG Process. [33]

Apesar disso, não é possível alcançar o objetivo de produzir aço 100% verde por meio dessa rota. As emissões até podem ser baixas, mas atualmente não é possível zerar as emissões da produção do aço utilizando o gás natural, devido à sua origem fóssil. Na Europa Ocidental, existe uma forte pressão de produção e consumo de aço verde, algo que ainda não é visto no Brasil, mas que deve ocorrer no futuro próximo. Isso porque o custo de emissão de CO<sub>2</sub> na Europa tem se tornado gradativamente mais caro. Sendo assim, muitas empresas europeias já possuem metas ousadas de redução de carbono e produção de aço verde até 2050, que são abordadas no próximo tópico.

#### 4.4.1. Uso do Hidrogênio

Segundo a Agência Internacional de Energia, no ano de 2020 a demanda mundial de hidrogênio foi de 90 milhões de toneladas, incluindo 70 milhões de hidrogênio puro e 20 milhões de hidrogênio misturado a outros gases contendo carbono, para a produção de metanol e para a fabricação do aço. Desse total, aproximadamente 50 milhões de toneladas de hidrogênio são destinadas à indústria, conforme distribuição observada na Figura 8. Atualmente, 10% da demanda de hidrogênio na indústria é para o setor de ferro e aço, na fabricação do ferro-esponja. Os projetos anunciados de migração para a rota DRI-EAF anunciados pelas indústrias do setor devem dobrar a demanda de hidrogênio até 2030. [34]

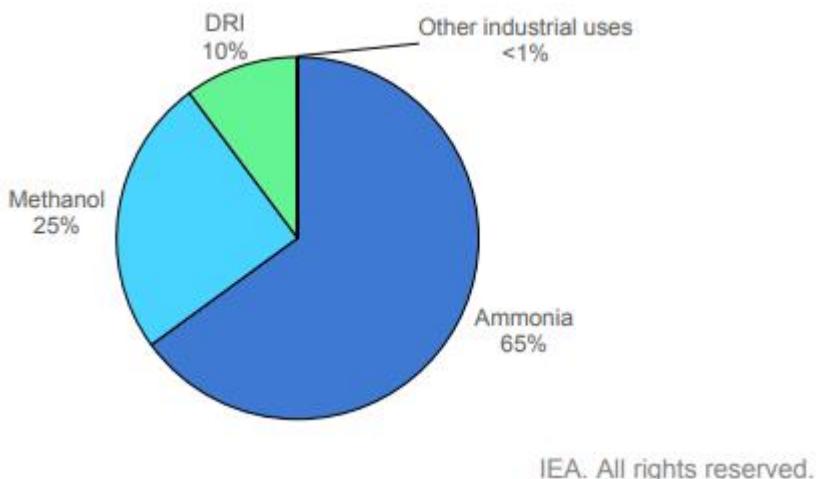


Figura 8 - Demanda de Hidrogênio na Indústria, 2020 [34]

Conforme Figura 9, praticamente toda a produção de hidrogênio em 2020 foi por meio de combustíveis fósseis, o que representou emissões de quase 900 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. De toda sua produção, quase 60% foram via gás natural, sem captura de carbono, e 21% pelo carvão. A produção de hidrogênio por meio de combustíveis fósseis resulta no produto chamado hidrogênio cinza, que emite altas quantidades de gases de efeito estufa. Sua produção é pela reforma do gás natural, conforme equações 3 e 4 do tópico 4.4. Algumas vezes, o hidrogênio produzido via carvão é chamado de hidrogênio marrom. [34]

O hidrogênio produzido por combustíveis fósseis, mas com o processo de captura de carbono respondeu por 0,7% da produção de hidrogênio em 2020, e é chamado de hidrogênio azul. Ele emite baixas emissões de carbono, mas não pode ser considerado neutro em carbono porque não é possível capturar 100% do carbono produzido no processo. Porém, ele é uma alternativa mais sustentável do que o hidrogênio cinza. O hidrogênio produzido via eletrólise, mas com energia elétrica de fontes não renováveis, também é chamado de hidrogênio azul. [34]

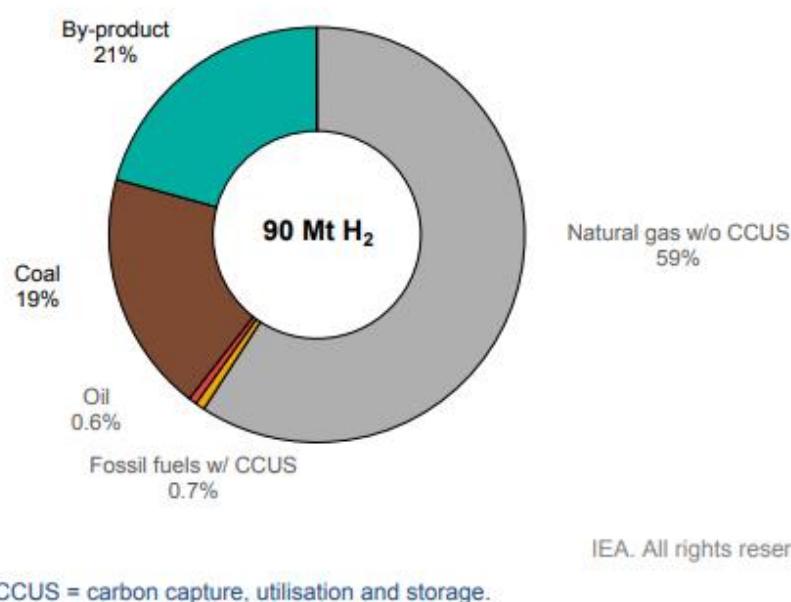
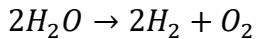


Figura 9 - Fontes de produção de hidrogênio, 2020 [34]

O hidrogênio neutro em carbono é o hidrogênio verde, que é produzido via eletrólise da água, com eletricidade limpa. O objetivo da eletrólise é separar a molécula de água em hidrogênio e oxigênio, conforme equação abaixo. No ano de 2020 foram produzidas apenas 30 mil toneladas de hidrogênio por esse processo, correspondendo a aproximadamente 0,03% do total. Observa-se que a principal diferença nas reações de produção dos hidrogênios verde, cinza e azul é que na primeira, o sub-produto é o gás oxigênio, e no caso do cinza e azul, o sub-produto é o monóxido de carbono, que é um gás de efeito estufa. [34]



A Agência Internacional de Energia fez a análise de dois cenários da futura produção do hidrogênio. A análise APS (*Announced Pledged Scenarios*) envolve todos os compromissos ambientais já realizados pelos governos ao redor do mundo, assumindo que todos vão ocorrer no tempo estabelecido, incluindo metas de neutralidade de carbono ao longo prazo. Nesse cenário, a temperatura média do planeta aumenta em mais de 1,5°C até 2050, atingindo 2,1°C em 2100. O outro cenário é o NZE (*Net-Zero Emissions by 2050*), que idealiza os passos a serem seguidos pelo setor de energia para atingir a neutralidade completa de emissões de CO<sub>2</sub> até 2050. Nele, o aquecimento da temperatura média atinge 1,5°C até 2050, reduzindo para 1,4°C em 2100. [34]

A Figura 10 contém as projeções da produção global de hidrogênio, separados pelo tipo de produção. Para descarbonizar a indústria do hidrogênio, é necessário investir em processos produtivos que envolvem a captura do carbono produzido, assim como na eletrólise, por serem os métodos mais sustentáveis para a sua produção.

No cenário APS, a produção atingirá 250 milhões de toneladas, correspondendo a um aumento de 170% comparado a 2020. Desse total, 51% devem ser via eletrólise e 15% via combustíveis fósseis com captura de carbono. Já no cenário de atingir a neutralidade de carbono até 2050, projeta-se que devem ser produzidas 500 milhões de toneladas de hidrogênio, com 60% pela eletrólise e 36% por combustíveis fósseis e captura de carbono. [34]

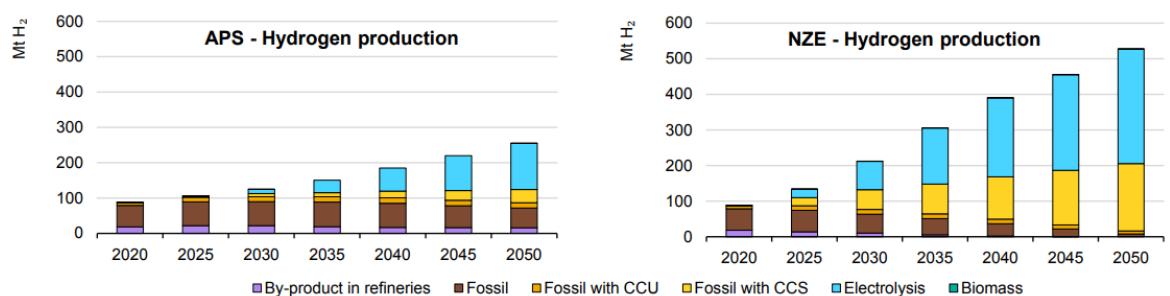


Figura 10 - Produção global de hidrogênio nos cenários APS e NZE [34]

Nota-se que o uso do hidrogênio verde não deve crescer de forma significante até depois de 2030. Inclusive, espera-se que a comercialização de aço produzido pelo ferro-esponja reduzido por hidrogênio verde não deve ocorrer até o início da próxima década. Isso acontece porque a obtenção do hidrogênio verde em larga escala tem dois desafios principais: o alto custo de produção comparado ao hidrogênio obtido pelo gás natural, e o acesso à energia elétrica renovável e barata para a eletrólise.

Apesar disso, o crescimento rápido esperado da produção do hidrogênio se deve ao fato dele ser considerado o vetor energético do futuro. Isso se deve principalmente por: ser possível produzir hidrogênio com baixa emissão de carbono, por meio de fontes de energia renováveis e de combustíveis fósseis; a infraestrutura requerida para produção e transmissão do hidrogênio ser semelhante à utilizada pelo setor de petróleo e gás e pelo seu papel na descarbonização da indústria, visto que o hidrogênio é uma das poucas opções que permite a descarbonização completa, particularmente em setores industriais cuja descarbonização não seja possível por outras fontes limpas de energia. [35]

A importância do hidrogênio na descarbonização da indústria significa que a descarbonização da produção do hidrogênio refletirá na indústria. Sendo assim, é necessário superar os dois obstáculos citados anteriormente: o alto custo do hidrogênio e o acesso à eletricidade de fonte renovável para a eletrólise. Na Figura 11 é possível observar a comparação do preço médio de fabricação do aço pela rota ferro-esponja-EAF, considerando como agente redutor o gás natural, o hidrogênio e o gás natural reformado com captura de carbono.

