

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS - EM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, ADMINISTRAÇÃO E
ECONOMIA - DEPRO

LORENA SOUZA VALADARES DE CARVALHO

**ANÁLISE DE DIFERENTES MEDIDAS DE
MITIGAÇÃO PARA NEUTRALIZAÇÃO DA EMISSÃO
DE CARBONO EM UMA SIDERÚRGICA INTEGRADA**

Ouro Preto
2021

LORENA SOUZA VALADARES DE CARVALHO

**Análise de diferentes medidas de mitigação para
neutralização da emissão de carbono em uma
Siderúrgica Integrada**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Produção.

Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Prof. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura

Ouro Preto

2021



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lorena Souza Valadares de Carvalho

Análise de Diferentes Medidas de Mitigação para Neutralização da Emissão de Carbono em uma Siderúrgica Integrada

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Produção

Aprovada em 15 de setembro de 2021

Membros da banca

DSc - Gustavo Nikolaus Pinto de Moura - Orientador Universidade Federal de Ouro Preto
DSc - Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino - Universidade Federal de Ouro Preto
MSc- Cristiano Luís Turbino de Franca e Silva - Universidade Federal de Ouro Preto

Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/09/2021



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/09/2021, às 15:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Luis Turbino de Franca e Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/09/2021, às 09:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0221261** e o código CRC **4E16A0B8**.

Agradecimentos

Agradeço à Deus por seu amor explícito nas pequenas coisas. À minha família Valadares e Carvalho, em especial minha mãe e meus avós (Leny, Dalva e Tarcísio), pelo apoio incondicional e por tornarem possível o meu sonho de ser Engenheira. Aos meus amados irmãos Larissa e Lucas pela companhia, amor e carinho.

Aos amigos de Ouro Preto e do curso de Engenharia de Produção, pela parceria e companhia nos melhores e piores momentos da graduação.

Ao time da Belgo Bekaert Arames e da Gerdau AçoMinas pelos ensinamentos técnicos e da vida.

À UFOP, Escola de Minas e DEPRO pelo ensino público e de qualidade, em especial ao professor Gustavo que me guiou até a conclusão desse trabalho.

Muito obrigada!

Resumo

Pode-se dizer que o aumento da temperatura do planeta decorrente das emissões de GEE é o maior problema ambiental da humanidade. Por conta disso, as nações e organizações tem se movimentado nesse sentido para poder reduzir ao máximo suas emissões. Nesse contexto, as indústrias siderúrgicas são os maiores consumidores de energia e emissores de CO₂ do setor industrial. Assim, o presente trabalho percorre os panoramas mundial e nacional da indústria do aço visando entender suas rotas de produção, seus maiores produtores globais e os impactos do setor no cenário de mudança climática. O objetivo desse estudo é analisar medidas mitigadoras para redução da emissão de carbono em uma típica siderúrgica integrada situada no estado de Minas Gerais. Foi utilizada a pesquisa exploratória para realização do embasamento teórico e, a partir de dados quantitativos e qualitativos, pôde-se obter as respostas para o problema inicial. Ao analisar o processo siderúrgico, é possível perceber que a etapa de redução do minério de ferro é a maior consumidora de energia térmica do processo produtivo e, para se obter o produto final, é necessário utilizar o carvão mineral, sendo esse um grande combustível fóssil. Entre as medidas propostas estão o plantio de florestas que podem compensar as emissões, uma vez que absorve CO₂ durante a fotossíntese, e o aproveitamento da energia solar por meio de sistemas fotovoltaicos em substituição da energia elétrica do Sistema Interligado Nacional. Como pontos de ação para o futuro, foram listados dois projetos piloto que tem pretensão de reduzir a taxas mínimas as emissões de efluentes, sendo a troca de carvão mineral pelo hidrogênio como agente redutor do minério de ferro e a captura e sequestro de carbono, o armazenando no subsolo.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Indústria Siderúrgica; Emissão de carbono;

Abstract

It is possible to say that the increase in the planet's temperature resulting from GHG emissions is humanity's biggest environmental problem. Because of this, nations and organizations have moved in this direction to be able to reduce their emissions as much as possible. In this context, the steelmaking industries are the largest energy consumers and CO₂ emitters in the industrial sector. So, this work covered the global and national panoramas of the steelmaking industry in order to understand its production routes, its largest global producers and the impacts of the sector on the climate change scenario. The aim of this study is to analyze mitigating measures to reduce carbon emissions in a typical integrated steel mill located in the state of Minas Gerais. Exploratory research was used to carry out the theoretical foundation and from quantitative and qualitative data it is possible to obtain the answers to the initial problem. By analyzing the steelmaking process, it was possible to see that the iron reduction stage is the largest consumer of thermal energy in the production process, and to obtain the final product it is necessary to use mineral coal, which is a fossil fuel. Among the measures proposed are the planting of forests that can offset emissions, since it absorbs CO₂ during photosynthesis, and the use of solar energy through photovoltaic systems to replace electricity from the National Interconnected System. As action points for the future, two pilot projects that intend to reduce effluent emissions to minimum rates were listed, being the exchange of coal for hydrogen as a reducing agent of iron ore and the capture and sequestration of carbon, the storing underground.

Keywords: Sustainability; Steelmaking industry; Carbon emission

Lista de abreviaturas e siglas

ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
BEN	Balanço Energético Nacional
CCS	Captura e Sequestro de Carbono
EAF	Fornos elétricos a arco
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FBDS	Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável
GAC	Gás de aciaria
GAF	Gás de alto-forno
GCO	Gás de coqueria
GEE	Gases do Efeito Estufa
GHG	<i>GreenHouse Gas</i>
GJ/tab	<i>Gigajoule</i> por tonelada de aço bruto
IBA	Indústria Brasileira de Árvores
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LD/BOF	Conversor a oxigênio
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
PCI	Poder Calorífico Inferior
REDD+	Redução de Emissões de gases de efeito estufa provenientes do Desmatamento e da Degradação florestal
SIN	Sistema Interligado Nacional

TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
tCO ₂	Tonelada de dióxido de carbono
tCO ₂ /tab	Tonelada de dióxido de carbono por tonelada de aço bruto
WSA	World Steel Association

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxo de produção do aço	17
Figura 2 – Evolução temporal da produção mundial de aço	18
Figura 3 – Os 10 maiores produtores de aço do mundo em 2020	18
Figura 4 – Eficiência energética no processo do aço por país - 2015	20
Figura 5 – Distribuição das siderúrgicas brasileiras	21
Figura 6 – Estrutura do consumo no setor Siderúrgico brasileiro	23
Figura 7 – Emissão de CO ₂ no setor siderúrgico brasileiro	24
Figura 8 – Emissão de tCO ₂ /tab para quatro siderúrgicas brasileiras	28
Figura 9 – Consumo de insumos sólidos na planta industrial (2016)	32
Figura 10 – Esquemática do processo siderúrgico	32
Figura 11 – Origem da energia elétrica consumida na unidade estudada (2016)	34
Figura 12 – Consumo de energia elétrica por etapa (2016)	35
Figura 13 – Consumo de gases siderúrgicos por etapa (2016)	36
Figura 14 – Resumo da matriz energética da empresa Siderúrgica (2016)	37
Figura 15 – Consumo energético por etapa (2016)	38
Figura 16 – Evolução temporal da intensidade energética na planta industrial . .	39
Figura 17 – Panorama geral dos escopos e emissões ao longo da cadeia de valor	42
Figura 18 – Fotossíntese	44
Figura 19 – Irradiação solar na região de estudo	46
Figura 20 – Tecnologia de captura e sequestro de carbono	49

Lista de tabelas

Tabela 1 – Principais efluentes emitidos pelas indústrias siderúrgicas a coque .	24
Tabela 2 – Intensidade energética por WSA (Gj/tab)	26
Tabela 3 – Intensidade Energética para a Rota Tecnológica: alto-forno + forno a oxigênio	27
Tabela 4 – Emissão de CO ₂ na produção de aço mundial - 2017 a 2019	27
Tabela 5 – Geração e perda de gases siderúrgicos (2016)	36
Tabela 6 – Matriz energética detalhada (Gj/ano) - (2016)	37
Tabela 7 – Etapas de quantificação das emissões de CO ₂	40
Tabela 8 – Dimensionamento de uma usina solar	47

Sumário

	Lista de ilustrações	8
	Lista de tabelas	9
1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo Geral	13
1.1.1	Objetivos específicos	13
1.2	Estrutura do trabalho	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Rotas tecnológicas para a produção de aço	15
2.1.1	Usinas Integradas	15
2.1.2	Usinas Semi-integradas	15
2.2	Processo Siderúrgico	15
2.2.1	Redução	16
2.2.2	Refino (aciaria)	16
2.2.3	Conformação Mecânica	16
2.3	Indústria Siderúrgica Mundial	17
2.4	Panorama de Sustentabilidade	19
2.5	Panorama Nacional da Indústria do Aço	20
2.6	Matérias-primas e aspectos ambientais do Setor Siderúrgico	22
2.7	Uso da Energia na Produção do Aço	25
2.7.1	Intensidade Energética	25
2.7.1.1	Intensidade Energética para a Rota Tecnológica: Usinas Integradas	26
2.7.2	Correlação da Emissão de CO ₂ por tonelada de Aço Bruto	27
3	METODOLOGIA	30
4	ESTUDO DE UMA SIDERÚRGICA INTEGRADA E MEDIDAS DE MITIGAÇÃO	31
4.1	Descrição da Empresa	31

4.2	Diagnóstico energético da empresa	33
4.2.1	Diagnóstico da oferta e da demanda elétrica	33
4.2.2	Gases combustíveis siderúrgicos	35
4.2.3	Matriz energética da planta industrial	36
4.2.4	Intensidade energética para a unidade siderúrgica	38
4.2.5	Mensuração das emissões de CO₂ pelo método <i>Top-Down</i>	39
4.3	Gerenciamento de emissões de GEE	41
4.4	Medidas mitigadoras para a anulação da emissão de carbono	43
4.4.1	Compensação de CO₂ com plantio de florestas	44
4.4.2	Aproveitamento da energia solar	45
4.4.2.1	Dimensionamento de uma usina solar	45
4.4.3	Pontos de ação futuro	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 Introdução

O processo de transformação do ferro em aço ganhou destaque no final do século XIX, quando foram inventados os fornos com coque de carvão mineral, o que permitiu realizar a correção das impurezas do ferro e adicionar propriedades ao material. De acordo com Santos (2015), a criação desses fornos facilitou a produção em grande escala e, conseqüentemente, o barateamento do processo de fabricação. Dessa forma, fez-se possível o desenvolvimento de novos produtos como os automóveis, aviões, telégrafos, telefones e linhas de transmissão de energia elétrica. Este período ficou marcado na história como a Segunda Revolução Industrial e inseriu de vez o aço nas relações humanas.

No Brasil, a extração do minério de ferro no estado de Minas Gerais propiciou a instalação de usinas siderúrgicas a partir do ano de 1917. Na década de 1930, com a construção da Usina Barbanson na cidade de João Monlevade, o país já apresentava uma capacidade instalada de produção de 50 mil toneladas por ano (BRASIL, 2013). Após mais de 100 anos, o parque produtor brasileiro tem capacidade de 50,4 milhões de toneladas de aço bruto por ano, e é um dos grandes responsáveis pelo desenvolvimento econômico e humano do país (BRASIL, 2019).

Apesar da importância em escala nacional e internacional, a fabricação do aço é intensiva em relação ao consumo de matérias-primas e insumos energéticos. Por conta disso, este processo se torna responsável pelo significativo volume de efluentes gasosos e líquidos, como por exemplo o dióxido de carbono (CO_2) e o benzeno. Segundo BRASIL (2021), cerca de 83% do aço brasileiro ainda é obtido a partir do uso de carvão mineral, material de origem fóssil.

A sustentabilidade em indústrias siderúrgicas passou a ser discutida a partir da década de 1980 quando, devido à pressões sociais e legislativas, as indústrias tiveram de desenvolver e adotar tecnologias mais limpas para tornar o processo mais sustentável e eficiente energeticamente. Desde então, a indústria do aço atua na otimização da aplicação de matérias-primas e insumos para redução dos impactos sobre o meio ambiente, e já apresentou como resultado uma redução de 60% no consumo energético por tonelada de aço nos últimos cinquenta anos (CARVALHO, 2015). Apesar dos valores significativos, o setor siderúrgico enfrenta um novo desafio: anular suas

emissões de carbono entre as décadas de 2050 e 2070 (IPCC, 2018).