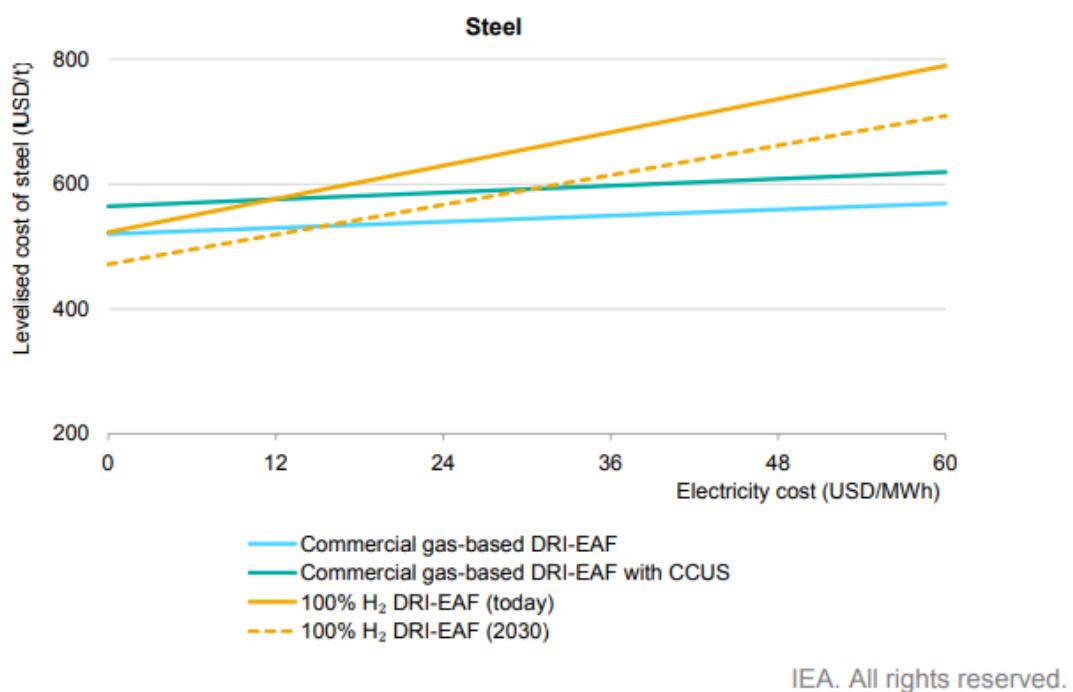


Figura 11 - Preço de produção do aço vs. Preço da energia elétrica para o ferro-esponja via GN e H<sub>2</sub> [34]

Conforme a Figura 11, é esperado que o preço de fabricação do aço com o DRI reduzido a hidrogênio diminua até 2030, principalmente devido a incentivos públicos para diminuir os custos do hidrogênio verde. Além disso, o uso do hidrogênio como agente redutor do ferro aparenta valer a pena em comparação ao uso do gás natural caso seja possível obter energia na faixa de 15 USD/MWh. Atualmente, o uso do hidrogênio sairia mais caro do que o uso do gás natural para qualquer valor de energia elétrica, mas pode valer a pena em relação ao gás natural com captura de carbono, para preços de energia até 12 USD/MWh. [34]

Devido à maior acessibilidade do gás natural em alguns países, ele é um importante insumo no período de transição da descarbonização da indústria. Várias empresas devem se apoiar no uso do gás natural nesse momento. Na Figura 12 é possível verificar as etapas na transição da tecnologia Midrex para a economia de hidrogênio. Atualmente, o processo Midrex NG utiliza gás natural para a redução do ferro-esponja e posterior utilização do DRI no forno elétrico. Esse processo já dispõe de infraestrutura que permite a substituição de até 30% do gás por hidrogênio.

O Midrex NG com adição de hidrogênio permitirá que sejam utilizadas misturas de gás natural e hidrogênio em qualquer proporção, com infraestrutura que permitirá a transição para até 100% hidrogênio com poucas modificações. Já o Midrex H<sub>2</sub> tem como meta a produção do DRI com 100% de hidrogênio. Os 3 processos permitem a utilização de mecanismos de captura de carbono. [33]



Figura 12 - Transição Midrex para a Economia de Hidrogênio [36]

A Tabela 3 detalha as etapas para a transição do Midrex para o uso de 100% de hidrogênio. Conforme observado, atualmente é utilizado o gás natural reformado como redutor do ferro, com uma mistura de 55% de hidrogênio e 35% de monóxido de carbono. Esse processo resulta em um produto composto de 2,5% de carbono, e com 0,5 tCO<sub>2</sub>/tDRI. [36]

Durante a transição, onde o gás natural deve ser substituído gradativamente por hidrogênio, espera-se que a proporção de H<sub>2</sub> aumente de 55% para 70%, com o CO se mantendo em 13% na etapa final. Nesse cenário, o produto seria o DRI contendo 0,5% de carbono e as emissões reduziriam para 0,15 tCO<sub>2</sub>/tDRI. Por fim, no projeto Midrex H<sub>2</sub>, espera-se que o gás redutor seja composto inteiramente por hidrogênio, resultando em um produto contendo 0% carbono, cujas emissões de CO<sub>2</sub> só existem caso o aquecedor do gás utilize combustíveis fósseis. Além dos benefícios do H<sub>2</sub> associados à produção de H<sub>2</sub>O na reação de redução do ferro, ele também possui maior poder calorífico e menor densidade que o CO, contribuindo para uma maior taxa de redução. [32][36]

Tabela 3 - Comparativo entre Midrex NG, Midrex NG com adição de hidrogênio e Midrex H2 [36]

Feed Gas		100% Natural Gas	Natural Gas replacement by Hydrogen			100% Hydrogen
			20%	50%	70%	
Reducing Gas	H <sub>2</sub>	55%	62%	72%	77%	100%
	CO	35%	28%	18%	13%	0%
	Others	10% (mostly CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> )				
H <sub>2</sub> /CO		1.6	2.2	4.0	5.9	n/a
Carbon in DRI		2.5% 4% w/ ACT	- 1.5%	- 1.0%	- 0.5%	0%
CO <sub>2</sub> emissions (kg <sub>CO2</sub> /t <sub>DRI</sub> ) *		500 < 250 w/ CCUS **	400	250	150	From heater (if fueled by hydrocarbons)

A empresa ArcelorMittal também traçou metas de migração do uso de gás natural para hidrogênio e expansão das plantas de forno arco elétrico que utilizam DRI. De acordo com ela, o preço da obtenção de hidrogênio na Europa varia entre 3,5 e 5 USD/kg e precisa cair para menos de 1 USD/kg para conseguir competir com o ferro-esponja reduzido por gás natural na Europa. No entanto, a empresa estima que, até 2030, o preço do hidrogênio verde deva reduzir para 1,5 USD/kg, indicando que o hidrogênio verde ainda necessitaria de incentivos públicos para se tornar competitivo com outras rotas de descarbonização do aço. [6]

Levando isso em consideração, a empresa traçou metas ousadas de obtenção de neutralidade de carbono na fabricação do aço até 2050. Para isso, ela deve se apoiar inicialmente na transição para a rota DRI-EAF, porém apoiados do gás natural para redução do ferro. A empresa participa de um consórcio que visa proporcionar o ambiente adequado no mercado para a implantação do uso do hidrogênio verde em grande escala, de maneira competitiva. No caso de o preço do hidrogênio reduzir os preços mais do que o projetado, ela pretende estar preparada para adequar suas plantas para o uso do hidrogênio. [6]

A empresa irá, ainda, transformar sua planta em Sestao, Espanha, na primeira planta siderúrgica a produzir aço neutro em carbono. A meta é que até 2025, a planta tenha a capacidade de produzir 1,6 milhões de toneladas de aço verde nos dois fornos elétricos já existentes, por meio da construção de uma unidade de redução direta do ferro pelo hidrogênio verde em Gijon, que transportará parte do ferro para Sestao, contratos de energia que garantam que a origem dela é renovável, e aumento do uso de sucata na matéria-prima. Esse projeto é essencial para que seja testada a

produção do aço sem adicional de carbono, e para a verificação dos potenciais gargalos dessa rota. [6]

Estima-se que sejam necessários 50 a 55kWh para a produção de 1kg de hidrogênio verde, e 50 kg de hidrogênio para a produção de 1 tonelada de aço. No caso da Alemanha, por exemplo, seriam necessários 100 TWh para descarbonizar por completo a indústria siderúrgica, o que aumentaria a demanda de energia total em 20%. Além disso, como já citado anteriormente, ainda existiria o desafio de obter essa energia de fontes renováveis. [35]

Dentre todos os desafios e obstáculos envolvidos na produção do hidrogênio verde, evidentemente o mais fácil de ser superado no Brasil é o referente a energia elétrica. O Brasil tem posição de destaque na produção de energia limpa, devido à sua capacidade de geração hidrelétrica. Em torno de 85% de sua geração é por fontes renováveis. Porém, devido às mudanças climáticas que vêm acometendo o mundo, as vulnerabilidades do setor hidrelétrico vêm sendo mais marcantes, principalmente após a crise energética enfrentada em 2021. [37]

Mesmo assim, alguns estudos indicam que o Brasil possui forte potencial em se tornar um dos líderes mundiais na produção de hidrogênio verde, devido ao seu potencial de geração eólica e solar. Conforme Figura 13, a projeção é que até 2040, a capacidade instalada de energia elétrica do Brasil cresça em 126%, e espera-se que a quantidade de energia produzida pelas fontes eólica e solar cresça de 12% para 47%. [38]

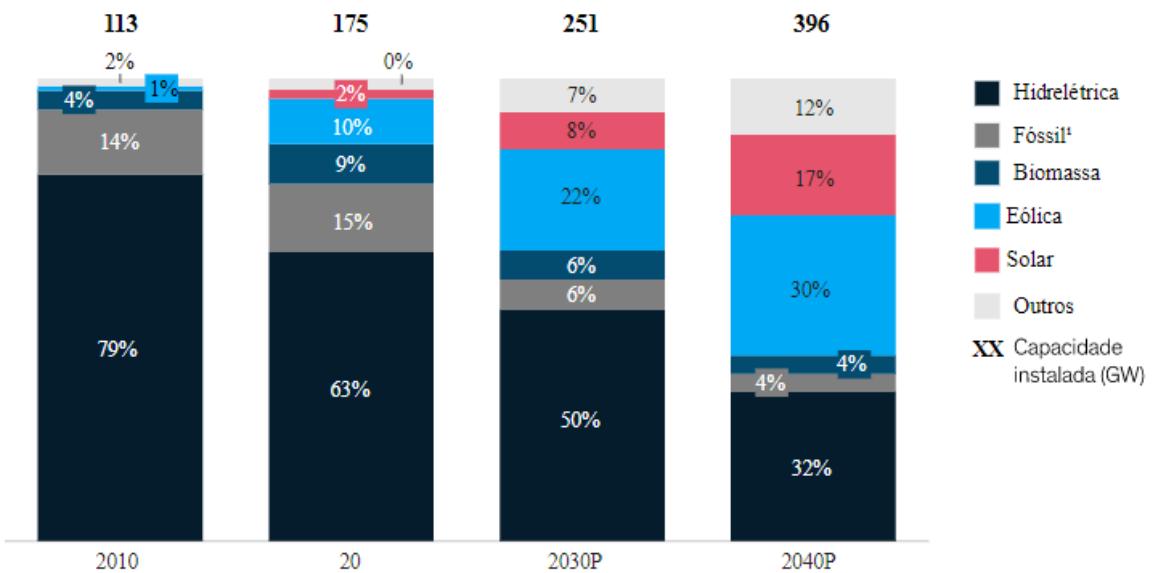


Figura 13 - Capacidade instalada de energia elétrica no Brasil por fonte (%)

[38]

No entanto, ainda não há incentivos fortes para a produção do aço neutro em carbono, nem para seu consumo. Apesar disso, o país caminha para tal, seguindo tendências internacionais. O mercado de carbono voluntário do país já está aquecido, e o país deve em breve iniciar a regulamentação desse mercado.

#### 4.4.1.1. Desafios na rota H<sub>2</sub> DRI-EAF

Conforme citado anteriormente, o uso do hidrogênio verde para a redução do ferro (e com o objetivo de redução de emissões de gases de efeito estufa) depende da disponibilidade econômica de hidrogênio verde, assim como a disponibilidade de energia elétrica verde, ou seja, de fontes renováveis. Esses dois fatores são essenciais para a competitividade do hidrogênio nesse mercado. Dados da ArcelorMittal Europe indicam que a adoção da rota de hidrogênio azul-EAF resultaria num aumento de 50% do custo do processo, e a adoção da rota de hidrogênio verde aumentaria os custos em aproximadamente 80%. No entanto, esses custos envolvem o investimento em infraestrutura de energia renovável, o que impacta de forma considerável no preço. [6]

Em um cenário de incentivo de políticas públicas, possivelmente envolvendo o pagamento de taxas altas relacionadas à emissão de CO<sub>2</sub>, e considerando a adoção em larga escala da rota via hidrogênio verde, outros desafios devem surgir, sendo o principal deles: as consequências associadas ao uso de 0% C DRI. Será necessário encontrar alternativas de carbono para a composição do ferro-esponja, dado que o processo de produção do aço no forno a arco elétrico necessita de DRI com 1,5 a 3% C para: redução da wustita para o ferro metálico, produção de escória espumante e obtenção de energia química, dado que 30 a 50% do total de energia consumida no forno a arco elétrico é de origem química. [4][39]

Sendo assim, ainda é necessário obter fontes alternativas de carbono e/ou de fontes de energia limpa, para fornecer soluções que resultem na produção da escória espumante sem o uso do carbono como agente, compensar a falta do carbono como fonte de energia química, e se certificar de que não há reduções significativas na tensão de escoamento do aço formado, devido à maior formação da wustita. É possível, inclusive, que o próprio design do forno elétrico deva evoluir, para que consiga utilizar o DRI sem carbono, ou que surja uma nova tecnologia que possa tanto reduzir o ferro, quanto realizar o seu refino, em um equipamento só. Além disso, evidentemente se torna necessário o acesso à energia elétrica de fontes renováveis, para que o benefício ambiental adquirido por meio do uso do hidrogênio verde não seja anulado. [4]

#### **4.5. Cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> na siderurgia**

Em sua grande parte, a divulgação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) não é obrigatória para as empresas. No entanto, nos últimos anos a discussão à respeito da redução da emissão de GEE tem sido bem frequente, envolvendo acordos internacionais de metas para a redução das emissões. Enquanto ainda não há um padrão universal, existem algumas metodologias propostas, baseadas em painéis de discussão sobre clima.

O GHG Protocol, dos Estados Unidos, desenvolveu um método de quantificação de gases de efeito estufa que vai de acordo com a norma ISO 14064, que oferece uma estrutura de cálculo das emissões. O protocolo proposto vai de acordo com as discussões realizadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), uma organização internacional criada pela ONU para discutir

mudanças climáticas, assim como às normas de cálculo das emissões realizadas por ele. [40]

O IPCC desenvolveu, em 1996, uma série de métodos para a quantificação das emissões de CO<sub>2</sub>, separadas por setor. No caso da metodologia proposta para as emissões do setor e ferro e aço, existem 3 metodologias, chamadas de Tier 1, 2 e 3. A diferença entre elas é, basicamente, a profundidade de detalhes exigidos para o cálculo, e os fatores de emissão de carbono considerados para o cálculo. Na metodologia IPCC, é possível calcular as emissões em cada etapa do processo (sinterização, coqueificação e produção do ferro e aço). [41]

O GHG Protocol divide as emissões de GEE em três escopos. As emissões de escopo 1 são as chamadas de emissões diretas, que são resultado da operação da própria empresa, o que inclui por exemplo o consumo de combustíveis que emitem gases de efeito estufa. Já as emissões de escopo 2 correspondem às emissões indiretas, provenientes do consumo de energia elétrica ou térmica da empresa. Por fim, as emissões de escopo 3 correspondem a todas as emissões indiretas que não são provenientes do consumo de energia elétrica, mas associadas à operação da empresa. Conforme o GHG Protocol, a divulgação das emissões de escopo 3 é opcional. [40]

De forma análoga, as emissões de CO<sub>2</sub> também podem ser divididas nos três escopos propostos pelo GHG Protocol. Para o cálculo das emissões de gás carbônico desse trabalho, foi utilizada uma planilha elaborada pela *Worldsteel Association*, da qual mais de 160 empresas de siderurgia de 60 países diferentes fazem parte, dentre elas a própria empresa analisada nesse trabalho. A WSA elaborou uma metodologia específica para a indústria do ferro e aço, que calcula as emissões de CO<sub>2</sub> apenas, porque elas representam 93% das emissões de GEE da indústria siderúrgica. A empresa utiliza essa metodologia como base para as metas propostas de redução de emissão de GEE. No próprio site da WSA é possível obter uma planilha, utilizada para esse cálculo, assim como um manual de instruções. [42]

A metodologia proposta pela WSA serviu como base para a criação das normas ISO 14404, que definem a metodologia para calcular a intensidade de gás carbônico emitido na indústria de ferro e aço. Essa metodologia permite que as emissões de gases de efeito estufa sejam contabilizadas na unidade tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente, e possibilita a comparação de emissões entre diferentes empresas, levando em

consideração que elas utilizariam dos mesmos parâmetros e limites para o cálculo das emissões. Enquanto o método da WSA possibilita a comparação de emissões entre empresas por meio da padronização do cálculo, a família de normas ISO 14404 permite que a contabilização das emissões das empresas seja separada por rotas de processo, como a rota BF-BOF, Sucata-FEA, DRI-EAF. [43]

No Brasil, existe o Programa Brasileiro GHG Protocol, responsável pela adaptação do GHG Protocol no Brasil para o desenvolvimento de técnicas padronizadas do cálculo das emissões de GEE. O cálculo proposto pela WSA é verificado conforme as especificações propostas pelo Programa Brasileiro e pela norma ISO 14064.

## 5. Materiais e Métodos

Para calcular a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub>, em toneladas, será utilizado o método proposto pela WSA, que consiste em um balanço de massa macroscópico da Usina, onde são levados em consideração todos os produtos que possuem carbono em sua composição. Para o cálculo, deve-se multiplicar as toneladas de insumos consumidos por um fator de emissão equivalente, assim como as toneladas de materiais produzidos pelo seu respectivo fator de emissão. O fato de a análise ser macroscópica indica que o consumo e produção de vários produtos dentro da Usina Integrada são considerados indiretamente, como por exemplo a quantidade de ferrogusa produzido, que é contabilizada por meio da entrada de carvão mineral, minério de ferro, etc.

A Figura 14 contém um esquema do balanço de massa da usina, também representado pela equação abaixo, onde t<sub>CO<sub>2</sub></sub> é a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido, em tonelada; t<sub>m</sub> é a quantidade de material consumido (podendo ser em tonelada, MWh e outros) e t<sub>p</sub> a quantidade de material produzido; FE<sub>m</sub> é o fator de emissão em tCO<sub>2</sub>/unidade material consumido e FE<sub>p</sub> o fator de emissão em tCO<sub>2</sub>/unidade produto produzido.

$$t_{CO_2} = \sum FE_m \cdot t_m - \sum FE_p \cdot t_p$$

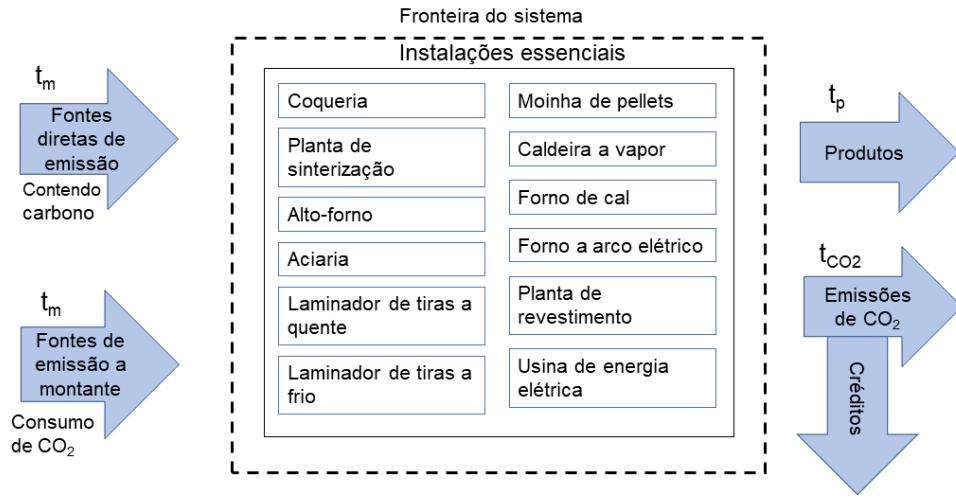


Figura 14 - Metodologia de cálculo de emissões de CO<sub>2</sub> – adaptado [42]

Ao dividir a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido pela quantidade de aço produzido, obtém-se a intensidade de CO<sub>2</sub>, conforme equação abaixo. Dessa forma, é possível comparar entre empresas ou em diferentes cenários quanto de CO<sub>2</sub> é emitido para a produção de 1 tonelada de aço bruto.

$$I_{CO_2} = \frac{t_{CO_2}}{t_{aço}}$$

I<sub>CO<sub>2</sub></sub> = intensidade de CO<sub>2</sub>;

t<sub>CO<sub>2</sub></sub> = tonelada de CO<sub>2</sub> emitido;

t<sub>aço</sub> = tonelada de aço bruto produzido.

Na planilha da WSA, cada linha representa um material que foi consumido ou vendido, e nelas devem ser inseridas essas quantidades, conforme exemplo na Figura 15. Nesse exemplo, na primeira linha, deve-se incluir na terceira coluna a quantidade de minério de ferro que foi comprada e/ou utilizada, e na quarta coluna a quantidade que foi vendida, em toneladas seca. Na quinta coluna, há a quantidade de carbono presente em 1 tonelada seca de minério de ferro, e na sexta coluna, o seu equivalente em energia. Essas colunas correspondem ao chamado “Site Data” na planilha. [42]

Materials /Energies	Unit	Site data			
		Purchased Procured	Sold Delivered	C content Site measurement	Energy Equivalent
		t C/unit	GJ/unit		
Iron ore	dry t			0,010	
Coking coal	dry t			0,835	32,200
BF injection coal	dry t			0,806	31,100
Sinter/BOF coal	dry t			0,760	29,300
Steam coal	dry t			0,672	25,900

Figura 15 - Site data planilha WSA

Nas colunas à direita do *Site Data*, representados na Figura 16, estão os fatores de conversão associados a esses materiais, sendo o primeiro o fator de emissão de CO<sub>2</sub> associado aos escopos 1 e 2, e o da direita o fator associado às emissões à montante, de escopo 3. A fonte de determinação desses fatores de emissão, assim como dos itens considerados no cálculo das emissões são explicados no tópico 5.1. [42]

Conversion factors	
Emission Factor	Upstream CO <sub>2</sub> value
t CO <sub>2</sub> /unit	t CO <sub>2</sub> /unit
0,037	
3,060	
2,953	
2,785	
2,462	

Figura 16 - Fatores de conversão

Por fim, conforme Figura 17, o resultado consistirá nas emissões de CO<sub>2</sub> separadas por material consumido e/ou vendido, e pelos escopos de emissão. A última coluna traz, também, o valor da energia associada, baseada no fator de emissão energético equivalente. [42]

Calculation results				
Scope 1 Direct emissions	Scope 1.1 emissions	Scope 2 emissions	Scope 3 emissions	Total Energy
t CO <sub>2</sub>	t CO <sub>2</sub>	t CO <sub>2</sub>	t CO <sub>2</sub>	TJ
-				-
-				-
-				-
-				-
-				-

Figura 17 - Resultados dos cálculos

Existe na planilha um campo para preencher a quantidade de aço produzida no período considerado, separado por processo. A última linha da planilha exibe as emissões da usina separadas por escopo, a emissão total de CO<sub>2</sub> da usina e a intensidade de carbono por tonelada de aço produzido. [42]

### 5.1. Fatores de Emissão

Na Tabela 4, abaixo, estão listados todos os itens que devem ser considerados para as emissões de escopo 1, além do fator de emissão associado, a referência do fator e a unidade de medida associada ao material. Todos os fatores de emissão foram estruturados por um painel de especialistas da *Worldsteel*, e são amplamente utilizados ao redor do mundo.