Em razão da dependência humana do aço e de sua relevância nos setores da economia e do meio ambiente, é válido ressaltar a necessidade de estudar e discutir as questões que envolvem a cadeia siderúrgica, tais como o seu panorama à nível global, seu potencial e os desafios enfrentados na redução da emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE).

1.1 Objetivo Geral

Propor diferentes medidas mitigadoras para neutralização da emissão de carbono em uma siderúrgica integrada.

1.1.1 Objetivos específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Apresentar conceitos técnicos sobre o processo siderúrgico;
- Caracterizar a indústria siderúrgica mundial e brasileira;
- Expor os aspectos relevantes dentro da sustentabilidade em indústrias siderúrgicas;
- Realizar diagnóstico da intensidade energética atual na tonelada de aço;
- Diagnosticar a emissão de CO₂ por tonelada de aço produzido;
- Apresentar dados energéticos de uma siderúrgica integrada;
- Quantificar emissões de dióxido de carbono na unidade industrial a partir do método *Top-Down*;
- Apresentar a metodologia de gerenciamento de Gases do Efeito Estufa.

1.2 Estrutura do trabalho

Para além da introdução deste trabalho monográfico, a seção 2 caracteriza brevemente a indústria siderúrgica, apresentando o panorama mundial e nacional e seus aspectos ambientais, com base na revisão de literatura e análise de dados setoriais.

Em seguida, discute o uso da energia na produção do aço, adicionando os indicadores ambientais regidos pela World Steel Association (WSA). A seção 4 traz uma descrição de uma indústria siderúrgica integrada, que será estudo de caso nesse trabalho, com ênfase em seus dados energéticos. Por fim, apresenta medidas que possam realizar o gerenciamento de carbono e que mitiguem a sua emissão na indústria estudada.

2 Referencial Teórico

Este capítulo será dividido em duas partes, sendo que, a primeira descreve as principais rotas produtivas do aço e os conceitos sobre processos siderúrgicos, os panoramas mundial e nacional da indústria do aço e os seus aspectos ambientais, a segunda trata sobre a o uso da energia na produção do aço

2.1 Rotas tecnológicas para a produção de aço

Para a produção de aço, as usinas podem ser classificadas em duas rotas tecnológicas: as integradas e semi-integradas (mini-usinas) que serão brevemente descritas a seguir.

2.1.1 Usinas Integradas

De acordo com Mourão (2007), nas usinas integradas a produção é dividida em três fases: a redução (produção de ferro propriamente dito), o refino (produção e resfriamento do aço) e a conformação mecânica (comumente chamada de laminação). Nesta classificação, o processo ocorre desde a escolha e preparação da matéria-prima, onde o principal insumo é o minério de ferro, que é transformado em ferro gusa no alto-forno, posteriormente em aço líquido na aciaria e produto final nos laminadores.

2.1.2 Usinas Semi-integradas

As usinas semi-integradas não contemplam a etapa de redução, portanto, começam seu processo na aciaria, na qual são alimentadas principalmente por sucata ferrosa e ferro gusa. Nesta classificação de usina, a carga metálica é fundida à temperaturas elevadas com o uso de fornos elétricos a arco (EAF) (CARVALHO, 2015).

2.2 Processo Siderúrgico

Mourão (2007) ainda cita em seu trabalho que o processo de produção do aço pode ser dividido em três etapas: redução, refino e conformação mecânica (Figura 1).

2.2.1 Redução

Consiste na redução do minério de ferro, geralmente na forma de um óxido de ferro, em uma liga metálica de ferro-carbono. O produto final desta etapa é o ferro gusa. O processo acontece no equipamento chamado alto-forno, e nele são carregadas as matérias-primas preparadas, naturais, combustíveis e gases redutores. A redução do minério de ferro ocorre geralmente através do coque de carvão mineral, carvão vegetal ou gás natural. O minério de ferro e os fundentes são carregados pelo topo do alto-forno, enquanto é injetado pela base o ar quente. O carbono do coque se combina com o oxigênio do minério, liberando o calor responsável pela fundição do metal. Na base do alto-forno então, se deposita o ferro gusa que posteriormente é retirado e levado aos convertedores para seu refino.

2.2.2 Refino (aciaria)

Neste processo, o ferro gusa é convertido em aço líquido. Ocorre também a retirada das impurezas da liga metálica e, por último, a redução do teor de carbono. É a etapa na qual se obtém o aço propriamente dito. Existem dois processos de produção de aço líquido, sendo caracterizados pela utilização de diferentes fornos de refino: o conversor a oxigênio (LD/BOF) e o forno elétrico a arco (EAF - *Electric Arc Furnace*).

2.2.3 Conformação Mecânica

Antes de se iniciar o processo de conformação mecânica, o material é levado ao forno de reaquecimento para que fique dúctil e possa ser laminado. A laminação é o tipo de conformação mecânica mais utilizada mundialmente. Nessa etapa, o aço é considerado um produto semi-acabado, podendo ser classificado como placa, bloco ou tarugo, de acordo com suas dimensões. Depois do reaquecimento, o material passa então por dois cilindros que tem como objetivo a diminuição de sua espessura para se obter a forma desejada.

Figura 1 – Fluxo de produção do aço



Fonte: Adaptado a partir de IABr (2012)

2.3 Indústria Siderúrgica Mundial

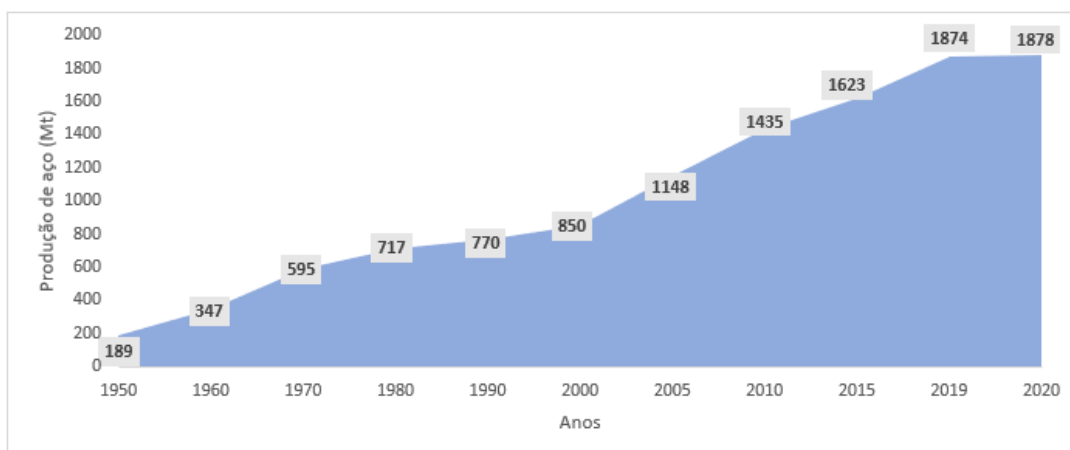
O volume de produção do aço é considerado um indicador econômico de desenvolvimento de um país. Sendo assim, pode-se dizer que as maiores economias do mundo são (ou foram) grandes produtoras desse material. Durante o século XX, os Estados Unidos da América permaneceram como os maiores produtores de aço do mundo. Entretanto, no início do século XXI, com as crises do petróleo e o consequente desequilíbrio econômico no país, a China considerou como oportunidade seu desenvolvimento no setor de aço, o que resultou na conquista de espaço e rápido crescimento na sua produção (OLIVEIRA, 2014) (Figuras 1 e 2). Atualmente, o país é responsável por 56,7% da produção global (BRASIL, 2021).

Além de maior produtora, a China também é a que mais emite CO₂ no planeta. Para efeito de comparação, o país emitiu 10,06 bilhões de toneladas em 2018, enquanto os Estados Unidos da América (segundo maior emissor) emitiu 5,4 bilhões de toneladas no mesmo período. O aumento da produção chinesa nos últimos anos causa um paradoxo entre o caminho da "Economia Verde" que as indústrias siderúrgicas querem seguir e a alta emissão de CO₂ gerada no país (PAIXÃO, 2020).

Para Paixão (2020), novas tecnologias que visam o aumento da produtividade po-

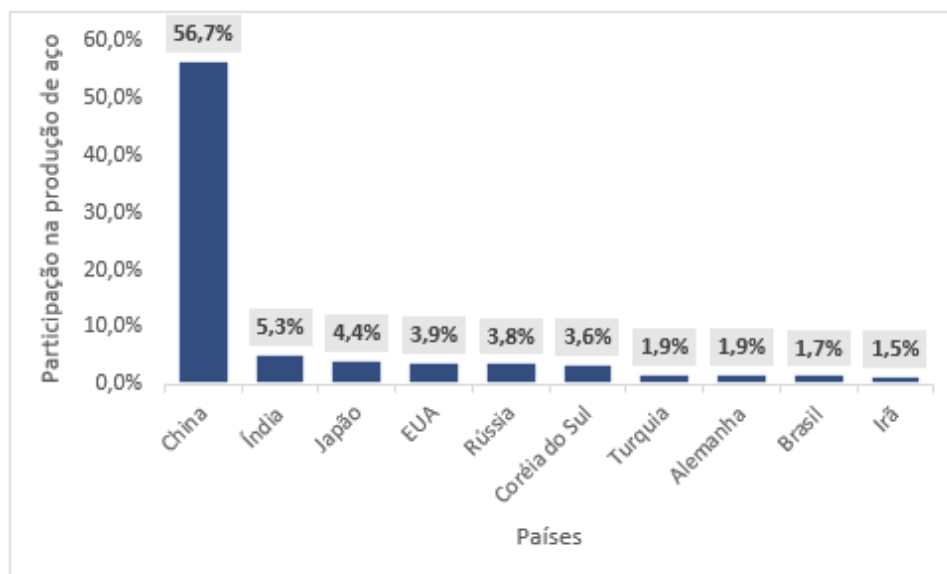
dem ser aliadas às normas governamentais de sustentabilidade e, assim, auxiliar no processo de redução de emissão de GEE. A China tem adotado algumas medidas inovadoras como o reaproveitamento de gases siderúrgicos. Tal conduta pode ser difundida em outras regiões do mundo, uma vez que o setor funciona de forma homogênea.

Figura 2 – Evolução temporal da produção mundial de aço



Fonte: Adaptado a partir de IABr (2021)

Figura 3 – Os 10 maiores produtores de aço do mundo em 2020



Fonte: Adaptado a partir de IABr (2021)

2.4 Panorama de Sustentabilidade

É importante destacar o papel da indústria siderúrgica no que diz respeito às políticas de redução de emissão de GEE no âmbito mundial. Dentre os acordos e tratados assinados, um dos mais atuais e com relevância no setor siderúrgico é o Acordo de Paris. Aprovado em 2015 e com vigor a partir de 2016, o tratado rege medidas de redução de GEE a partir do ano 2020. O mesmo foi assinado por 197 países e um dos seus principais objetivos é limitar o aumento da temperatura do planeta em até 1,5°C até 2100 (VITAL, 2018). Vale ressaltar que, para conseguir limitar esse aumento, as emissões de carbono precisam ser totalmente anuladas entre as décadas de 2050 e 2070 (IPCC, 2018).

Segundo Paula, Santi e Mercedes (2020), o Brasil, apesar de ter índices sustentáveis melhores que os dos países desenvolvidos, foi signatário desse acordo, reafirmando seu compromisso com a sustentabilidade. Ficou definido então:

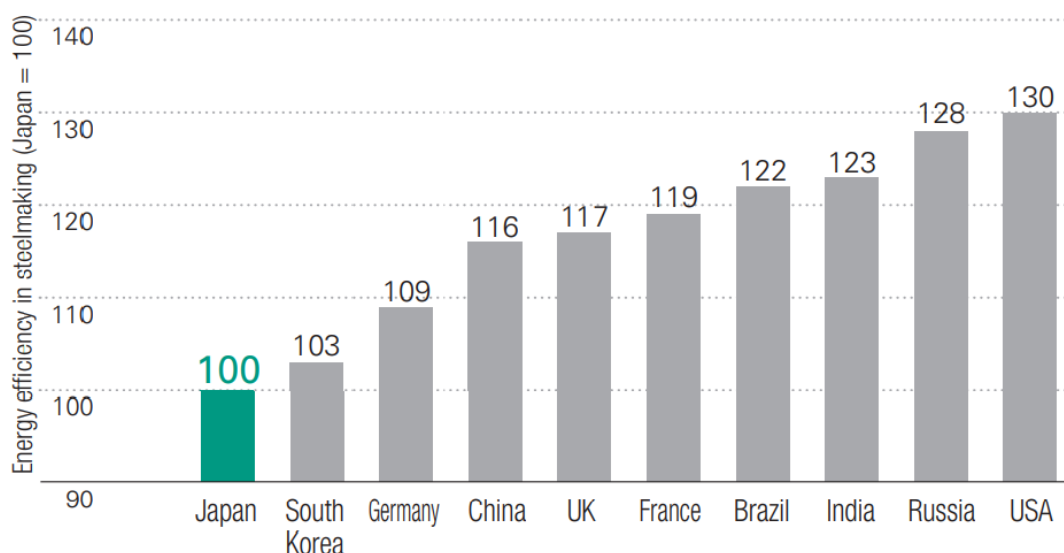
- O compromisso de em 2025 o Brasil estar com níveis de emissão de carbono 37% abaixo do que em 2005;
- O compromisso de em 2030 o Brasil estar com níveis de emissão de carbono 43% abaixo do que em 2005.