Nas referências da Tabela 4, onde está “worldsteel” entende-se o painel de especialistas da *Worldsteel*, por ISSF entende-se o painel de especialistas da *International Stainless Steel Forum*, IEA é a Agência Internacional de Energia, IPCC é o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, ISO14404 é a norma internacional que define cálculo de emissão de CO<sub>2</sub> na siderurgia e EN 19694 é a norma europeia que define o cálculo de emissão de gases de efeito estufa. [42]

Tabela 4 - Fatores de Emissões Diretas (Escopo 1) [42]

Item	Unit	Default carbon content tC/unit)	Default ncv (GJ/unit)	Conversion factor (tCO <sub>2</sub> /GJ)	Direct Emission factor (tCO <sub>2</sub> /unit)	Reference
Iron ore	dry t	0.010		0.000	0.037	worldsteel
Coking coal	dry t	0.835	32.200	0.095	3.060	IEA
BF injection coal	dry t	0.806	31.100	0.095	2.953	IEA
Sinter/BOF coal	dry t	0.760	29.300	0.095	2.785	IEA
Steam coal	dry t	0.672	25.900	0.095	2.462	IEA
EAF coal	dry t	0.889	30.100	0.108	3.257	IEA
SR/DRI coal	dry t	0.806	31.100	0.095	2.953	worldsteel
Coke	dry t	0.889	30.100	0.108	3.257	worldsteel
Charcoal	dry t		18.800			worldsteel
Petroleum coke	t	0.850	31.935	0.098	3.115	EN 19694
Used plastic	t		46.000	0.053	2.416	EN 19694
Used tires	t		35.000	0.063	2.199	EN 19694
Heavy oil	m <sup>3</sup>		37.700	0.077	2.907	IEA
Light oil	m <sup>3</sup>		35.100	0.074	2.601	IEA
Kerosene	m <sup>3</sup>		34.700	0.072	2.481	IEA
LPG	t		47.300	0.063	2.985	IEA
LNG	k.Nm <sup>3</sup>	0.550	35.900	0.056	2.015	worldsteel
Natural gas	k.Nm <sup>3</sup>	0.550	35.900	0.056	2.015	IEA
Limestone	dry t	0.120			0.440	IPCC
Crude dolomite	dry t	0.130			0.476	worldsteel
EAF/BOF electrodes	t				3.663	IPCC
Low carbon iron units	t	0.047	20.900	0.008	0.172	worldsteel
Pig iron	t	0.047	20.900	0.008	0.172	worldsteel
Cold iron	t	0.047	20.900	0.008	0.172	ISO14404
Ni pig iron	t	0.005			0.018	ISSF
Charcoal based pig iron	t	0.047	20.900	0.008	0.172	worldsteel
Biomass	t	0.476	15.600			IPCC
Gas based DRI	t	0.020	14.100	0.005	0.073	IPCC
Coal based DRI	t	0.020	17.900	0.004	0.073	IPCC
Low carbon DRI	t	0.020	14.100	0.005	0.073	worldsteel
Ferro-Nickel	t	0.010			0.037	ISSF
Nickel oxides	t	0.001			0.004	ISSF
Nickel metal	t	0.001			0.004	ISSF
Ferro-Chromium	t	0.075			0.275	ISSF
Molybdenum oxides	t	0.001			0.004	ISSF
Ferro-Molybdenum	t	0.005			0.018	ISSF
Ferro-Manganese	t	0.050			0.183	ISSF
Ferro-Silicon	t	0.001			0.004	IPCC
Silico-Manganese	t	0.005			0.018	IPCC
Silicon (Metal)	t	0.001			0.004	IPCC
Coke oven gas	k.Nm <sup>3</sup>	0.228	19.000	0.044	0.835	worldsteel
Blast furnace gas	k.Nm <sup>3</sup>	0.243	3.300	0.270	0.890	worldsteel
BOF gas	k.Nm <sup>3</sup>	0.413	8.400	0.180	1.513	worldsteel
Coal tar	t		37.000	0.092	3.389	WRI
Benzol	t		40.570	0.083	3.382	worldsteel

As células pintadas de dourada são modificáveis. Para tal, basta que a empresa tenha a medição da quantidade de carbono presente em seus materiais, assim como o poder calorífico. Para o presente trabalho, serão utilizados os fatores de emissão calculados e disponibilizados pela planilha. As células pintadas de azul (fatores de emissão) podem ser alterados indiretamente ao alterar as células douradas.

Na Tabela 5, abaixo, estão os fatores de emissão e materiais considerados para os cálculos das emissões de escopo 2 e 3, de forma análoga à Tabela 4. Os valores relacionados à eletricidade, pintados de roxo, são calculados baseado na

média internacional de emissão de CO<sub>2</sub> no consumo de combustíveis, fornecidos pela IEA em 2006. No entanto, na planilha da WSA existe um campo onde é possível inserir os fatores de emissão regionais ou associados à indústria em questão. Para esse trabalho, o fator de emissão associado ao consumo de energia elétrica será alterado, visto que a matriz energética do Brasil é, em sua maior parte, renovável, o que reduz consideravelmente as emissões associadas. [42]

Tabela 5 - Fatores de Emissão à Montante (Escopos 2 e 3) [42]

Item	Unit	Energy Equiv. Value (GJ/unit)	Upstream Emission Factor (tCO <sub>2</sub> /unit)		Reference
			Scope 2	Scope 3	
Coke	dry t			0.224	worldsteel
Heavy oil	m <sup>3</sup>			0.276	IEA
Light oil	m <sup>3</sup>			0.247	IEA
Kerosene	m <sup>3</sup>			0.247	IEA
LNG	k.Nm <sup>3</sup>			0.665	worldsteel
Green hydrogen	t			0.000	worldsteel
Blue hydrogen	t			1.800	worldsteel
Grey hydrogen	t			19.800	Verma & Kumar, 2015
Burnt Lime	t	4.500		0.950	worldsteel
Burnt Dolomite	t	4.500		1.100	worldsteel
Sinter	t	2.450		0.262	worldsteel
Pellets	t	2.100		0.137	worldsteel
EAF/BOF electrodes	t			0.650	worldsteel
Low carbon iron units	t	20.900		1.855	worldsteel
Pig iron	t	20.900		1.855	worldsteel
Cold iron	t	20.900		1.855	worldsteel
Ni pig iron	t			5.200	ISSF
Charcoal based pig iron	t	20.900		1.855	worldsteel
Gas based DRI	t	14.100		0.780	worldsteel
Coal based DRI	t	17.900		1.210	worldsteel
Low carbon DRI	t	14.100		0.780	worldsteel
Ferro-Nickel	t			8.676	ISSF
Nickel oxides	t			20.279	ISSF
Nickel metal	t			13.579	ISSF
Ferro-Chromium	T			5.987	ISSF
Molybdenum oxides	t			6.500	ISSF
Ferro-Molybdenum	t			8.500	ISSF
Ferro-Manganese	t			2.789	ISSF
Ferro-Silicon	t			4.000	IPCC
Silico-Manganese	t			1.400	IPCC
Silicon (Metal)	t			5.000	IPCC
Electricity	MWh	9.800	0.504		IEA
Steam	t	3.800	0.195		IEA
Oxygen	k.Nm <sup>3</sup>	6.900		0.355	IEA
Nitrogen	k.Nm <sup>3</sup>	2.000		0.103	IEA
Argon	k.Nm <sup>3</sup>	2.000		0.103	worldsteel
Waste heat	GJ	1.000		0.051	worldsteel
Coke oven gas	k.Nm <sup>3</sup>	19.000	0.977		worldsteel
Blast furnace gas	k.Nm <sup>3</sup>	3.300	0.170		worldsteel
BOF gas	k.Nm <sup>3</sup>	8.400	0.432		worldsteel
Ethanol	m <sup>3</sup>	23.575		1.494	IPCC
Methanol	m <sup>3</sup>	15.662		1.369	IPCC
Ammonia	t	37.500		1.600	IPCC

Os fatores de emissão da geração de energia elétrica no Brasil são disponibilizados em relatórios no site do Ministério de Ciência e Tecnologia e

correspondem à energia gerada e disponibilizada no Sistema Interligado Nacional. No entanto, o valor de 2020 não estava disponível. Portanto, foi utilizada uma média entre os valores de 2019 e 2021. Em 2019, o fator de emissão associado, em tCO<sub>2</sub>/MWh foi 0,1020 e em 2021 foi 0,0540 tCO<sub>2</sub>/MWh. Sendo assim, foi considerada a média de 0,087 tCO<sub>2</sub>/MWh para esse trabalho. O fator de energia equivalente considerado foi o de 3,6 GJ/MWh. [44]

Para a realização desse trabalho, a planilha foi utilizada duas vezes: uma para calcular as emissões na Usina atualmente, e a segunda para calcular as emissões estimadas da usina em um cenário que o Alto-Forno B é substituído por um forno a arco elétrico à base de DRI via hidrogênio verde, mantendo a capacidade produtiva da usina.

## 5.2. Dados considerados

### 5.2.1. Cenário atual

Para o cálculo das emissões no cenário atual, foram utilizados dados reais, publicados por uma empresa de siderurgia de grande porte, dentre eles: insumos consumidos, energia consumida, produção de aço bruto e produção de aço EAF. Na Tabela 6 se encontram os valores considerados para a quantidade de aço produzida na planilha e na Tabela 7 as quantidades de todos os materiais consumidos considerados para o cálculo, assim como insumos energéticos. No cenário atual, 5,9% do aço produzido é via rota EAF. A Usina contém unidades de fábrica de cal, sinterização, baterias de coque, 2 alto-fornos e conversores a oxigênio (além das unidades de conformação do aço). [45]

Tabela 6 - Produção de aço - 2020

Produtos produzidos	Unidade	Quantidade
Produção de aço bruto BOF	t	3.591.200,00
Produção de aço bruto EAF	t	224.890,00
Produção de aço bruto Total	t	3.816.090,00

Tabela 7 - Materiais consumidos - Siderurgia 2020

Materiais consumidos	Unidade	Quantidade
Minério de Ferro	t base seca	3.705.614,37
Carvão metalúrgico	t base seca	989.848,21
Injeção de carvão no Alto Forno	t base seca	468.581,16
Coque externo	t base seca	692.991,14
Calcário	t base seca	902.689,00
Dolomita crua	t base seca	509.668,00
Pellets	t	1.393.692,75
Eletrodo / Eletrodos EAF	t	618,00
Ferro Gusa	t	9.165,00
GLP	t base seca	154,41
Gás Natural	t	341.084,40
Eletricidade comprada da rede	GJ	3.597.210,00

### 5.2.2. Cenário hipotético

Nesse cenário, o alto-forno B da Usina seria substituído por um forno a arco elétrico. São analisados dois casos – um em que a carga do FEA é o DRI reduzido por hidrogênio verde, e o outro em que a carga é composta 100% de sucata. Para determinar as quantidades a serem consideradas como insumos de entrada, devem ser realizados alguns cálculos e estabelecidas algumas premissas, que serão detalhadas nos resultados e discussão.

## 6. Resultados e Discussão

### 6.1. Dados de produção no cenário hipotético

Para calcular a quantidade de aço produzido por processo, estabelecidos na Tabela 8, levou-se como premissa que o alto-forno B é responsável pela produção de 40% do ferro-gusa total da usina. Para manter a capacidade produtiva da usina no cenário do forno elétrico, entende-se que a quantidade total de aço produzido será a mesma. No entanto, adota-se que será produzido 40% menos aço via rota BOF (portanto 1.416.480 toneladas a menos), e que essa mesma quantia será produzida via rota EAF. Sendo assim, nesse cenário, 43,54% do aço produzido é pela rota EAF.