Apesar de encontrar barreiras como a dificuldade na troca de grandes equipamentos e demandas incertas, as principais indústrias siderúrgicas têm anunciado planos para cumprir o acordo de redução de emissão de GEE (VOGL; ÅHMAN; NILSSON, 2021).

No panorama global, o Japão pode ser considerado referência de boas práticas, como pode ser observado na Figura 4. Líder no quesito tecnologia nas indústrias siderúrgicas, o país tem adotado uma cultura de comprometimento com as questões ambientais. (MARTINEZ; PINTO, 2017) citam em seu trabalho a empresa japonesa Nippon Steel Corporation (NSC), grande aplicadora de novas tecnologias no processo siderúrgico e que apresenta volume de produção maior que o Brasil. Em seu relatório de sustentabilidade anual, a empresa cita algumas tecnologias de inovação que estão em progresso NSC (2020):

- Desenvolvimento de tecnologia de redução de emissão de CO₂, utilizando hidrogênio no processo de redução que ocorre no alto-forno;
- Desenvolvimento de método de absorção química que permite a separação e recuperação de CO₂ por um baixo custo;
- Estabelecimento de um método para produção de Carbonato de Metila, material que pode ser injetado em reservatórios de petróleo (processo conhecido como recuperação avançada de petróleo), por exemplo.

Figura 4 – Eficiência energética no processo do aço por país - 2015

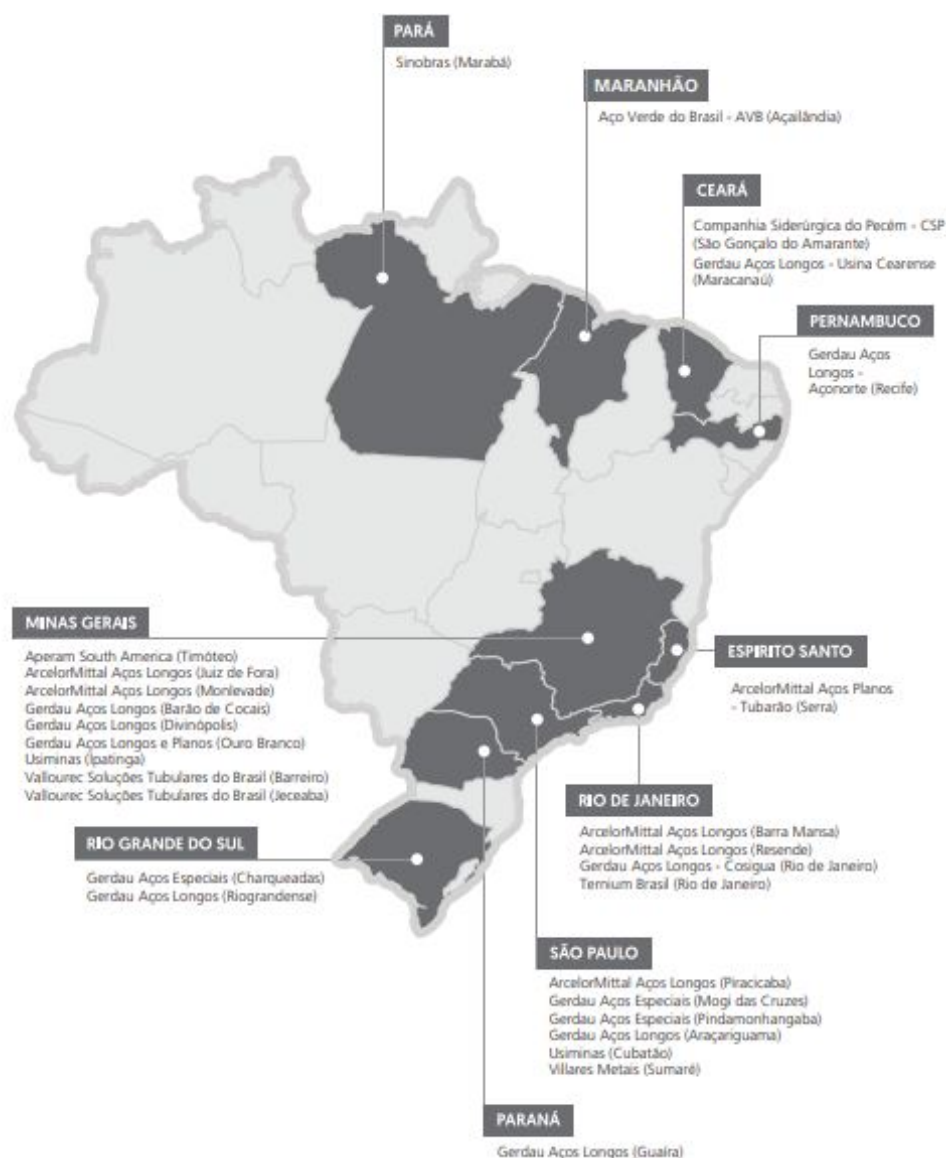


Fonte: NSC (2020)

2.5 Panorama Nacional da Indústria do Aço

O Brasil possui uma capacidade instalada para fabricar mais de 50,4 milhões de toneladas de aço bruto por ano, e tem um parque produtor composto por 31 usinas, sendo 15 integradas e 16 semi-integradas (Figura 5). Essas usinas são controladas por onze diferentes grupos empresariais (BRASIL, 2019). Em 2020, o parque siderúrgico produziu 31,4 milhões de toneladas de aço bruto, o que colocou o Brasil como o 9º maior produtor mundial, com participação de 1,7% na produção global (BRASIL, 2021).

Figura 5 – Distribuição das siderúrgicas brasileiras



Fonte: IABr (2021)

O país também tem buscado inovações quanto à tecnologias para redução de emissão de GEE, e foi pioneiro na utilização do carvão vegetal como redutor do minério de ferro no lugar do coque de carvão mineral, no qual cerca de 12% dos fornos brasileiros já utilizam esse biorredutor. O carvão vegetal tem origem da madeira extraída de florestas pelas empresas do setor, sendo então, uma fonte renovável. O sequestro de CO₂ que ocorre durante o crescimento das árvores chega a anular aquele que é emitido pelo processo produtivo do aço (INDÚSTRIA, 2021).

Ademais, as maiores indústrias siderúrgicas do país têm se pronunciado e pro-

posto metas quanto à redução de GEE:

- A Arcelor Mittal Brasil lançou a meta de redução de emissão de CO₂ até 2030: iniciativas como o maior uso de sucata, a utilização de gás natural e otimização no uso de carvão vegetal devem ser implementadas pela empresa (ABM, 2021);
- Na Gerdau, o tema mudança climática está atrelado à bonificação de executivos: a empresa está avaliando a utilização de Hidrogênio em substituição do carvão mineral como fonte de energia (ADACHI, 2020);
- A Ternium anunciou um plano para reduzir suas emissões de CO₂ em 20% até 2030: a meta inclui projetos como aumentar a participação de fontes renováveis de energia e expandir o uso de sucata metálica (TERNIUM, 2021).

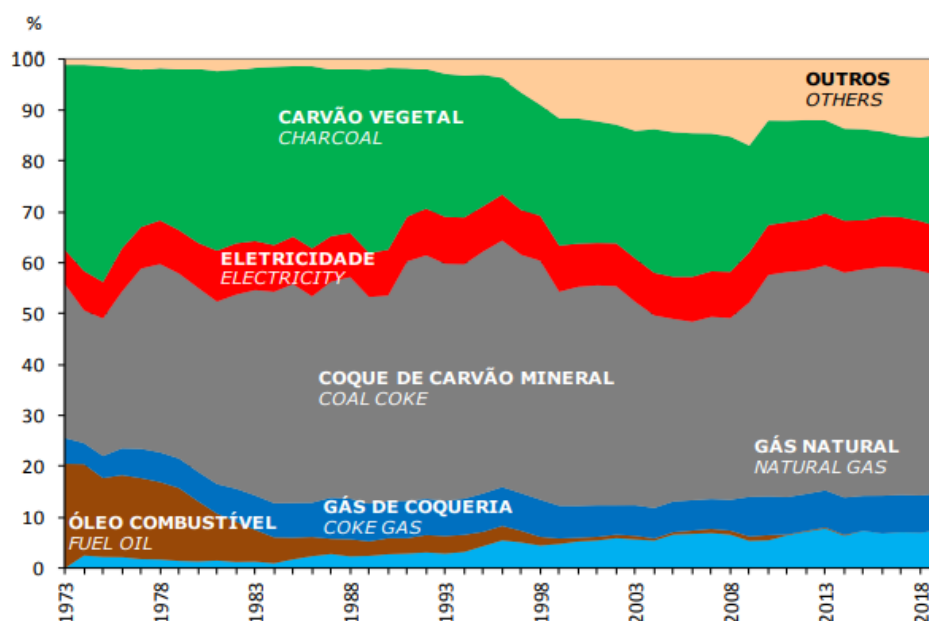
2.6 Matérias-primas e aspectos ambientais do Setor Siderúrgico

De acordo com a EPE (2020), as indústrias foram responsáveis por 30,3% (equivalentes a 78,8 milhões de tep) do consumo de energia no Brasil no ano 2019, no qual apenas o setor siderúrgico foi responsável por 6,1% (15,9 milhões de tep) desse consumo energético. O consumo médio de energia pode ser alterado de acordo com cada subsegmento da siderurgia. Além disso, alguns fatores também podem alterar a média, sendo eles: o tipo de processo utilizado, a qualidade do material utilizado e o mix de produtos produzidos (EPE, 2009).

As principais fontes de energia utilizadas na indústria siderúrgica são (EPE, 2020):

- Carvão vegetal;
- Coque de carvão mineral (coque);
- Gás natural;
- Energia elétrica;
- Óleo combustível;
- Gases de processo.

Figura 6 – Estrutura do consumo no setor Siderúrgico brasileiro



Fonte: EPE (2020)

A produção de aço via usinas integradas demanda uma maior quantidade de energia por tonelada de aço produzido (2,7 vezes mais que as semi-integradas). Tal fato acontece em função da alta demanda de energia térmica no processo de redução (alto-forno, sinterização e coqueria). Nas usinas semi-integradas, o consumo de energia e emissão de efluentes são menores por conta da utilização de sucata como matéria-prima, pelo uso de carvão vegetal e do forno de arco elétrico na etapa de redução (EPE, 2018).

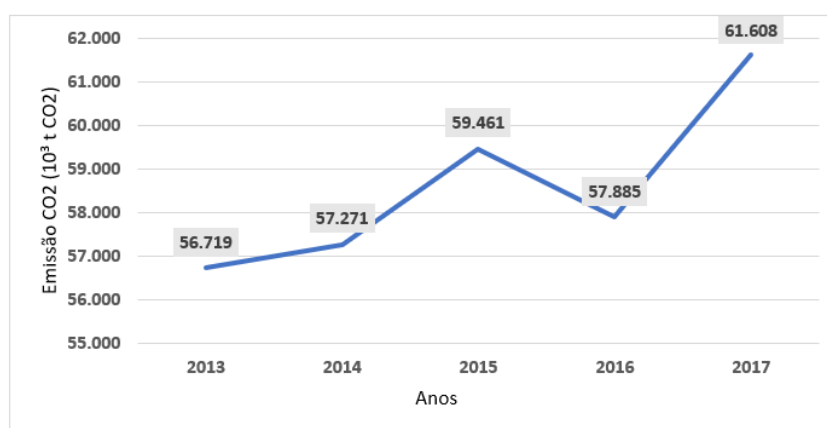
Além de grande consumidora de energia, a indústria siderúrgica também é responsável pela emissão de diversos efluentes, que se dá em consequência da grande quantidade de reações físico-químicas envolvidas em todas as etapas de produção. A Tabela 1 lista os principais efluentes emitidos pelas siderúrgicas integradas a coque. O dióxido de carbono (CO_2) terá mais visibilidade nesse trabalho, uma vez que representa 93% de emissões de GEE nas indústrias siderúrgicas, segundo a (WSA, 2020).