Tabela 8 - Produção - Cenário Hipotético

<b>Produtos produzidos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Produção de aço bruto BOF	t	2.154.720,00
Produção de aço bruto EAF	t	1.661.370,00
Produção de aço bruto Total	t	3.816.090,00

## 6.2. Dados de consumo do cenário hipotético

### 6.2.1. Carvão metalúrgico, coque externo e PCI

Para determinar as quantidades de carvão metalúrgico, coque externo e carvão injetado no alto-forno, foram utilizados dados obtidos do Anuário Estatístico 2021 do Instituto Aço Brasil, cujos dados referem-se ao ano de 2020. Nele contém valores de coke rate médio de 2020, PCI rate e produção de gusa da empresa que é objeto de estudo do trabalho, conforme Tabela 9. [46]

Tabela 9 - Dados de coke rate, PCI rate e produção de gusa [46]

<b>Dado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Coke rate	kg/t gusa	358
PCI rate	kg/t gusa	160
Produção de gusa	t	3.379.000

Adotando a premissa de que o alto-forno B foi responsável por 40% da produção, é possível determinar a quantidade de ferro-gusa produzido, conforme Tabela 10. Por meio do coke rate e PCI rate, foram determinados valores hipotéticos para o consumo de coque e injeção de carvão pulverizado no alto-forno B, conforme Tabela 11. Será considerado que o consumo de coque do alto-forno B será descontado do coque externo, portanto a produção de coque interno será a mesma e, por consequência, a quantidade de carvão metalúrgico consumido pela Usina também. Dado que nesse cenário, o alto-forno 2 não existirá e o processo DRI-EAF não requer esses materiais, os valores a serem considerados para coque e injeção de carvão são os do cenário atual descontado dos valores do alto-forno B, conforme Tabela 12.

Tabela 10 - Produção de Gusa do Alto-Forno B [46]

<b>Produção de Gusa AF-B (t)</b>
1.351.600,00

Tabela 11 - Consumo de Coque e PCI no Alto-Forno 2

<b>Dado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Consumo AF2</b>
Coque externo	t base seca	483.872,80
Injeção de carvão no Alto Forno	t base seca	216.256

Tabela 12 - Dados de coque, carvão e PCI considerados na planilha WSA – Cenário Hipotético

<b>Dado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Consumo Usina</b>
Coque externo	t base seca	209.118,34
Injeção de carvão no Alto Forno	t base seca	252.325,16
Carvão metalúrgico	t base seca	989.848,21

### 6.2.2. Minério de Ferro, Pellet, Calcário e Dolomita

O calcário e a dolomita são usados no setor de siderurgia da empresa nas estações: fábrica de cal, sinterização e aciaria. Sabendo que esses 3 processos estão diretamente relacionados com a carga do alto-forno e à aciaria, assume-se que o consumo desses produtos associados à produção do gusa no alto-forno B equivale a 40% do consumo total.

Para determinar a quantidade de minério de ferro e pellets envolvidos na produção de gusa do alto-forno B, considerou-se que a carga metálica do alto-forno é composta por minério de ferro, pellets e sínter. O sínter por sua vez é produzido nas unidades de sinterização da Usina. Dado que o sínter não é um dos dados de entrada da planilha, é necessário estimar a quantidade de minério de ferro necessária para a produção desse sínter, porque assume-se que a produção nas unidades de sinterização reduzirá nesse cenário, para adequar-se à demanda.

Primeiro foi determinada uma carga metálica hipotética para o alto-forno, conforme Tabela 13, obtida de um relatório desenvolvido por funcionários das empresas ArcelorMittal Tubarão e Vale, que determinava a proporção de cada item da carga metálica a ser usada nos alto-fornos da ArcelorMittal a partir de 2006. [47]

Tabela 13 - Carga metálica hipotética AF-B [47]

Carga metálica	Proporção
Sinter	51%
Pellets	39%
Minério de Ferro (Lump Ore)	10%

Em seguida, foram estabelecidas as quantidades de ferro metálico em cada uma das cargas, assim como no produto (o ferro-gusa), por meio de outros trabalhos já realizados com o assunto, conforme Tabela 14 [48]. Com esses valores, é possível fazer um balanço de massa e calcular a quantidade de sínter, pellet e minério de ferro consumidos pelo alto-forno 2 em 2020.

Tabela 14 - Quantidade de ferro na carga metálica e no gusa [48]

Carga metálica	% de Fe
Sinter	57,60%
Pellets	65,50%
Minério de Ferro (Lump Ore)	61,00%
Ferro-Gusa	94,00%

O balanço de massa é realizado conforme as equações abaixo:

$$\text{quantidade de Ferro na carga} = 94\% * t_{gusa}$$

Conforme Tabela 10, a quantidade total de gusa é 1.351.600,00 toneladas.

$$\text{quantidade de Ferro na carga} = 94\% * 1.351.600 = 1.270.504 \text{ toneladas}$$

Dado que o ferro presente na carga só vem do sínter, pelota e minério de ferro, e utilizando os dados da Tabela 13 e Tabela 14, é possível determinar a quantidade da carga, em massa, por meio de um balanço de massa do ferro, onde  $t_{carga}$  é a massa da carga, em toneladas;  $\%i$  é a fração mássica do material  $i$  na carga; e  $\%Fe_i$  é a fração mássica do ferro no material  $i$ .

$$Fe_{carga} = Fe_{gusa} = 1.270.504$$

$$(\%Sinter * \%Fe_{sinter} * t_{carga} + \%Pelota * \%Fe_{pelota} * t_{carga} + \%Lump\ ore \\ * \%Fe_{lump\ ore} * t_{carga}) = 1.270.504$$

$$(51\% * 57,6\% * t_{carga} + 39\% * 65,5\% * t_{carga} + 10\% * 61\% * t_{carga}) = 1.270.504 \\ t_{carga} = 2.082.076,7$$

Por fim, multiplicando a massa total da carga pelas respectivas frações mássicas, obtém-se as quantidades consumidas de sínter, minério de ferro e pellets consumidas pelo alto-forno nesse cenário, resumidos na Tabela 15.

Tabela 15 - Carga metálica AF-B em 2020 - Cenário Hipotético

Material	Quantidade (t)
Sinter	1.061.859,10
Pelota	812.009,90
Minério de Ferro (Lump Ore)	208.207,67

Após a obtenção desses dados, ainda é necessário determinar quanto minério de ferro foi utilizado para a obtenção das 1.061.859,10 toneladas de sínter. Para isso, foram considerados os dados de entrada de minério de ferro e saída de sínter de referências, que estabeleceram que a relação minério de ferro/sínter é 919,48kg minério/1 tonelada sinter. Portanto, a quantidade de minério de ferro associada à produção do sínter para o AF-B, assim como a quantidade de minério consumidas na carga do AF-B estão sintetizados na Tabela 16. [49]

Tabela 16 - Consumo de minério de ferro associado ao alto-forno B

Material	Quantidade (t)
Minério de Ferro no AF-B	208.207,67
Minério de Ferro para Produção do Sinter	976.358,20
<b>Total</b>	<b>1.184.565,87</b>

Dentre todos os materiais citados nesse tópico, o único que seria utilizado para a produção do aço na rota DRI-EAF é o minério de ferro, que passa pelo forno de redução direta e se transforma em ferro-esponja. Os dados de quantas toneladas de minério de ferro são necessárias para a produção do aço após a obtenção do DRI

pelo hidrogênio verde são limitados, no entanto utilizou-se o valor de conversão de 1.375 quilos de minério de ferro necessários para a produção de 1.000 quilos de DRI, obtidos de um estudo da Índia [50], e a conversão de 90% de DRI em aço (100 toneladas de DRI produzem 90 toneladas de aço) [20].

Considerando que serão produzidas 1.436.480,00 toneladas de aço nesse forno, são necessárias pelo menos 1.596.089 toneladas de DRI e, por sua vez, 2.194.622 toneladas de minério de ferro.

Já no caso da rota pela sucata, deve-se apenas descontar o minério de ferro associado ao alto-forno 2 para os cálculos, e não se deve incluir nenhum outro valor, visto que a sucata não é um material considerado no cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> na planilha. Sendo assim, considerando as quantidades dos produtos minério de ferro, calcário, dolomita crua e pellets, o único valor que difere entre a rota DRI e sucata é o de minério de ferro, pois na rota da sucata não é necessário considerar as 2 milhões de toneladas que são utilizadas na produção do DRI.

Por fim, na Tabela 17 encontram-se as quantidades de: minério de ferro, pelota, calcário e dolomita a serem consideradas no cenário hipotético.

Tabela 17 - Dados de minério de ferro, calcário, dolomita crua e pellets considerados na planilha WSA – Cenário Hipotético

<b>Dado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Consumo Usina (rota DRI)</b>	<b>Consumo Usina (rota sucata)</b>
Minério de Ferro (Lump Ore)	t base seca	4.715.670,72	2.521.048,50
Calcário	t base seca	541.613,40	541.613,40
Dolomita crua	t base seca	305.800,80	305.800,80
Pellets	t	581.682,85	581.682,85

### 6.2.3. Hidrogênio verde e eletrodos de grafite

Para determinar a quantidade de hidrogênio consumido para a produção do DRI, foi considerada a premissa que são necessários 50 kg de hidrogênio verde para produzir 1 tonelada de aço [24][35][24]. Portanto, para a produção das 1.436.480,00 toneladas de aço são consumidas 71.824,00 toneladas de hidrogênio verde. O fator de emissão do hidrogênio é 0, portanto sua função na planilha está associada apenas à intensidade energética do processo.

Para os eletrodos, foi considerado os próprios dados da empresa. Dado que em 2020 foram consumidas 618 toneladas de eletrodos de grafite para a produção de 224.890,00, a razão equivalente é 2,75kg/taco. Esse valor, ao ser multiplicado pela produção total de aço considerada pelo EAF (1.661.370,00 toneladas) e resulta em 4.565,46 toneladas de eletrodos de grafite consumidos. Os dados estão consolidados na Tabela 18.

Tabela 18 - Consumo de eletrodos de grafite e hidrogênio verde - Cenário Hipotético

<b>Dado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Consumo Usina (rota DRI)</b>	<b>Consumo Usina (rota sucata)</b>
Eletrodo / Eletrodos EAF	t	4.565,46	618,00
Hidrogênio verde	t	71.824,00	0,00

#### 6.2.4. Consumo de Eletricidade

O consumo de eletricidade da rede não foi alterado no cenário hipotético porque é adotada a premissa que, mesmo com o aumento no consumo, a empresa teria portfólio de energia renovável suficiente, advinda das suas novas aquisições energética. A energia produzida em usinas hidrelétricas não emite gases de efeito estufa, portanto não precisa ser contabilizada para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub>. Ressalva-se que, para analisar a intensidade energética do processo, esse valor deve ser considerado. O total de eletricidade a mais consumida caso a produção de hidrogênio fosse realizada na planta é estimada em 3.591.200 MWh no ano [35] e para a produção do aço no forno elétrico 833.158 MWh [51]. Visto que a maior parte da eletricidade consumida na rota BF-BOF é destinada à laminação, não foi descontada a eletricidade consumida pelo AF2 nesse trabalho.

#### 6.2.5. Dados consolidados – Cenário hipotético

Finalmente, na Tabela 19 estão os dados de materiais consumidos considerados para o cálculo das emissões de GEE no cenário hipotético. Os dados de consumo de gás natural não foram alterados, porque a maior parte desse consumo é destinado à laminação e à produção de energia na Central de Cogeração, que não são levados em consideração nesse trabalho.