Tabela 1 – Principais efluentes emitidos pelas indústrias siderúrgicas a coque

	Principais insumos energéticos	Principais efluentes			
		Gasosos	Líquidos	Sólidos	
Rota integrada a coque	Sinterização	Coque	Material particulado, CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x , VOCS, HF e HCL	-	Pós, lamas e carepas
		Energia elétrica (baixo consumo)			
	Coqueria	Carvão metalúrgico	Material particulado, CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x , VOCS, benzeno, PAH e CH ₄	Amônia, benzeno, tolueno e xileno	Material particulado e alcatrão
		Energia elétrica (baixo consumo)			
	Alto-forno	Coque, PCI	Material particulado, CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x , VOCS, HF e HCL	-	Pós, lamas e escória
		Energia elétrica (baixo consumo)			
	Aciação a oxigênio (LD/BOF)	Energia elétrica (baixo consumo)	Material particulado, metais (zinc), CO, VOCS, HF e HCL	-	Pós, lamas, metais solúveis, zinco e escória
	Lingotamento contínuo	Energia elétrica (baixo consumo)	-	Óleo	Sólidos suspensos e sucata
	Laminação	Gás de coqueria, gás de alto-forno ou de aciação e energia elétrica (alto consumo)	Material particulado, CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x , VOCS e vapores ácidos	Óleos e ácidos	Carepas, lamas e <i>pickle liquor</i> (líquor ácido)

Fonte: Carvalho (2015)

Quanto à evolução da emissão de CO₂ no Brasil, em 2017, o setor do aço foi responsável pela emissão de 61 milhões de toneladas de CO₂ (BRASIL, 2018) (Figura 7). Tal valor passa a ser expressivo quando comparado com os níveis de emissão industrial no Brasil.

Figura 7 – Emissão de CO₂ no setor siderúrgico brasileiro

Fonte: Adaptado a partir de IABr (2018)

2.7 Uso da Energia na Produção do Aço

Por conta da crescente necessidade de transparência socioambiental em suas atividades, as siderúrgicas precisaram mensurar informações, desenvolver indicadores capazes de analisar sua eficiência energética e realizar projetos que reduzam as emissões de GEE (BORDALLO, 2012). Atualmente, grande parte das siderúrgicas brasileiras são orientadas pelos parâmetros estabelecidos na metodologia da WSA (World Steel Association). Seus indicadores ambientais são (WSA, 2020):

- Emissão de gases de efeito estufa (tCO₂/tab);
- Intensidade energética (GJ/tab);
- Eficiência de materiais (% de materiais convertidos em produtos e subprodutos);
- Sistemas de gerenciamento ambiental (% de empregados e contratados trabalhando em instalações certificadas na ISO 14.001, OHSAS 18.000 ou EMAS).

A avaliação da eficiência energética industrial se inicia pelo balanço energético que, por sua vez, é um relatório que contém os valores e fluxos de energia de um sistema (SOUZA, 2009). Os balanços energéticos dão suporte para análises mais profundas, como a de consumo energético.

Neste capítulo serão apresentados os dados de dois dos indicadores ambientais regidos pela WSA: o consumo de energia (também chamado de intensidade energética) no processo produtivo do aço e a emissão CO₂ por tonelada de aço bruto. Essas informações são consideradas referência no presente trabalho.

2.7.1 Intensidade Energética

De acordo com a WSA (2020), as usinas mais eficientes do mundo demandam em média 19,6 GJ/tab. Ao realizar um comparativo entre os dados de 2019 com os de 2017 e 2018 (Tabela 2), percebe-se uma baixa variação do consumo energético do setor, e essa estabilidade já vem se mantendo desde o início dos anos 2000. A WSA (2020) também cita em seus trabalhos que já houve uma redução de aproximadamente 60% na intensidade energética desde 1960, saindo de 50 GJ/tab para a média atual. Para um melhor entendimento do processo e quais são suas etapas mais energointensivas,

será abordado também a intensidade energética para a rota de usinas integradas, considerando as que estão instaladas no Brasil.

Tabela 2 – Intensidade energética por WSA (Gj/tab)

Intensidade energética (Gj/tab)	2017	2018	2019
	19.85	19.54	19.84

Fonte: Adaptado a partir de WSA (2020)

2.7.1.1 Intensidade Energética para a Rota Tecnológica: Usinas Integradas

Em relação aos valores de consumo energético das etapas do processo produtivo do aço, a etapa de redução é a mais energointensiva da produção, sendo responsável por 74,4% (12,2 GJ/tab) do consumo total até a etapa de laminação a quente (EPE, 2009), conforme Tabela 3. Esses valores se justificam pelo consumo do coque no alto-forno, que é fonte de carbono e atua como agente redutor do minério de ferro. Após a produção, uma fração do carbono é incorporada ao produto e o restante é emitido na forma de CO₂ (BRASIL, 2010). O coque, que é um produto do processo de coqueificação, tem como insumo o carvão mineral, que por sua vez é um combustível fóssil. Ao contrário da etapa de redução, o refino (aciaria a oxigênio) representa a menor taxa de consumo no processo (0,1 Gj/tab). Os valores tendem a zero devido a utilização do gás de alto-forno (GAF), que é produto do alto-forno.

Tabela 3 – Intensidade Energética para a Rota Tecnológica: alto-forno + forno a oxigênio

Etapa	Processo	Energético	Gj/tab
Preparação de materiais (minério e carvão)	Sinterização	Combustível	2,0
		Vapor	-0,2
		Eletricidade	0,2
		Total	1,9
		Coqueificação	Combustível
Vapor	0,1		
Eletricidade	0,1		
Total	0,8		
Redução (fabricação do ferro)	Alto-Forno		Combustível
		Vapor	0,4
		Eletricidade	0,1
		Oxigênio	0,2
		Total	12,2
Aciaria (fabricação do aço)	Forno a oxigênio	Combustível	-0,7
		Vapor	-0,2
		Eletricidade	0,1
		Oxigênio	0,4
		Total	-0,4
Lingotamento	Lingotamento Contínuo	Eletricidade	0,1
		Total	0,1
		Combustível	0,0
Laminação a quente	Aços longos	Eletricidade	0,0
		Total	0,1
		Combustível	1,6
Total		Eletricidade	0,3
		Total	1,8
		Combustível	14,9
		Vapor	0,1
		Eletricidade	0,9
		Oxigênio	0,6
		Total	16,5

Fonte: Adaptado a partir de EPE (2009)

2.7.2 Correlação da Emissão de CO₂ por tonelada de Aço Bruto

Quanto à emissão de CO₂ por tonelada de aço bruto, a WSA (2020) apresenta em seu estudo uma média de 1,82 tCO₂/tab para os anos de 2017, 2018 e 2019, como pode ser visto na Tabela 4. Apesar de se manter estável durante os 3 anos, os valores de emissão de CO₂ precisam ser anulados entre os anos de 2050 a 2070, como mostrado na seção 3.5 desse trabalho.

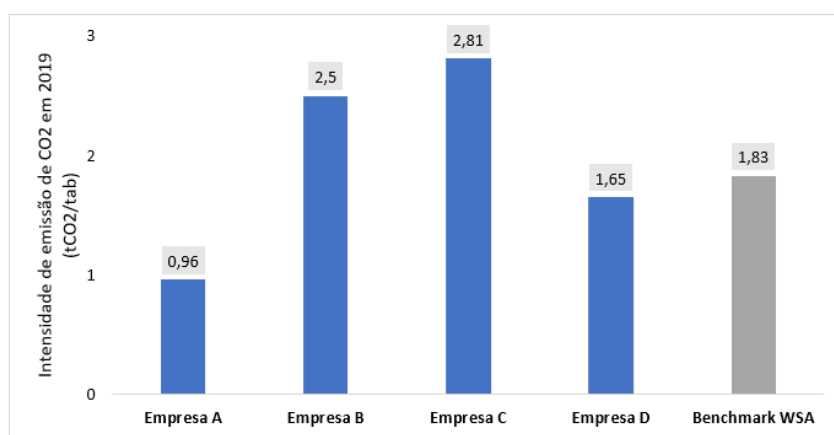
Tabela 4 – Emissão de CO₂ na produção de aço mundial - 2017 a 2019

Intensidade de emissão de CO₂ (tCO₂/tab)	2017	2018	2019
	1,84	1,81	1,83

Fonte: Adaptado a partir de WSA (2020)

Já existem diversos estudos que analisam tecnologias comercializadas e também avançadas que possam viabilizar a redução da emissão de CO₂ na siderurgia. Além disso, está sendo difundido pelas empresas a utilização dos Inventários de Emissões de GEE, onde é feito um mapeamento dos consumos energéticos e emissões por setor produtivo. Após finalização do inventário, os relatórios podem ser publicados no Registro Público de Emissões do Programa Brasileiro GHG Protocol (EMISSÕES, 2019). Ao realizar uma comparação entre dados de quatro siderúrgicas brasileiras considerando o *benchmark* da WSA para o ano de 2019 (Figura 8), o grupo fica com uma média de emissão de 1,98 tCO₂/tab, apresentando, então, um valor maior que a média mundial. A indústria brasileira ainda está em fase de adaptação quando se fala de mapear emissões e tornar público esses dados, por isso a dificuldade de encontrar informações mais detalhadas das siderúrgicas brasileiras.

Figura 8 – Emissão de tCO₂/tab para quatro siderúrgicas brasileiras



Empresa A: Gerdau - Empresa B: Ternium - Empresa C: Companhia Siderúrgica Nacional - Empresa D: Acelor Mittal do Brasil

Fonte: Adaptado a partir de Site Registro Público de Emissões (2019)

Com o avanço da tecnologia, é possível afirmar que a indústria siderúrgica se tornou fundamental para o cotidiano humano, uma vez que a sociedade depende cada vez mais de produtos feitos com aço. Além disso, ela também se torna ponto focal ao abordar um futuro mais sustentável para o planeta. Ainda nesse contexto, é possível concluir que o setor siderúrgico é regido por normas e regras de sustentabilidade que, dado a complexidade do processo produtivo, devem ser acompanhadas e atualizadas frequentemente. Para além disso, o capítulo demonstra a importância de se ter os dados energéticos mapeados que possibilitem realizar comparações entre as empresas

do setor. O capítulo Estudo de Uma Siderúrgica Integrada e Medidas de Mitigação traz informações sobre como é utilizada a energia em uma siderúrgica integrada.

3 Metodologia

Segundo Gil (2002), a pesquisa pode acontecer quando as informações disponíveis não estão organizadas o suficiente para responder um problema e, então, é desenvolvida de acordo com os conhecimentos dispostos em conjunto com a utilização cuidadosa de métodos, técnicas e procedimentos científicos.

As pesquisas podem ser classificadas quanto à sua natureza, abordagem, objetivo e procedimentos técnicos. Quanto à abordagem, esta pode ser considerada quantitativa e/ou qualitativa. A quantitativa envolve processos de coleta, análise e interpretação dos resultados de um estudo (CRESWELL, 2007). A qualitativa é voltada para aspectos da realidade que não podem ser quantificados, centrando-se na compreensão e explicação da dinâmica das relações sociais (FONSECA, 2002).

Para obter os resultados e respostas acerca da problematização apresentada neste trabalho, foram utilizadas como procedimentos metodológicos a pesquisa de abordagem qualitativa e quantitativa, uma vez que foi necessário estudar as medidas mitigadoras para redução de emissão de carbono. Posteriormente, tais medidas foram viabilizadas de acordo com as informações da planta industrial estudada.

Conforme Gil (2002), os objetivos da pesquisa podem ser classificados em explicativa: explicação dos fatores que contribuem para a ocorrência do problema; descritiva: descreve as características de um fenômeno ou população; e exploratória: onde o problema se torna explícito por meio da aproximação com o mesmo. Sendo este trabalho, então, classificado como pesquisa exploratória.

Quanto aos procedimentos técnicos, esta monografia é caracterizada como um estudo de caso, pois explora uma situação na vida real com a finalidade de explicar causas e formular hipóteses (GIL, 2002).

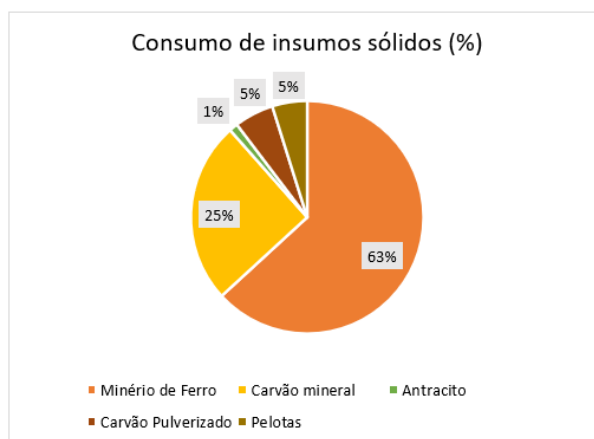
4 Estudo de Uma Siderúrgica Integrada e Medidas de Mitigação

4.1 Descrição da Empresa

O presente trabalho foi desenvolvido em uma empresa do ramo da siderurgia, líder no mercado em que atua. Será objeto de estudo apenas uma de suas usinas, situada no estado de Minas Gerais. Com uma capacidade de produção de 4,5 milhões de toneladas de aço por ano, seus principais insumos são o carvão mineral e o minério de ferro (Figura 9). A usina em questão é considerada integrada por empregar o coque de carvão mineral como termorredutor e, conseqüentemente, utilizar em seu processo de produção o alto-forno. Possui também laminadores distribuídos para a produção de aços longos - podendo ser representados por produtos finais como fio-máquina e perfis estruturais, comumente utilizados na construção civil e para aços planos (os produtos finais são chapas grossas e bobinas a quente). Seu processo produtivo compreende nas seguintes etapas:

- Coqueria;
- Sinterização;
- Alto-forno;
- Aciaria;
- Lingotamento;
- Laminação a quente;

Figura 9 – Consumo de insumos sólidos na planta industrial (2016)



Fonte: Elaboração própria a partir de ABM (2016)

O alto-forno exige uma uniformidade de cargas e isenção de materiais finos. Dessa forma, os processos de coqueria e sinterização são etapas onde há a preparação do material que será utilizado no alto-forno. Na coqueria, a mistura de carvões minerais é queimada e resfriada, se tornando o coque de carvão. Já na sinterização, há o processo de aglomeração dos finos de minério de ferro. Pode-se observar os processos esquematicamente na Figura 10.

Figura 10 – Esquematização do processo siderúrgico



Fonte: Elaboração própria

siderúrgicas se uniram e divulgaram por vários anos os seus respectivos balanços energéticos. Tais balanços apresentam dados como produção por setor, demanda e oferta de energia. As informações apresentadas neste capítulo são resultados de análises feitas no balanço energético do ano de 2016 da empresa estudada. Os dados foram publicados no ano de 2017 e estão disponíveis no site da ABM na área de anais e acervos técnicos.

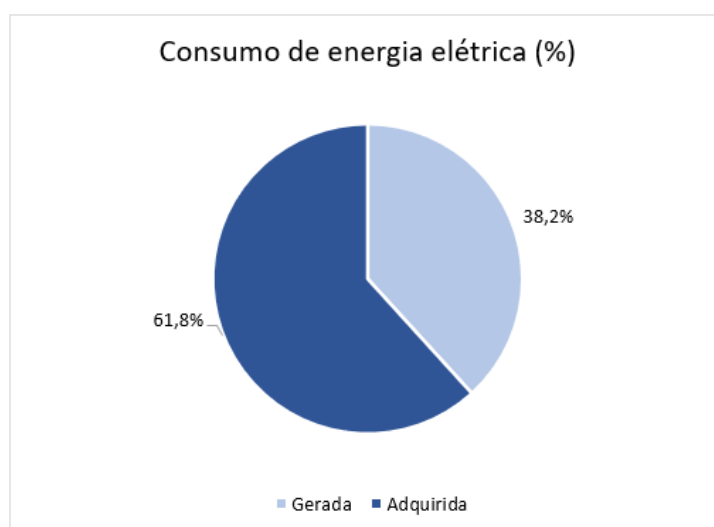
4.2 Diagnóstico energético da empresa

A seguir, serão apresentados os dados energéticos da empresa estudada, nos quais são apontados as informações de consumo e geração de energia elétrica, co-geração de gases siderúrgicos, a matriz energética da planta industrial, seu consumo energético e também a mensuração das emissões de CO₂ no processo industrial.

4.2.1 Diagnóstico da oferta e da demanda elétrica

A energia elétrica é considerada um insumo e também um produto do processo de produção siderúrgica. É característica deste tipo de indústria a sua alta geração, podendo em alguns casos se sustentar com sua própria energia. A usina estudada utiliza a energia elétrica gerada em sua unidade termoelétrica abastecida com gás natural e/ou gases siderúrgicos. Além disso, consome também uma parcela adquirida da concessionária (61,8%), totalizando em 1.248.664 MWh/ano, como pode-se observar na Figura 11.

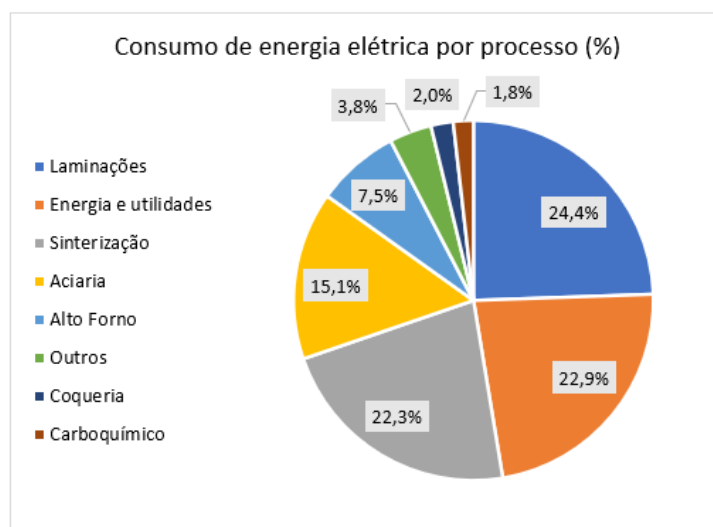
Figura 11 – Origem da energia elétrica consumida na unidade estudada (2016)



Fonte: Elaboração própria a partir de ABM (2016)

Quanto ao consumo específico por setor, conforme os dados em questão do período estudado, as laminações consumiram 24,4% do total de energia elétrica, o que acontece em decorrência do processo de conformação mecânica. O setor de Energia e Utilidades aparece em seguida com 22,9% do consumo total, sendo importante destacar que esta área não é considerada parte da linha produtiva do aço, mas é responsável pela geração e distribuição de energia para a usina. A sinterização é o terceiro maior consumidor, apresentando um consumo de 22,3%, como pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Consumo de energia elétrica por etapa (2016)



Fonte: Elaboração própria a partir de ABM (2016)

4.2.2 Gases combustíveis siderúrgicos

Durante o processo produtivo nas usinas integradas, existem etapas que liberam gases comumente chamados de gases siderúrgicos que, por conta do seu valor energético, podem ser reaproveitados. Os três principais são liberados nas etapas de coqueria, alto-forno e aciaria, sendo eles: o gás de coqueria (GCO), gás de alto-forno (GAF) e gás de aciaria (GAC), respectivamente. Após passarem por uma prévia limpeza, podem ser reutilizados como combustíveis em outras etapas do processo (SOUZA, 2009).

Fonseca (2017), cita em seu trabalho as seguintes informações sobre poder calorífico inferior (PCI) dos gases:

- PCI - gás de coqueria: 4.250 kcal/Nm³;
- PCI - gás de alto-forno: 900 kcal/Nm³;
- PCI - gás de aciaria: 1.900 kcal/Nm³.

De acordo com os dados analisados no Balanço Energético (ABM, 2016), o GCO possui o melhor índice de reaproveitamento, com perda de apenas 1% (Tabela 5), sendo empregado principalmente na etapa de Laminações e Energia e Utilidades. Em segundo lugar, aparece o GAF, com perda de 9%, tendo maior uso no setor de

Energia e Utilidades. O GAC é o que apresenta maior perda, chegando a cerca de 39%, e é utilizado apenas no setor de Energia e Utilidades. Os gases enviados para o setor de Energia e Utilidades são combustíveis para geração de energia elétrica. Já os utilizados nos setores produtivos funcionam como calor de processo. Tais dados, principalmente os de perdas, demonstram a possibilidade e espaço para projetos de eficiência energética, os quais já estão sendo realizados pela empresa.

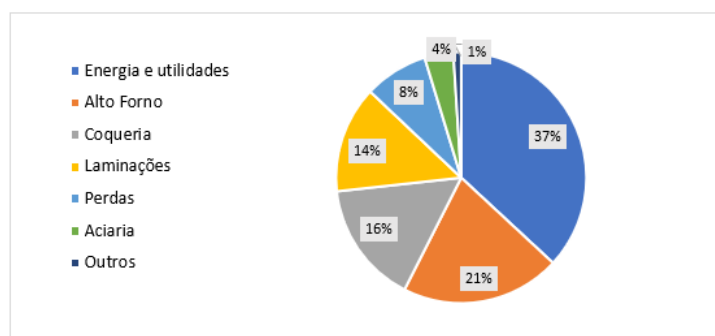
Tabela 5 – Geração e perda de gases siderúrgicos (2016)

Gás	Geração (Mj/tab)	Perda (%)
GCO	3.116	1%
GAF	4.929	9%
GAC	772	39%

Fonte: Elaboração própria a partir de ABM (2016)

Em relação ao consumo total de gases de processo, como mostra a Figura 13, o setor de Energia e Utilidades se apresenta como maior consumidor (37%), seguido pelo alto-forno (21%).

Figura 13 – Consumo de gases siderúrgicos por etapa (2016)



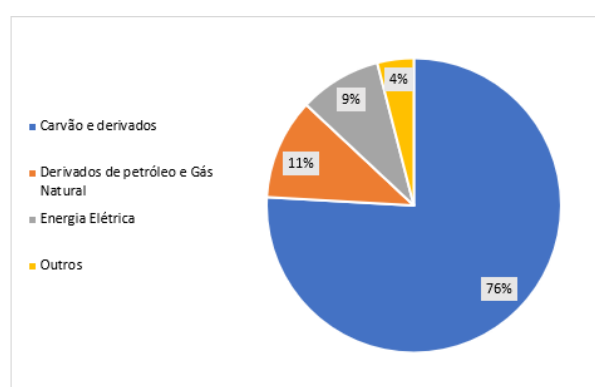
Fonte: Elaboração própria a partir de ABM (2016)

4.2.3 Matriz energética da planta industrial

A matriz energética representa a oferta de energia para realizar uma atividade. A do processo siderúrgico é mostrada na Figura 14 e Tabela 6, em que se observa em primeiro lugar os carvões minerais e derivados com 76% do total, os derivados de petróleo em segundo lugar com 11% e a energia elétrica em terceiro lugar com 9%.

Há uma relação inversamente proporcional entre o consumo de carvão mineral e derivados de petróleo, então é avaliado pela empresa qual é mais viável economicamente para uso. Quanto à distribuição de consumo de energia pelas etapas do produção (Figura 15), a etapa de redução (coqueria + sinterização + alto-forno) é responsável por 86% do total consumido, seguido da aciaria com 5% e laminações com 4%. Como mostrado anteriormente, esse alto consumo na redução é justificado pelo uso do carvão mineral nas coqueiras e do coque de carvão no alto-forno.