Tabela 19 - Dados consolidados de consumo - Cenário Hipotético

Materiais consumidos	Unidade	Quantidade (Rota DRI)	Quantidade (Rota Sucata)
Minério de Ferro	t base seca	4.715.670,72	2.521.048,50
Carvão metalúrgico	t base seca	989.848,21	989.848,21
Injeção de carvão no Alto Forno	t base seca	252.325,16	252.325,16
Coque externo	t base seca	209.118,34	209.118,34
Calcário	t base seca	541.613,40	541.613,40
Dolomita crua	t base seca	305.800,80	305.800,80
Pellets	t	581.682,85	581.682,85
Eletrodo / Eletrodos EAF	t	4.565,46	618,00
Ferro Gusa	t	9.165,00	9.165,00
GLP	t base seca	154,41	154,41
Gás Natural	t	341.084,40	341.084,40
Eletricidade comprada da rede	GJ	3.597.210,00	3.597.210,00
Hidrogênio verde	t	71.824,00	0,00

### 6.3. Emissões de CO<sub>2</sub>

A Figura 18 contém uma parte da planilha da WSA, preenchida com os dados reais de uma siderúrgica de grande porte, ocultando as linhas de insumos não utilizados e as colunas dos fatores de conversão e de emissão de cada material. Logo, ela contém os insumos, as quantidades consumidas de cada um deles, e as emissões de CO<sub>2</sub> associadas a cada um, separadas por escopo.

Foi necessário realizar a conversão do consumo de gás natural, pois a entrada do dado foi em tonelada, mas na planilha a unidade considerada é Nkm<sup>3</sup>, ou seja, Ndam<sup>3</sup>, em que N indica a unidade de medida em condições normais (ou padrões: 1 atm, 0°C, 0% de umidade relativa). Utilizando a densidade do gás natural é possível fazer essa conversão, de 0,74 kg/m<sup>3</sup>. Além disso, é necessário converter o consumo de energia elétrica em GJ para MWh, utilizando o fator 3,6 GJ/MWh.

Materials /Energies	Unit	Site data		Calculation results		
		Purchased Procured	Scope 1 Direct emissions	Scope 1.1 emissions	Scope 2 emissions	Scope 3 emissions
		t CO <sub>2</sub>	t CO <sub>2</sub>	t CO <sub>2</sub>	t CO <sub>2</sub>	t CO <sub>2</sub>
Iron ore	dry t	3.705.614	137.108			-
Coking coal	dry t	989.848	3.028.936			-
BF injection coal	dry t	468.581	1.383.720			-
Coke	dry t	692.991	2.257.072			155.230
LPG	t	154	461			-
Natural gas	k.m <sup>3</sup> N	460.925	928.764			-
Green hydrogen	t	88.815	-			-
Limestone	dry t	902.689	397.183			-
Crude dolomite	dry t	509.668	242.602			-
Pellets	t	1.393.693	-			190.936
EAF electrodes	t	618	2.264			402
Charcoal based pig iron	t	9.165	1.576			17.001
Electricity	MWh	999.225	-		16.086	
w/o undecided credits	CO <sub>2</sub> Intensity	2,30	8.379.686	-	16.086	363.569

Figura 18 - Resultados de emissão de CO<sub>2</sub> - Cenário Atual

O total de emissões de CO<sub>2</sub> é a soma das emissões de todos os escopos. Conforme os cálculos, as emissões totais de CO<sub>2</sub> em 2020 no setor de siderurgia da empresa, foi de 8.759.686 toneladas, representando uma intensidade de 2,30 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub>. Esse valor se aproxima dos dados calculados e divulgados nos relatórios da empresa, onde foi utilizada a metodologia WSA (2,29 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub>). A diferença entre esses dois valores é explicada pelo fato que, no relato, a intensidade de emissão se refere apenas à produção na Usina em questão. Por outro lado, nos cálculos realizados neste trabalho, foram utilizados dados de consumo de todo o setor de siderurgia, o que significa que o consumo de gás natural considerado engloba outras unidades, apesar de ser em pequena proporção (menos de 10%).

Conforme Tabela 20, os consumos de carvão metalúrgico, coque e carvão para injeção no alto-forno responderam por, respectivamente, 34,58%, 27,54% e 15,6% das emissões totais de CO<sub>2</sub> na usina, correspondendo a pouco mais de 75% do total de emissões. Isso evidencia o impacto causado pelo consumo dessas matérias-primas nas emissões, e o dano causado pela dependência dos combustíveis fósseis na siderurgia. Além disso, os quatro maiores emissores de CO<sub>2</sub> respondem por 88% do total das emissões, comprovando a necessidade de alternativas para o uso do coque e PCI para a produção do ferro metálico, assim como o potencial que o

hidrogênio fornece na substituição do gás natural como fonte energética, que é o quarto maior emissor de CO<sub>2</sub>.

Por outro lado, observa-se que as emissões associadas ao consumo de eletricidade respondem a apenas 0,18% do total, respondendo pela emissão de 16 mil toneladas de CO<sub>2</sub>. Isso decorre do fato de que, além da matriz energética do Brasil ser majoritariamente renovável, com um fator de emissão de CO<sub>2</sub> baixo, a empresa possui contratos de energia renovável, além de participação em usinas hidrelétricas, portanto a maior parte do seu consumo de energia elétrica não emite gases de efeito estufa.

Tabela 20 - Total de emissões de CO<sub>2</sub> por material - Cenário Atual

<b>Materiais consumidos</b>	<b>Total de emissões (t)</b>	<b>Participação (%)</b>
Carvão metalúrgico	3.028.936,00	34,58%
Coque externo	2.412.302,00	27,54%
Injeção de carvão no Alto Forno	1.383.720,00	15,80%
Gás Natural	928.764,00	10,60%
Calcário	397.183,00	4,53%
Dolomita crua	242.602,00	2,77%
Pellets	190.936,00	2,18%
Minério de Ferro	137.108,00	1,57%
Ferro Gusa	18.577,00	0,21%
Eletricidade comprada da rede	16.085,98	0,18%
Eletrodo / Eletrodos EAF	2.666,00	0,03%
GLP	461,00	0,01%
<b>Total</b>	<b>8.759.340,98</b>	<b>100%</b>

Na Figura 19 está uma parte da planilha WSA, separando as quantidades de emissões por escopo e por insumo consumido no cenário hipotético, onde em torno de 40% do aço da empresa é produzido pelo forno a arco elétrico, utilizando como carga o DRI reduzido pelo hidrogênio verde. Conforme os cálculos, o total de emissões de CO<sub>2</sub> nesse cenário é 6.093.499 toneladas, o que representa uma redução de 30% do total das emissões, quando comparada ao cenário atual. Além disso, a intensidade de emissão reduz de 2,30 para 1,60 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de aço produzido.

Materials /Energies	Unit	Purchased Procured	Calculation results			
			Scope 1 Direct emissions t CO <sub>2</sub>	Scope 1.1 emissions t CO <sub>2</sub>	Scope 2 emissions t CO <sub>2</sub>	Scope 3 emissions t CO <sub>2</sub>
Iron ore	dry t	4.715.671	174.480	-	-	-
Coking coal	dry t	989.848	3.028.936	-	-	-
BF injection coal	dry t	252.325	745.116	-	-	-
Coke	dry t	209.118	681.098	-	-	46.843
LPG	t	154	461	-	-	-
Natural gas	k.m³N	460.925	928.764	-	-	-
Green hydrogen	t	71.824	-	-	-	-
Limestone	dry t	541.613	238.310	-	-	-
Crude dolomite	dry t	305.801	145.561	-	-	-
Pellets	t	581.683	-	-	-	79.691
EAF electrodes	t	4.565	16.723	-	-	2.968
Charcoal based pig iron	t	9.165	1.576	-	-	17.001
Electricity	MWh	999.225	-	-	16.086	-
w/o undecided credits	CO2 Intensity	1,60	5.961.025	-	16.086	146.503

Figura 19 - Resultados de emissão de CO<sub>2</sub> - Cenário Hipotético (DRI)

Conforme Tabela 21, a alteração da produção de 40% do aço produzido pela rota BF-BOF para a rota DRI-EAF, levando em consideração as premissas adotadas quanto ao consumo dos materiais, reduziria as emissões do PCI em 46%, e a do coque externo em quase 70%. Essa redução representa um total de 2,3 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> que deixariam de ser emitidas.

Neste cenário, são necessárias 1 milhão de toneladas a mais de minério de ferro, representando um aumento de 27% das emissões. No entanto, as emissões associadas ao minério de ferro representam apenas 2,89% do total, ou 45 kgCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub> (considerando todo o minério consumido na usina, e o aço total, pelas duas rotas). A mesma coisa ocorre com os eletrodos, onde as emissões totais aumentariam em 6 vezes, mas a intensidade de emissão dos eletrodos de grafite é 11 kgCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub> (considerando apenas o aço produzido pela rota EAF), portanto esse valor representa pouco do total.

É evidente o efeito que a substituição dos combustíveis fósseis tem nas emissões de gases de efeito estufa na siderurgia, assim como o efeito do hidrogênio verde como fonte de energia, não só para a produção do DRI, mas até para a substituição dos combustíveis fósseis, como o gás natural.

Tabela 21 - Total de emissões de CO<sub>2</sub> por material - Cenário Hipotético (DRI)

Materiais consumidos	Cenário Atual	Cenário DRI	Variação	Proporção (cenário DRI)
Carvão metalúrgico	3.028.936,00	3.028.936,00	0,00%	49,46%
Gás Natural	928.764,00	928.764,00	0,00%	15,17%
Injeção de carvão no Alto Forno	1.383.720,00	745.116,00	-46,15%	12,17%
Coque externo	2.412.302,00	727.941,00	-69,82%	11,89%
Calcário	397.183,00	238.310,00	-40,00%	3,89%
Minério de Ferro	137.108,00	174.480,00	27,26%	2,85%
Dolomita crua	242.602,00	145.561,00	-40,00%	2,38%
Pellets	190.936,00	79.691,00	-58,26%	1,30%
Eletrodo / Eletrodos EAF	2.666,00	19.691,00	638,60%	0,32%
Ferro Gusa	18.577,00	18.577,00	0,00%	0,30%
Eletricidade comprada da rede	16.085,98	16.085,98	0,00%	0,26%
GLP	461,00	461,00	0,00%	0,01%
Hidrogênio verde	-	0,00	-	0,00%
<b>Total</b>	<b>8.759.340,98</b>	<b>6.123.613,98</b>	<b>-30,09%</b>	<b>100%</b>

Na Figura 20 observa-se uma parte da planilha WSA, considerando o cenário de sucata-FEA. Percebe-se que ela é bem semelhante à da rota DRI-FEA, com uma intensidade de emissão de 1,58 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub> e o total de emissões 6.019.235 toneladas de CO<sub>2</sub>. O cenário sucata-FEA emite 104 mil toneladas de CO<sub>2</sub> quando comparado à rota DRI, correspondendo a apenas 1,7% a menos.

Materials /Energies	Unit	Site data		Calculation results			
		Purchased Procured	Scope 1 Direct emissions	Scope 1.1 emissions	Scope 2 emissions	Scope 3 emissions	
				t CO <sub>2</sub>			
Iron ore	dry t	2.555.205	94.543				-
Coking coal	dry t	989.848	3.028.936				-
BF injection coal	dry t	252.325	745.116				-
Coke	dry t	209.118	681.098				46.843
LPG	t	154	461				-
Natural gas	k.m <sup>3</sup> N	448.795	904.322				-
Limestone	dry t	541.613	238.310				-
Crude dolomite	dry t	305.801	145.561				-
Pellets	t	581.683	-				79.691
EAF electrodes	t	4.565	16.723				2.968
Charcoal based pig iron	t	9.165	1.576				17.001
Electricity	MWh	999.225	-				16.086
w/o undecided credits	CO2 Intensity	1,58	5.856.646	-			146.503

Figura 20 - Resultados de emissão de CO<sub>2</sub> - Cenário Hipotético (Sucata)

Observa-se pela Figura 19 e pela Figura 20 que a diferença das emissões da rota DRI e sucata são apenas as do escopo 1, pois essa diferença vem do consumo maior de minério de ferro na rota DRI, conforme Tabela 22. Apesar do minério de ferro ser responsável por emissões de gás carbônico, elas não são tão elevadas a ponto de invalidar o benefício associado ao seu uso.