Figura 14 – Resumo da matriz energética da empresa Siderúrgica (2016)



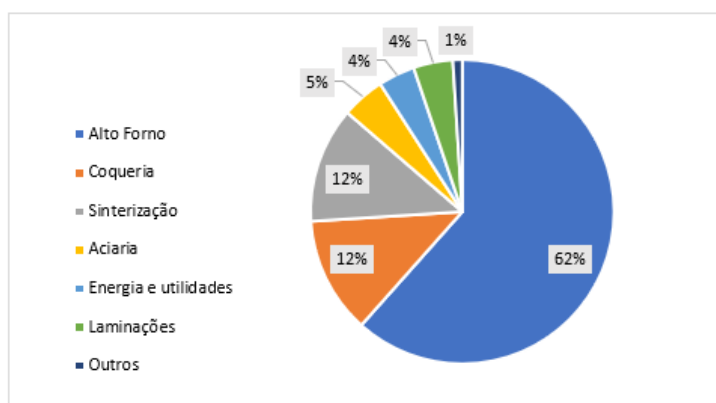
Fonte: Elaboração própria a partir de ABM (2016)

Tabela 6 – Matriz energética detalhada (Gj/ano) - (2016)

Matriz energética detalhada (Gj/ano)	2016
Carvão metalúrgico	47.761.553
Coque metalúrgico	46.667.043
Coque de petróleo	16.003.873
Energia Elétrica	13.067.270
Finos de carvão	12.663.693
Antracito	4.367.961
O ₂ + N ₂ + Ar ₂	2.668.737
Gás natural	1.391.245
Outros	231.395
TOTAL	144.822.770

Fonte: Elaboração própria a partir de ABM (2016)

Figura 15 – Consumo energético por etapa (2016)

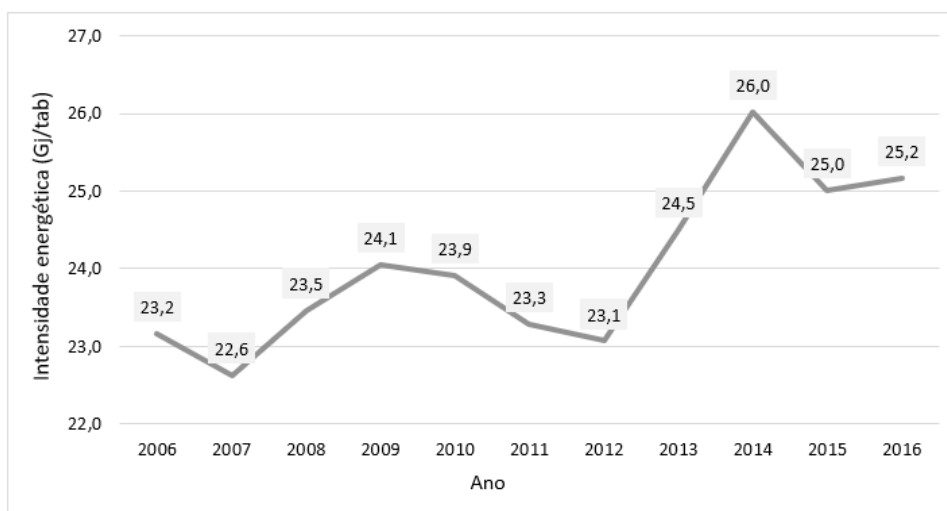


Fonte: Elaboração própria a partir de ABM (2016)

4.2.4 Intensidade energética para a unidade siderúrgica

A intensidade energética representa o consumo de energia por unidade física de produto, e seu cálculo é realizado a partir do quociente de consumo total anual de energia pela produção anual. Nesta seção, será estudado o consumo energético para a produção de aço bruto na planta industrial analisada. Em um período de 10 anos (2006 a 2016), a unidade teve uma média de 24 GJ/tab, como mostra a Figura 16. É possível analisar que os valores de intensidade energética tiveram uma elevação a partir de 2012. Esta variação se dá pela redução de produção de aço e também pela verticalização da empresa, quando se começou a produzir mais produtos laminados, demandando então, mais energia durante o processo de produção. A tendência futura mostra o mesmo padrão de elevação dos valores de consumo. Além da redução de produção de aço, outro fator que também pode interferir no cálculo é o menor reaproveitamento de gases siderúrgicos.

Figura 16 – Evolução temporal da intensidade energética na planta industrial



Fonte: Elaboração própria a partir de ABM (2006 a 2016)

4.2.5 Mensuração das emissões de CO₂ pelo método *Top-Down*

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) desenvolveu dois métodos de cálculo de emissão de CO₂, chamados de a abordagem de setor: *Bottom-Up* e abordagem de referência: *Top-Down*. A metodologia *Bottom-Up* identifica como e onde ocorrem as emissões, possibilitando então, a identificação de emissão por setor. Já o uso da metodologia *Top-Down* possibilita estimar as emissões de CO₂ de um sistema utilizando apenas seus dados de oferta de energia e suas formas de uso (IPCC, 1996). Por conta da afinidade com os dados desse trabalho e da menor complexidade, foi escolhido o método *Top-Down* para o estudo desenvolvido neste capítulo. De acordo com o Ministério da Ciência e Tecnologia, para se utilizar essa metodologia, é necessário desenvolver as seguintes etapas (MCT, 2006):

- Determinação do consumo de combustíveis em suas unidades de medidas originais - neste estudo serão utilizados os dados de consumo energético divulgados pela empresa;
- Conversão do consumo de combustíveis para a unidade de energia comum, *Terajoules* (TJ);
- Determinação da quantidade do carbono contido no consumo, para se computar o conteúdo real de carbono possível de ser emitido. Para realizar esse cálculo,

deve-se multiplicar o valor de consumo pelo fator de emissão de carbono. Nesse trabalho serão utilizados os fatores de emissão disponibilizados pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT, 2006).

- Correção dos valores para se considerar a combustão incompleta do combustível com a finalidade de calcular a real quantidade de carbono oxidada na reação. De acordo com o (IPCC, 1996), é recomendado utilizar 0,98 para carvões, 0,99 para o petróleo e seus derivados, 0,995 para o gás natural.
- Conversão da quantidade de carbono oxidada em emissões de CO₂. Valor obtido a partir da multiplicação do valor encontrado por 44/12, que são os pesos atômicos do CO₂ e (C), respectivamente.

Exclusivamente para o cálculo de Energia elétrica nesse capítulo foi utilizado a taxa de emissão citada no Balanço Energético Nacional de 2021, que é de 78 KgCO₂/MWh.

Após realizar o somatório de emissão dos combustíveis analisados, é possível concluir que a emissão total, a partir desse cálculo, foi de 12,75x10⁶ tCO₂ no ano 2016, sendo o coque metalúrgico (de carvão mineral) responsável por 39% do emitido, como pode ser observado na Tabela 7. As emissões provenientes dos gases siderúrgicos não foram consideradas nesse cálculo, uma vez que constituiria dupla contagem.

Tabela 7 – Etapas de quantificação das emissões de CO₂

Matriz energética	(Tj/ano)	Conteúdo de Carbono (tC)	Emissão carbono (Gg C)	Emissão CO2 (10 ⁶ t CO2)	%
Carvão metalúrgico	47.762	1.232.248	1.207.603	4,43	35%
Coque metalúrgico	46.667	1.376.678	1.349.144	4,95	39%
Coque de petróleo	16.004	440.107	435.705	1,60	13%
Energia Elétrica	13.067	-	-	0,10	1%
Finos de carvão	12.664	326.723	320.189	1,17	9%
Antracito	4.368	112.693	110.440	0,40	3%
Gás natural	1.391	21.286	21.180	0,08	1%
Outros	231	5.970	5.851	0,02	0%
TOTAL	142.154	3.515.705	3.450.111	12,75	100%

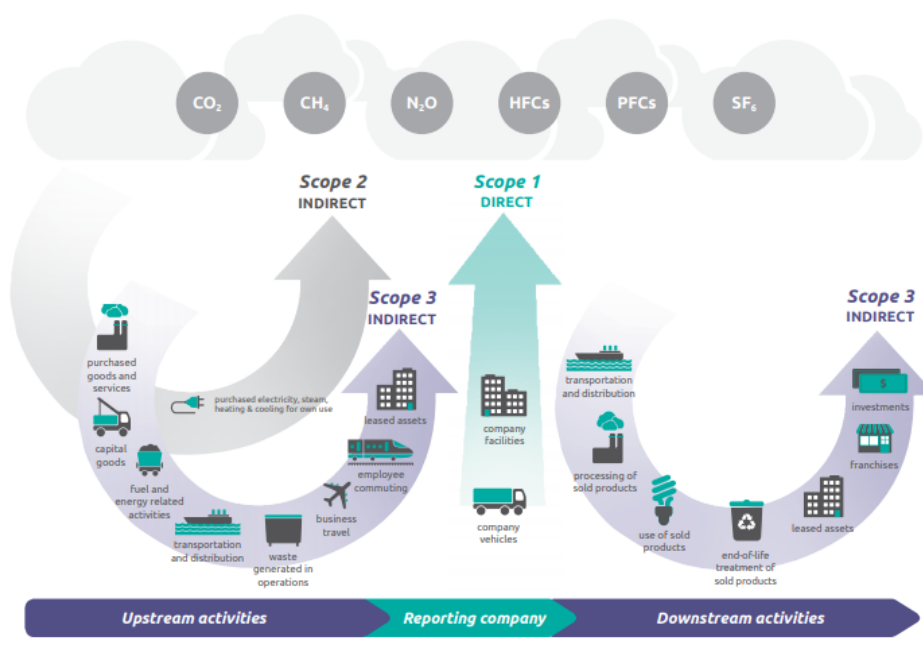
Fonte: Elaboração própria

4.3 Gerenciamento de emissões de GEE

O primeiro passo antes do desenvolvimento de planos e estratégias mitigadoras é a realização do mapeamento de perfil das emissões na organização, podendo então, ser utilizado o inventário de GEE. Além de demonstrar responsabilidade ambiental, a empresa que utiliza tal recurso consegue também visualizar oportunidades no mercado de carbono, garantir eficiência econômica, energética e operacional. O *GHG Protocol* tem sido a metodologia mais utilizada mundialmente pelos governos e empresas, com o intuito de entender, quantificar e gerenciar emissões. A metodologia explica que devem ser seguidas seis etapas para a realização dos inventários (GVCES, 2009):

1. **Seleção dos limites organizacionais do inventário:** é necessário definir, de acordo com a estrutura da empresa, se serão inseridos no inventário as operações de propriedade integral, *joint ventures* e subsidiárias. A partir da definição, é escolhida uma abordagem para o levantamento de dados e consolidação das emissões;
2. **Definição dos limites operacionais do inventário:** etapa onde é identificada as emissões associadas à operações, podendo então, serem classificadas como diretas e indiretas. As emissões diretas são as oriundas de fontes controladas pela organização. Já as indiretas tem origem nas atividades realizadas pela empresa, mas são controladas por outra. Para auxiliar na distinção, foram definidos três tipos de escopos: 1, 2 e 3. O escopo 1 apresenta as emissões diretas de GEE, sendo essas a geração de eletricidade, transportes de materiais e resíduos e fabricação de produtos químicos. Já o escopo 2 apresenta as emissões indiretas de GEE de eletricidade, no qual são calculados e considerados as emissões que ocorrem fisicamente no local onde a eletricidade é gerada. Se contabiliza dessa forma pois, dependendo da fonte de energia que gera a eletricidade, pode ser uma grande emissora. Por último, o escopo 3 aborda as outras emissões indiretas de GEE, como a utilização de produtos e serviços vendidos, o tratamento de lixo em operações e a extração e produção de materiais e combustíveis comprados, como pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 – Panorama geral dos escopos e emissões ao longo da cadeia de valor



Fonte: GHG - 2011

- Escolha da metodologia de cálculo e fatores de emissão:** podem ser utilizadas duas ferramentas para realizar o cálculo de GEE, as intersetoriais e setoriais específicas. A primeira pode ser aplicada em diferentes setores, na qual são calculados dados como as emissões de combustão estacionária, combustão móvel, compra de eletricidade, compra de vapor e viagem de negócios. A segunda classe é projetada para calcular emissões em setores específicos, como alumínio e aço. Quanto aos fatores de emissão, existem fatores-padrão que podem ser utilizados em todos os setores (e também foram aplicados na seção 5.2.5 desse trabalho), mas é possível inserir fatores personalizados que sejam mais representativos em relação a operação da empresa (GVCES, 2010).
- Coleta de dados das atividades que resultam na emissão de GEE:** nesse caso a empresa deve realizar o levantamento de seus dados de emissão de acordo com seus processos específicos, levando em consideração também os escopos do protocolo (GVCES, 2010).
- Fazer o cálculo das emissões:** os métodos de cálculos das emissões variam conforme a ferramenta escolhida na etapa 3 do protocolo. A partir da escolha,

deverá ser calculado de acordo com o fator de emissão da atividade estudada (GVCES, 2009).