Além disso, dados os benefícios do uso da sucata, tais como a reciclagem de materiais que seriam descartados, a não exigência da construção de uma nova infraestrutura (devido à existência de um pátio de sucatas Usina), zero emissões de CO<sub>2</sub> associadas (por ter sido reduzida em outro processo), seu uso não deve ser descartado. O uso da sucata como matéria-prima em um FEA, para produção de 40% do aço, resultaria em uma diminuição de emissões de 31,28%.

Entende-se que o uso da sucata tem vários fatores positivos, mas a questão dos seus elementos residuais e consequente impacto na composição do aço deve ser considerada. O DRI não possui essa limitação, pois durante sua transformação para o aço no FEA, é possível alterar sua composição. Além disso, é possível buscar minério de ferro de composição e/ou qualidade desejada para a fabricação do DRI.

**Tabela 22 - Total de emissões de CO<sub>2</sub> por material - Cenário Hipotético  
(Sucata)**

<b>Materiais consumidos</b>	<b>Cenário Atual</b>	<b>Cenário Sucata</b>	<b>Variação</b>	<b>Proporção (rota sucata)</b>
Carvão metalúrgico	3.028.936,00	3.028.936,00	0,00%	50,32%
Gás Natural	928.764,00	904.322,00	-2,63%	15,02%
Injeção de carvão no Alto Forno	1.383.720,00	745.116,00	-46,15%	12,38%
Coque externo	2.412.302,00	727.941,00	-69,82%	12,09%
Calcário	397.183,00	238.310,00	-40,00%	3,96%
Minério de Ferro	137.108,00	94.543,00	-31,04%	1,57%
Dolomita crua	242.602,00	145.561,00	-40,00%	2,42%
Pellets	190.936,00	79.691,00	-58,26%	1,32%
Eletrodo / Eletrodos EAF	2.666,00	19.691,00	638,60%	0,33%
Ferro Gusa	18.577,00	18.577,00	0,00%	0,31%
Eletricidade comprada da rede	16.085,98	16.085,98	0,00%	0,27%
GLP	461,00	461,00	0,00%	0,01%
Hidrogênio verde	-	0,00	-	0,00%
<b>Total</b>	<b>8.759.340,98</b>	<b>6.019.234,98</b>	<b>-31,28%</b>	<b>100%</b>

Uma técnica que muitas empresas adotam e que não foi discutida neste trabalho, é o uso de mais de uma carga metálica para a produção do aço no FEA.

Algumas empresas usam uma mistura de ferro-esponja e sucata para a sua produção, em proporções diferentes. Com base no que foi discutido a respeito dos benefícios e malefícios associados ao uso de cada uma dessas matérias-primas individualmente, entende-se que o uso delas misturadas na carga pode ser vantajoso, devido à reciclagem da sucata (e zero emissões de CO<sub>2</sub>) junto do DRI para controlar a composição e qualidade final do aço. Outra opção é a obtenção de ferro-gusa verde de terceiros para compor parte da carga metálica. Esse material é produzido com carvão vegetal, o que permite uma produção neutra em carbono.

#### **6.4. Capacidade dos equipamentos**

Para viabilizar a produção de DRI na Usina, seria necessário um forno com capacidade produtiva de, ao menos, 1.596.089 toneladas. Considerando um rendimento de 90%, a capacidade do forno de redução deve ser de 1,73 milhões de toneladas de DRI. No mundo, existem atualmente em operação 11 plantas Midrex com capacidade de produção superior a 1,73 Mt/ano: quatro no Irã, duas na Argélia e uma na Índia, Rússia e nos Estados Unidos, conforme Tabela 23. Estes países, especialmente o Irã e a Índia, estão entre os maiores produtores de DRI do mundo. Ressalva-se que pode haver mais de uma planta DRI em uma mesma usina, tal como na ArcelorMittal Lázaro Cárdenas, onde há 3 plantas DRI, com 5 unidades diferentes. [7]

Dado que existem plantas com a capacidade produtiva superior a 1,73 Mt/ano e com apenas um módulo, entende-se que, hipoteticamente, não seria necessária a instalação de mais de um forno. No entanto, nenhuma dessas plantas possui como gás redutor o hidrogênio puro, porque o processo Midrex é com gás natural reformado. As plantas que utilizam o hidrogênio são menores, ou ainda estão em construção.

Tabela 23 - Plantas Midrex com capacidade superior a 1,73 Mt/ano [7]

Local	Capacidade (Mt/ano)	Módulos	Produto	Início de operação
Ahvaz, Irã	2,05	3	CDRI	'89/'90/'92
Mobarakeh, Irã	4	5	CDRI	'92/'93/'94
Al-Jubail, Arábia Saudita	1,76	1	HDRI/CDRI	'07
Bandar Abbas, Irã	1,86	2	CDRI	'12
Mobarakeh, Irã	2,76	2	CDRI	'12/'14
Angul, Odisha, Índia	1,8	1	HDRI/CDRI	'14
Corpus Christi, Texas, EUA	2	1	HBI	'16
Gubkin, Rússia	1,8	1	HBI	'17
Oran, Argélia	2,5	1	HDRI/CDRI	'18
Bellara, Argélia	2,5	1	HDRI/CDRI	'21

O projeto da ArcelorMittal na Espanha, de início de operação em 2025, pretende construir uma planta de capacidade de produção de 2 milhões de DRI reduzidos pelo hidrogênio, para abastecer dois fornos elétricos, produzindo 1,6 milhões de toneladas de aço, utilizando como carga o DRI e sucata [6]. Na planta de Lázaro Cardenas, a produção do aço pelo FEA é de 3,8 milhões por ano, e há 4 fornos. Apesar disso, já existem fornos com capacidade superior a 2 milhões de toneladas de aço por ano, como o forno elétrico Quantum, do fornecedor *Primetals Technologies*, e que é fabricado para aceitar como carga o DRI, a sucata e ferro-gusa.

Deve-se considerar, ainda, a produção do hidrogênio verde (na rota DRI). A infraestrutura para a sua produção é complexa, e de difícil implantação na Usina estudada. Isso porque: o transporte de hidrogênio pode ser perigoso, devido à sua alta inflamabilidade. Seria necessário a utilização de tubulações para o transporte gasoso, ou a conversão do hidrogênio em amônia para o transporte, mas ambos os casos acarretariam aumentos no custo de aquisição, e seria necessária uma logística na entrega.

Caso o hidrogênio fosse produzido na planta, seria necessário um eletrolisador. Além disso, o consumo de eletricidade seria no mínimo duas vezes maior do que a Usina consome atualmente, portanto seria necessário avaliar: o custo da energia, capacidade de atingir essa demanda de consumo, garantia da origem renovável da energia.

A infraestrutura necessária para esse tipo de operação resultaria em uma alteração completa da usina, com a remoção de um alto-forno, inclusão de pelo menos

um forno produtor de DRI e um forno a arco elétrico, além da infraestrutura necessária para produção ou armazenamento do hidrogênio. Também seria afetada a demanda das unidades de sinterização e dos conversores LD, resultando, possivelmente, na remoção de algumas de suas unidades. Logo, seria necessário um altíssimo investimento para dar início a operação, e alto custo para operacionalizar, principalmente devido à quantidade de energia necessária para a produção do hidrogênio e seu custo associado.

Com os custos atuais do hidrogênio e a infraestrutura necessária para a produção do DRI, não é possível implementar um projeto dessa dimensão no curto prazo. No entanto, ao utilizar a sucata no FEA, só é necessária a construção de um forno elétrico, o que torna essa rota uma opção mais viável para empresas que desejarem a adoção desta rota para produção do aço.

Porém, um obstáculo que pode surgir é o de conseguir sucata suficiente, e com a composição desejada, para suprir essa demanda. São necessárias em torno de 1,12 toneladas de sucata por tonelada de aço produzido no FEA [52]. Portanto, seriam necessárias 1.608.857,60 toneladas de sucata para suprir a demanda proposta no trabalho. Além disso, ela deve respeitar determinada composição, para que o aço obtenha as propriedades requeridas dos produtos da empresa, o que pode ser um fator limitante ao adquirir a sucata.

Considerando que o uso da sucata indica que a composição do aço obtido já está pré-definida, isso pode alterar as etapas do refino secundário, pois sua composição final poderia ser diferente do que a do aço líquido produzido atualmente no conversor LD. As etapas do refino secundário incluem a desoxidação, dessulfuração, adição de elementos de liga e adequação da composição química, logo as quantidades dos produtos a serem utilizados dependem da composição do aço líquido após o refino primário.

Considerando os fatores citados das dificuldades de adoção da rota com 100% DRI e com a rota 100% sucata, pode ser uma boa iniciativa incluir na carga metálica o ferro-gusa verde obtido de terceiros, como foi mencionado no tópico anterior. O Brasil é responsável por aproximadamente 1/3 da produção de carvão vegetal no mundo, e quase toda sua produção é destinada à produção de ferro-gusa. O gusa produzido pela biomassa costuma ser feito por produtores independentes, chamados de “guseiros” [53]. Nesse processo, o carvão vegetal cumpre duas funções:

fornecimento de energia térmica, e funcionalidade química, removendo oxigênio do óxido de ferro. No mundo, os alto-fornos a carvão vegetal representam 1% da produção total de aço, enquanto no Brasil representam 25 a 30% [54].

A adoção do ferro-gusa verde como matéria-prima no FEA resolveria um dos principais problemas do uso exclusivo da sucata, pois se tornaria possível manipular a composição da carga metálica com a presença do gusa, obtendo o teor de aço desejado, algo que é difícil apenas com a presença da sucata.

Além disso, a adoção do uso desse material facilitaria a questão do uso do DRI reduzido a hidrogênio, pois para adotar essa rota, seriam necessárias quantidades enormes de energia elétrica para produção do hidrogênio, além dos equipamentos necessários para a produção de alta quantidade de DRI. O uso do ferro-gusa por carvão vegetal na carga tornaria menor a quantidade de hidrogênio necessária, ao mesmo tempo que manteria a condição de baixas emissões de carbono.

Considerando os problemas que cada um desses cenários hipotéticos evidência, aparentemente uma solução promissora para mitigar esses problemas é a adoção de uma carga metálica que seja composta por sucata, ferro-gusa produzido por biomassa e DRI reduzido por hidrogênio.

## 7. Conclusão

Conclui-se que:

- A adoção do uso do forno elétrico para a produção de 40% do aço reduziria pelo menos 30% das emissões de CO<sub>2</sub>, seja ela com a sucata ou com o DRI;
- A intensidade de emissões na rota atual, rota DRI-FEA e rota sucata-FEA estão consolidadas na Tabela 24.

Tabela 24 – Intensidade de emissões de CO<sub>2</sub> por rota

Cenário	Intensidade de emissões (t <sub>CO2</sub> /t <sub>aço</sub> )
Atual (BF-BOF)	2,30
DRI-FEA	1,60
Sucata-FEA	1,58

- A rota com sucata é a que menos emite CO<sub>2</sub>, porque ela já foi reduzida anteriormente, mas as propriedades do aço obtido estão diretamente

relacionadas à composição da sucata. Isso pode limitar a sua possibilidade de ser substituta do minério de ferro virgem em grande escala;

- O uso do DRI é benéfico devido à utilização de minério de ferro virgem e possibilidade de adequação da qualidade final do aço e às baixas emissões de CO<sub>2</sub> associadas, quando comparadas à redução do ferro pelo alto-forno a coque;
- O uso do hidrogênio verde como redutor do ferro possui grande potencial na descarbonização da indústria siderúrgica, assim como sua aplicação como combustível ou fonte de energia, mas sua produção em grande escala ainda deve levar um tempo, principalmente devido ao seu alto custo e alta demanda de energia elétrica necessária. Porém, verifica-se um potencial na empresa para a produção do hidrogênio verde, devido ao seu portfólio de energia renovável e baixa emissão de CO<sub>2</sub> no consumo de eletricidade;
- A infraestrutura necessária para a adoção da rota DRI-FEA na Usina, substituindo o alto-forno B, exigiria uma reforma de grande porte, dificultando a aplicação. Sendo assim, sua aplicação pode ser mais eficiente se construída em uma planta nova, sem a necessidade de adequações da estrutura já existente.

## Referências

- [1] LIMA, E. C. **Tecnologias para neutralizar carbono na produção de aço é tema na ABM Week.** 2022. Disponível em: <https://www.industria40.ind.br/noticias/22466-tecnologias-neutralizar-carbono-producao-aco-tema-abm-week>. Acesso em: 31/05/2022
- [2] CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; MELO, L. P. D. Siderurgia. In: **Panoramas setoriais: mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2016 p. 63-71.
- [3] WORLD STEEL ASSOCIATION. **World Steel in Figures**. 2022. Disponível em: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2022.pdf>. Acesso em: 31/05/2022.
- [4] HORNBY, S. Hydrogen-Based DRI EAF Steelmaking – Fact or Fiction? In: **Association for Iron & Steel Technology**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 249 – 261.]
- [5] ESTADÃO. **Acordo de Paris: agronegócio reduziu emissões de CO<sub>2</sub>**. 2021. Disponível em: <https://summitagro.estadao.com.br/sustentabilidade/acordo-de-paris-agronegocio-reduziu-emissoes-de-co2/>. Acesso em: 15/08/2022.]
- [6] ARCELORMITTAL. **Climate Action Report 2**. 2021. Disponível em: [https://corporate-media.arcelormittal.com/media/ob3lpdom/car\\_2.pdf](https://corporate-media.arcelormittal.com/media/ob3lpdom/car_2.pdf). Acesso em: 15/09/2022
- [7] MIDREX TECHNOLOGIES INC. **World Direct Reduction Statistics**. 2022. Disponível em: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2021.pdf>. Acesso em: 15/08/2022.
- [8] MIDREX TECHNOLOGIES INC. **Optimizing DRI production using natural gas**. 2018. Disponível em: [https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MIDREX\\_NG\\_Brochure\\_4-12-18.pdf](https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MIDREX_NG_Brochure_4-12-18.pdf). Acesso em: 15/08/2022.
- [9] STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE. **HYBRIT**. Disponível em: <https://www.sei.org/projects-and-tools/projects/hybrit>. Acesso em: 15/06/2022.
- [10] INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERACÃO. **A SSAB será a primeira do mercado com aço produzido sem combustíveis fósseis**. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/a-ssab-sera-a-primeira-do-mercado-com-aco-produzido-sem-combustiveis-fosseis/>. Acesso em: 15/06/2022.

- [11]SSAB. **HYBRIT. A new revolutionary steelmaking technology.** Disponível em: <https://www.ssab.com/en/fossil-free-steel/hybrit-a-new-revolutionary-steelmaking-technology>. Acesso em: 15/06/2022.
- [12] MCKINSEY & COMPANY. **Decarbonization challenge for steel:** Hydrogen as a solution in Europe. 2020. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel>. Acesso em: 02/09/2022.
- [13] WORLD STEEL ASSOCIATION. **World Steel in Figures.** 2022. Disponível em: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2022.pdf>. Acesso em: 31/05/2022.
- [14] GEERDES, M. et al. **Práticas modernas para operação de alto-fornos.** Cidade de IJmuiden: [s.n.], 2004. 122 p.
- [15] MOURÃO, M. B. **Zonas do AF.** 2020. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5325014/mod\\_resource/content/1/alto%20forno%202-2020.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5325014/mod_resource/content/1/alto%20forno%202-2020.pdf). Acesso em: 31/05/2022.
- [16] MOURÃO, M. B. et al. **Introdução a Siderurgia.** São Paulo: ABM, 2007. 428 p
- [17] TSCHIPTSCHIN, A. P. **Mundo dos Aços Especiais - Módulo I: Processo de Fabricação.**
- [18] ORTH, A.; ANASTASIJEVIC, N.; EICHLERGER, H. Low CO<sub>2</sub> emission technologies for iron and steelmaking as well as titania slag production: Hydrogen as a solution in Europe. **Minerals Engineering**, v. 20, n. 9, p. 854 – 861, Agosto 2007.
- [19] CÂNDIDO, M. R. **Aplicação da transformada Wavelet na análise da qualidade de energia em fornos elétricos a arco.** 2008. Tese (Doutorado em Sistemas de Potência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- [20] FAN, Z.; FRIEDMANN, J. Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. **Joule**, v. 5, p. 829 – 862, Abril 2021.
- [21] SILVA, A. L. V. da Costa e. **Forno Elétrico a Arco.** 2013. Disponível em: [https://www.equilibriumtrix.net/refino/capitulos\\_acs\\_refino/Capitulo%207%20fea%20rev%202%20com%20indice%2028072013.pdf](https://www.equilibriumtrix.net/refino/capitulos_acs_refino/Capitulo%207%20fea%20rev%202%20com%20indice%2028072013.pdf). Acesso em: 03/06/2022.
- [22] ALMEIDA, C. **Forno Elétrico a Arco (FEA).** 2012. Disponível em: <http://aciarianews.blogspot.com/2012/12/forno-eletrico-arcofea.html>. Acesso em: 06/06/2022.

- [23] VAZ, G. D. **Quantificação das Perdas de Ferro Metálico em Escórias de Forno Elétrico a Arco**. 2011. 105 p. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [24] VOGL, V.; ÅHMAN, M.; NILSSON, L. J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, n. 1, p. 736 – 745, Dezembro 2018.
- [25] DRUZIN, R. **Algoma gets Canada funds for EAF switch**. 2021. Disponível em: <https://www.argusmedia.com/en/news/2232137-algoma-gets-canada-funds-for-eaf-switch>. Acesso em: 15/06/2022.
- [26] LAZZARO, N. **Algoma to construct EAFs to replace blast furnace steelmaking by 2024**. 2021. Disponível em: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/pt/products-services/metals/market-data-metals>. Acesso em: 15/06/2022.
- [27] TAYLOR, B. **Algoma agreement opens door for EAF installation**. 2021. Disponível em: <https://www.recyclingtoday.com/article/algoma-steel-recycling-eaf-funding-cib-canada/>. Acesso em: 15/06/2022.
- [28] VIRCHENKO, E. **Voestalpine to switch to green steel production via EAFs by 2027**. 2022. Disponível em: <https://www.ssab.com/en/fossil-free-steel/hybrit-a-new-revolutionary-steelmaking-technology>. Acesso em: 15/06/2022.
- [29] VERRET, A. **What is green steel?**. 2021. Disponível em: <https://www.fastmarkets.com/insights/what-is-green-steel>. Acesso em: 15/06/2022.
- [30] VOESTALPINE. **Reducing step by step by step**. 2021. Disponível em: <https://www.voestalpine.com/blog/en/commitment/reducing-step-by-step-by-step/>. Acesso em: 15/06/2022.
- [31] VARRIALE, L. **Steelmaker Voestalpine to convert three blast furnaces to EAFs by 2030**. 2021. Disponível em: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/metals/060921-steelmaker-voestalpine-to-convert-three-blast-furnaces-to-eafs-by-2030>. Acesso em: 15/06/2022.

- [32] LIU, W. et al. The production and application of hydrogen in steel industry. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 17, p. 10548 – 10569, Março 2021.
- [33] MIDREX TECHNOLOGIES, INC. **Direct from Midrex: 1st Quarter 2020**. 2020. Disponível em: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex-2020-DFM1QTR-Final.pdf>. Acesso em: 02/09/2022.
- [34] AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Global Hydrogen Review 2021**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>. Acesso em: 02/09/2022.
- [35] EUROPEAN PARLIAMENT. **The potential of hydrogen for decarbonising steel production**. Disponível em: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/641552/EPRS\\_BRI\(2020\)641552\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/641552/EPRS_BRI(2020)641552_EN.pdf). Acesso em: 02/09/2022.
- [36] MIDREX TECHNOLOGIES, INC. **Direct from Midrex: 1st Quarter 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex-DFM-1stQtr2021-Final.pdf>. Acesso em: 02/09/2022.
- [37] SIDERURGIA Brasil - Descarbonizar: Uma opção viável, lucrativa e necessária. **Grips**, São Paulo, n. 157, Junho 2022.
- [38] MCKINSEY & COMPANY. **Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo**. 2021. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/br/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-de-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo>. Acesso em: 28/09/2022.
- [39] RECHBERGER, K. et al. Green Hydrogen-Based Direct Reduction for Low-Carbon Steelmaking. **Steel Research International**, v. 91, n. 11, Novembro 2020
- [40] PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL. **Guia para a elaboração de inventários corporativos de emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE)**. Disponível em: [https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/cartilha\\_ghg\\_online.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/cartilha_ghg_online.pdf). Acesso em: 20/08/2022.
- [41] IPCC TASK FORCE ON NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES. 2019 **Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**: Volume 3 Industrial Processes and Product Use. 2019.

- [42] WORLD STEEL ASSOCIATION. **CO<sub>2</sub> Data Collection User Guide, version 10.** Disponível em: <https://worldsteel.org/steel-topics/environment-and-climate-change/climate-action/climate-action-data-collection/>. Acesso em: 20/08/2022.
- [43] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14404:** Calculation method of carbon dioxide emission intensity from iron and steel production. ISO, 2020.
- [44] MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Fatores de emissão de CO<sub>2</sub> pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil.** 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>. Acesso em: 02/09/2022
- [45] GRUPO CSN. **Relatório Integrado 2020.** 2021. Disponível em: <https://ri.csn.com.br/sustentabilidade/relatorios/>. Acesso em: 01/08/2022.
- [46] INSTITUTO ACO BRASIL. **Anuário Estatístico 2021.** Disponível em: [https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/07/Anuario\\_Completo\\_2021.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/07/Anuario_Completo_2021.pdf). Acesso em: 15/08/2022.
- [47] PIMENTA, H. P. et al. Desenvolvimento Integrado de Carga Metálica para Sinterização e Alto-Forno. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 4, n. 1, p. 1 – 7, 2007.
- [48] HARVEY, L. D. D. From Iron Ore to Crude Steel: Mass Flows Associated with Lump, Pellet, Sinter and Scrap Iron Inputs: Calculation method of carbon dioxide emission intensity from iron and steel production. **ISIJ International**, v. 60, n. 6, p. 1159 – 1171, Junho 2020.
- [49] Xiaoling LI, X., SUN, W., ZHAO, L., CAI, J. Material Metabolism and Environmental Emissions of BF-BOF and EAF Steel Production Routes. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 39, n. 1, p. 50-58, 2017
- [50] DUAGU, E. I. et al. Comparative life cycle assessment of natural gas and coal-based directly reduced iron (DRI) production: A case study for India. **Journal of Cleaner Production**, v. 347, n. 131196, Maio 2022.
- [51] LUGO, N. Electric Arc Furnace Best Operation Practices. In: **45º Seminário de Aciaria**. Porto Alegre, RS: [s.n.], 2014. p. 1606 – 1615.
- [52] GAJDZIK, B.; SROKA, W.; VVEINHARDT, J. Energy Intensity of Steel Manufactured Utilising EAF Technology as a Function of Investments Made: The

Case of the Steel Industry in Poland. **Energies**, v. 14, n. 16, p. 5152 –, Agosto 2021.

- [53] SANTOSA, S. de Fátima de O. M.; HATAKEYAMA, K. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. **Produção**, v. 22, n. 2, p. 309 – 321, Abril 2012.
- [54] CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Siderurgia no Brasil 2010-2025; subsídios para tomada de decisão**. Brasília, 2010. 309 – 321 p.