- 6. Elaborar relatório de emissões de GEE da organização:** deve-se planejar com antecedência a forma de unir dados de todas as unidades da empresa e o conteúdo que será divulgado também deve ser discutido previamente.

Segundo GVces (2009), além das seis etapas, ainda é necessário realizar a gestão da qualidade dos inventários, uma vez que as informações têm de ser precisas e sua gestão corrige erros e consegue identificar as áreas onde os investimentos irão resultar em melhorias significativas. É citado também a importância da divulgação externa do inventário para que se tenha a possibilidade de realizar *benchmark* e aumentar a transparência da empresa para com a sociedade.

4.4 Medidas mitigadoras para a anulação da emissão de carbono

A partir da realização do inventário na empresa, é possível saber quais ações podem mitigar ou neutralizar as quantidades de emissão de GEE. McKinsey (2009) ressalta que existem grupos de medidas que podem ser tomadas para atingir essa redução, podendo ser:

- Medidas de eficiência energética: estão incluídos nesse grupo as trocas de equipamentos e componentes;
- Troca de combustível: uso de biomassa ao invés de carvão mineral na etapa de redução;
- Utilização de energias renováveis, como a energia eólica e solar como fontes de eletricidade;
- Processos onde há o sequestro ou captura de CO₂, podendo ocorrer de forma natural ou a partir de tecnologias de sequestro de carbono.

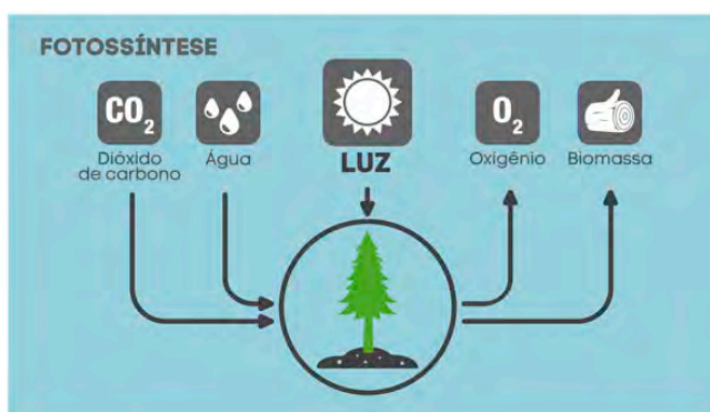
Nesse capítulo serão abordados o sequestro de carbono por meio do plantio de florestas e o aproveitamento da energia solar como fonte de energia elétrica na siderúrgica em questão.

4.4.1 Compensação de CO₂ com plantio de florestas

Existem diferentes finalidades de florestas, podendo ser do tipo plantada, que são áreas de reflorestamento, utilizadas para atender a demanda por produtos florestais, como a indústria de papel e celulose, o carvão vegetal e a borracha. Essas atuam como solução de mitigação para a degradação das florestas do tipo nativa, que por sua vez mantem a preservação da biodiversidade. As duas classes promovem diversos serviços para o ecossistema, como a regulação do fluxo hídrico, conservação do solo e ciclagem de nutrientes (FLORESTAL, 2021).

As árvores são consideradas recicladoras de CO₂ e por meio da fotossíntese, absorvem o carbono e o estocam em sua biomassa (folhas, tronco, raízes), como pode ser observado na Figura 18. Seu armazenamento nas diversas regiões da árvore são chamados de reservatório de carbono. Dessa forma, o volume absorvido em uma floresta pode exceder as suas próprias emissões, uma vez que ela emite CO₂ durante sua respiração no período noturno, podendo então, ocorrer o "sequestro do carbono"(IBA, 2018). De acordo com Florestal (2021), uma árvore plantada na floresta tropical da América do Sul pode captar em média 15,6 kg de CO₂ por ano nos primeiros 20 anos, e 4,4 kg de CO₂ após esse período.

Figura 18 – Fotossíntese



Fonte: IBA - 2018

A prática de compensação de GEE por meio de plantio de florestas já tem sido utilizada desde 1990 e foi impulsionada pelo Protocolo de Kyoto (1997), quando abrangeu a utilização do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). O MDL é um instrumento de política global que, por meio da atividade florestal, permite a geração de

carbono em determinadas regiões do mundo e a posterior venda do crédito de carbono para as nações e empresas que não tem possibilidade de redução de emissão de CO₂, seja pelo custo ou porque ainda não há tecnologia disponível para tal (FLORESTAL, 2009). Nessa linha, como alternativa de compensação para unidade industrial estudada, surge o investimento financeiro no mecanismo REDD+ (Redução de Emissões de gases de efeito estufa provenientes do Desmatamento e da Degradação floresta) do fundo Amazônia. Tal instrumento é voltado para o financiamento de conservação de florestas, e qualquer organização pode se engajar com um projeto por meio da aquisição de créditos de carbono gerado pelas florestas (BIOFILICA, 2021).

4.4.2 Aproveitamento da energia solar

A troca da fonte de energia elétrica também pode ser uma opção quando se trata de medidas mitigadoras. Como mostrado na seção 5.2.1 desse trabalho, 61,8% (aproximadamente 770.000 Mwh/ano) da energia elétrica consumida na unidade industrial tem origem do Sistema Interligado Nacional do Brasil (SIN). A função do SIN é a produção e transmissão de energia elétrica para toda região nacional. De acordo com os dados do EPE (2021), pode-se considerar que a energia elétrica oriunda desse sistema possui o fator de emissão de 78 KgCO₂/MWh. Como alternativa para redução da emissão, surge a autogeração de energia através de uma instalação fotovoltaica. Autarcas (2017) explica que, para a geração de energia fotovoltaica, o fator de emissão é em média 35 kgCO₂/MWh, 66% menor que o do SIN. As informações e cálculos para a realização da transição de fonte de energia serão mostrados a seguir.

4.4.2.1 Dimensionamento de uma usina solar

Como caracteriza EPE (2012), a produtividade de uma instalação fotovoltaica depende do índice de irradiação solar da região em que vai ser inserida. Para realizar o seu dimensionamento, será considerado a instalação nos arredores da cidade de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais. O (CRESEB, 2017) indicou o índice de 5,17 Kwh/m²/dia para a região, como pode ser observado na Figura 19.

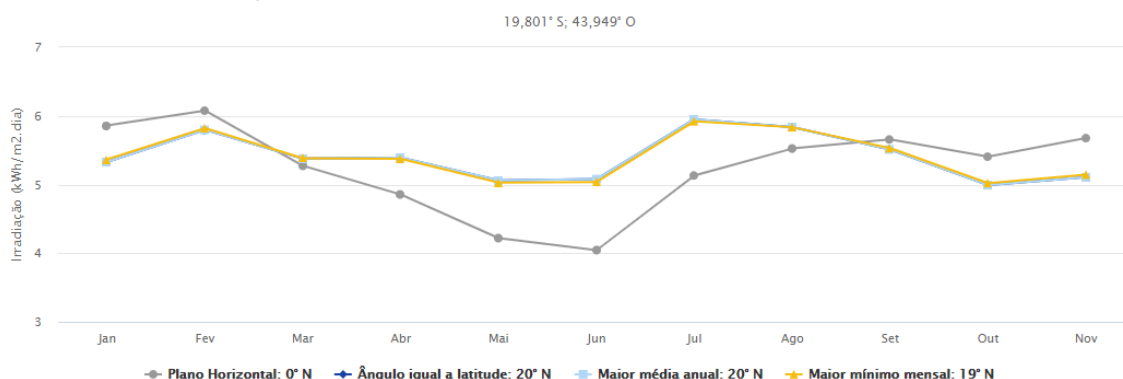
Figura 19 – Irradiação solar na região de estudo

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Belo Horizonte
 Município: Belo Horizonte , MG - BRASIL
 Latitude: 19,801° S
 Longitude: 43,949° O
 Distância do ponto de ref. (19,815833° S; 43,954167° O): 1,7 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,86	6,08	5,27	4,86	4,22	4,05	4,32	5,13	5,52	5,66	5,41	5,68	5,17	2,03
✓	Ângulo igual a latitude	20° N	5,33	5,79	5,38	5,39	5,06	5,08	5,34	5,95	5,84	5,51	4,99	5,11	5,40	,96
✓	Maior média anual	20° N	5,33	5,79	5,38	5,39	5,06	5,08	5,34	5,95	5,84	5,51	4,99	5,11	5,40	,96
✓	Maior mínimo mensal	19° N	5,37	5,82	5,38	5,38	5,03	5,04	5,30	5,92	5,83	5,53	5,02	5,14	5,40	,90

Irradiação Solar no Plano Inclinado –Belo Horizonte–Belo Horizonte, MG–BRASIL



Fonte: CRESEB - 2017

Com os dados de demanda de energia da planta industrial e irradiação solar por metro quadrado na cidade de Belo Horizonte, pode-se calcular qual seria o tamanho necessário da fazenda solar para atender a demanda energética da siderúrgica. A Tabela 8 indica como foi feito o dimensionamento. Inicialmente foram convertidos os dados da necessidade de energia elétrica da unidade industrial de MWh/ano para MWh/dia, e realizado o cálculo da capacidade (potência) da usina solar. Levou-se em consideração as perdas de temperatura, incompatibilidade elétrica, cabeamentos, acúmulo de sujeira e inversor, resultando então em um rendimento do sistema de média 80%. Com os dados e resultados, chegou-se a conclusão de que seria necessário instalar uma usina solar de capacidade 52 MW para atender 10% da demanda, na qual seria necessário aproximadamente 152 mil placas fotovoltaicas de 340W, abrangendo uma área de 296 mil m². Para se obter o investimento financeiro, considerou-se os preços médios do mercado das placas fotovoltaicas e inversores. Também foi incluído no cálculo os custos de instalação e outros materiais.

Fórmula de dimensionamento

$$PT = \frac{E_G}{T_E \cdot R} \tag{4.1}$$

- PT: Potência Total dos Painéis (MWh)
- E_G : Energia de geração - demanda da empresa (MWh/dia)
- T_E : Tempo de exposição (h/dia)
- R: Rendimento do sistema - 80%

Tabela 8 – Dimensionamento de uma usina solar

Necessidade de energia da siderúrgica (MWh/ano)	770.000
Necessidade de energia da usina siderúrgica (Mwh/mês)	64.167
Necessidade de energia da siderúrgica (MWh/dia)	2.139
Irradiação solar - Belo Horizonte (KWh/m ² /dia)	5,17
Definição da capacidade da usina solar (MW)	52
Número de placas para atender a 20% da demanda da siderúrgica	152.100
Preço - painel fotovoltaico 340W	R\$ 850,00
Preço inversor 60kW	R\$ 28.000,00
Outros custos de materiais e instalação	R\$ 15.000.000,00
Área de instalação (m ²)	295.731
Investimento total	R\$ 166.000.000

Fonte: Elaboração própria

Sendo assim, após a apresentação dos dados energéticos da empresa, é possível analisar que a siderurgia demanda vários tipos de energia, mas a sua principal é a energia térmica de origem de combustíveis fósseis, que por consequência é grande emissora de CO₂. Realizar o mapeamento de fontes de energia e setores mais energointesivos são de extrema importância para poder desenvolver e propor medidas que reduzam os impactos desse alto uso energético nas indústrias siderúrgicas. Além disso, é essencial ressaltar que os dados mostrados nesse trabalho são informações amplamente divulgadas na internet, e que apesar de se conseguir fazer o cálculo de emissão a partir delas, seriam necessários mais dados para que o resultado fosse suficientemente preciso. Para atingir essa precisão, é fundamental que se realize o inventário de emissões dentro da empresa. É possível notar que para atender a demanda total de energia elétrica da empresa, teriam que ser construídas mais usinas

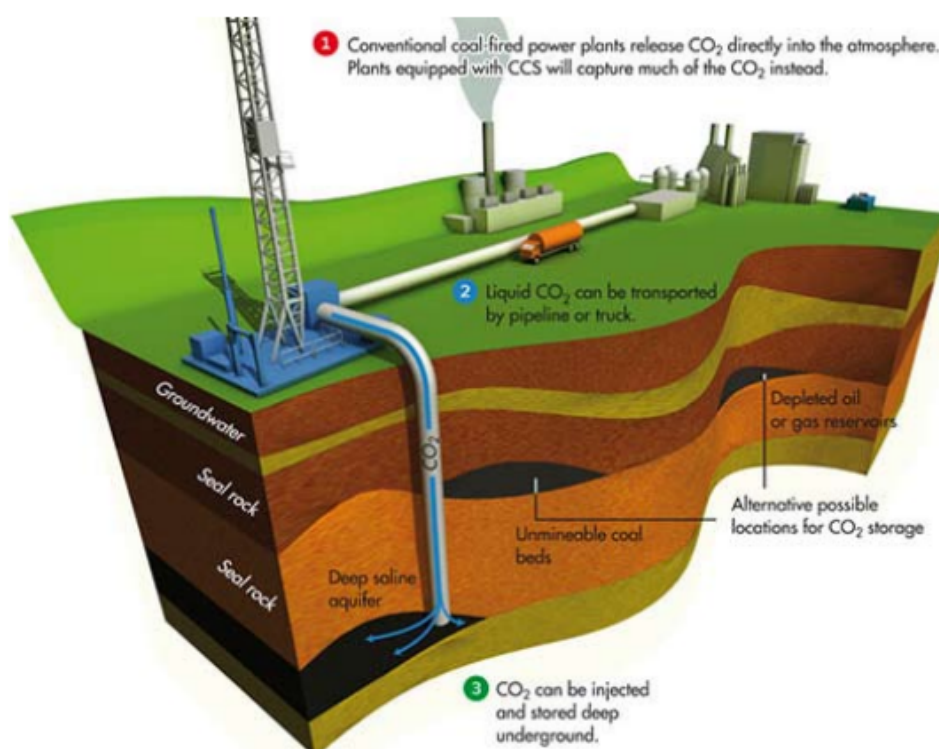
solares do que a que foi dimensionada nesse capítulo. O investimento, além de ser rentável, é importante para estratégia de redução de emissão de CO₂, por conta das emissões oriundas das fontes de energia.

4.4.3 Pontos de ação futuro

Surge como tecnologia disruptiva a substituição do coque de carvão mineral pelo hidrogênio. Nesse caso o hidrogênio atua como agente redutor do minério de ferro, liberando vapor de água ao invés de dióxido de carbono. Hansen et al. (2019) citam em seu trabalho que para adoção de tal tecnologia, seria necessário realizar a troca de equipamentos das etapas de alto-forno e aciaria, onde o hidrogênio seria gerado por energia elétrica de fontes renováveis, e, assim a redução ocorreria por eletrólise e o refino a oxigênio seria substituído pela aciaria elétrica. O gás de coqueria que é reaproveitado no processo deixaria de existir, demandando então uma maior necessidade de energia elétrica nas fase de laminação. Projetos pilotos de instalação dessa rota já tem sido realizados em indústrias siderúrgicas da Suécia, com previsão de finalização e produção de aço em larga escala para 2040.

A literatura ainda descreve outro projeto potencial, o de tecnologia de captura e sequestro de carbono (CCS). Essa tecnologia aponta que o CO₂ é separado dos outros gases e capturado no processo produtivo antes mesmo de entrar em contato com a atmosfera. Posteriormente é transportado por meio de dutos, caminhões e navios, e pode ser armazenado em reservatórios degradados de petróleo e gás, aquíferos profundos e cavernas de sal. Apesar dessa tecnologia existir desde 1996, ela ainda está sendo estudada para a inserção nas indústrias siderúrgicas (FBDS, 2009). Nikoleris, Åhman e Nilsson (2012) citam em seu trabalho que introduzir o CCS nas indústrias de aço requer grande desenvolvimento de tecnologias para alteração de processos chave nas siderurgias, como é o caso da etapa de redução mas, quando instalada pode atingir uma captura de até 75% do CO₂ emitido. A Figura 20 demonstra como funciona o processo CCS.

Figura 20 – Tecnologia de captura e sequestro de carbono



Fonte: FBDS - 2009

Dessa forma, após a exposição das medidas de descarbonização, é possível observar a importância do inventário de emissões e a necessidade de um conjunto de estratégias para que a redução aconteça efetivamente. Isso se dá devido a complexidade e grandiosidade da indústria estudada nesse trabalho. Quando o consumo e emissões de energia são intensivos, nenhuma medida sozinha se torna suficiente para atender a demanda. Além disso, foram apresentadas medidas disruptivas que tem sido mapeadas pelo setor siderúrgico como solução a longo prazo para redução quase total das emissões.

5 Considerações finais

O trabalho pretendeu entender e analisar diferentes medidas de mitigação para neutralização da emissão de carbono a partir do estudo de caso em uma siderúrgica integrada. Essa compreensão se deve em razão da dependência humana do aço ? visto que cada vez mais se usa produtos feitos deste material ? e da sua relevância nos setores de economia e meio ambiente, uma vez que o setor é grande emissor de GEE na atmosfera. Foi necessário, então, estudar os conceitos técnicos sobre o processo siderúrgico, onde pode-se perceber que existem duas principais rotas de produção de aço no mundo, sendo a integrada a mais utilizada.

No cenário mundial, a China é o país que mais produz aço (56,7% da produção global) e que mais emite gases do efeito estufa no mundo. A análise permite entender que para as políticas de redução de emissão serem efetivas, tem de haver participação ativa da China. Já o Brasil se estabelece em nono lugar nas posições de maiores produtores globais, mas apresenta o pioneirismo na utilização do carvão vegetal em parte das usinas siderúrgicas do país, ficando em sétimo lugar no *ranking* de nações com maior desenvolvimento de tecnologia no setor siderúrgico.

Com o estudo do setor, percebeu-se que as siderúrgicas são regidas por normas de sustentabilidade, onde os indicadores ambientais são acompanhados, como o de emissão de GEE e intensidade energética nas indústrias. A partir dessas informações, foi possível concluir que nas usinas integradas, a etapa de redução do minério de ferro é a mais energointensiva pois utiliza do carvão mineral como agente redutor e como combustível para geração de energia. O carvão mineral por sua vez é um combustível fóssil, sendo ele grande responsável pelas emissão de CO₂.

Ao analisar os dados da unidade industrial, percebe-se a homogeneidade entre as indústrias do setor do aço. Observou-se um grande consumo de energia térmica na etapa de redução, que abrange as áreas de coqueria, sinterização e alto-forno, assim como foi observado na revisão bibliográfica. Além disso, também foi possível verificar que há uma grande reutilização de gases siderúrgicos, aumentando a eficiência energética do processo produtivo.

A comparação entre os métodos de mensuração de emissões de CO₂ mostrou que a metodologia *Top-Down* foi a mais adequada quando utilizada com as informações

da usina integrada. Os dados identificam que as emissões no processo produtivo em questão foram de cerca 12,75 MtCO₂ no ano de 2016, valores esses que tem oportunidade de redução se forem adotadas medidas mitigadoras de emissão.

No capítulo 4, onde estão inseridas as propostas de mitigação para neutralização da emissão de CO₂, pode-se perceber que existem diversas linhas de propostas, sendo as de compensação por meio de plantio de florestas e a instalação de usinas solares mais voltadas para a realidade brasileira e com potencial de redução parcial das emissões na siderúrgica integrada. Em relação as propostas de tecnologias disruptivas, tanto a de redução do minério de ferro por meio do hidrogênio, quanto a de captura e sequestro de carbono, já existem projetos piloto em andamento e tendência de acontecer mais tardiamente, com potencial de redução de quase 100% das emissões oriundas das indústrias siderúrgicas.

O alerta dado por relatórios do IPCC indica que as mudanças visando a redução de emissão, sejam elas disruptivas ou tradicionais, têm de acontecer imediatamente, uma vez que é necessário anular as emissões entre 2050 e 2070. Por conta dessa exigência, foi percebido na realização desse trabalho, uma maior movimentação na área de desenvolvimento de pesquisas, principalmente internacionais. Espera-se que nos próximos 20 anos aconteçam mudanças drásticas nos processos produtivos siderúrgicos e ademais.

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Verificar, com maiores detalhes operacionais, a realização do inventário de emissão de gases do efeito estufa utilizando a metodologia *GHG protocol*;
- Estudo da viabilidade de troca de combustível nas indústrias siderúrgicas: uso de biomassa ao invés de carvão mineral na etapa de redução;
- Análise de conjunturas de governos e empresas para financiamentos de projetos de transição para "Economia Verde" nas indústrias siderúrgicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM). **BALANÇO ENERGÉTICO GLOBAL 2016** - GERDAU OURO BRANCO. [S.l.], 2016. ABM.

Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM). 2021. **ArcelorMittal Brasil lança meta de redução de emissão de CO2 até 2030**. Disponível em: <<https://www.abmbrasil.com.br/por/noticia/arcelormittal-brasil-lanca-meta-de-reducao-de-emissao-de-co2-ate-2030>>. Acesso em: 31 jul. 2021.

ADACHI, V. 2020. **Gerdau vai atrelar bônus de executivos a ESG e prepara meta de corte de CO2, diz CEO**. Disponível em: <<https://www.capitalreset.com/gerdau-vai-atrelar-bonus-de-executivos-a-esg-e-prepara-meta-de-corte-de-co2-diz-ceo/>>. Acesso em: 31 jul. 2021.

BIOFILICA. 2021. **REDD+**. Disponível em: <<https://www.biofilica.com.br/creditos-de-carbono/>>. Acesso em: 25 ago. 2021.

BORDALLO, L. P. **AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE USA DOS NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA BRASILEIRA PARA PRODUÇÃO DE AÇO**. Tese (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **EMISSIONES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NOS PROCESSOS INDUSTRIAIS - PRODUÇÃO DE METAIS**. [S.l.], 2010.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **Uma viagem pela indústria do aço**. [S.l.], 2013.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **Relatório de Sustentabilidade**. [S.l.], 2018.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **Parque Siderúrgico**. 2019. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/parque-siderurgico/>>. Acesso em: 28 mai. 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **Mini Anuário 2021**. [S.l.], 2021.

CARVALHO, P. S. L. de. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade**. Siderurgia, BNDES Setorial 41, p. 181–236, 2015.

Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getulio Vargas (GVCES). **Guia para a elaboração de inventários corporativos de emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE)**. 2009.

Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getulio Vargas (GVCES). **Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol**. 2010.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESEB). 2017. **Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 21 ago. 2021.

- CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa**. 2. ed. Porto Alegre: Arimed, 2007.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Caracterização do uso da energia no setor siderúrgico brasileiro. Estudos Setoriais**, 2009.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. [S.l.], 2012.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SEGMENTOS INDUSTRIAIS SELECIONADOS - SEGMENTO CADEIA SIDERÚRGICA**. [S.l.], 2018.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**. [S.l.], 2020.
- Empresa de Pesquisa Energética. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**. [S.l.], 2021.
- ESALQ FLORESTAL JUNIOR (Esalq). **Estimativa da biomassa e carbono em áreas restauradas com plantio de essências nativas**. 2009. Disponível em: <http://cmq.esalq.usp.br/wiki/lib/exe/fetch.php?media=biometria:metrvm:sos_nat_ver250509.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- ESALQ FLORESTAL JUNIOR (Esalq). **Neutralização de carbono por meio do plantio de mudas**. 2021. Disponível em: <<https://www.esalqjrflorestal.org.br/post/neutraliza%C3%A7%C3%A3o-de-carbono>>. Acesso em: 16 ago. 2021.
- Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS). **1º Seminário Brasileiro sobre CCS Carbon Dioxide Capture and Storage**. [S.l.], 2009.
- FONSECA, J. J. S. da. **Metodologia da pesquisa científica**. Universidade Estadual do Ceará, 2002.
- FONSECA, M. **STEELMAKING PROCESS GASES UTILIZATION**. [S.l.], 2017. ILVA.
- Greenhouse gas protocol. Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard*. 2011.
- GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- HANSEN, T. et al. **Adopting hydrogen direct reduction for the swedish steel industry: A technological innovation system (tis) study**. 2019.
- Instituto Brasileiro de Árvores (IBA). **A indústria de árvores plantadas e as mudanças climáticas**. [S.l.], 2018.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: The reporting instructions*. [S.l.], 1996.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for policymakers. In: Global warming of 1.5°C*. [S.l.], 2018.

MARTINEZ, I. V. A. L.; PINTO, S. J. C. S. **Controle de emissões de co2 na siderurgia brasileira.** 2017.

MCKINSEY. **Pathways to a Low-Carbon Economy.** 2009.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Emissões de Dióxido de Carbono por queima de combustíveis: abordagem TOP-DOWN.** [S.l.], 2006.

MOURÃO, M. B. **Introdução a Siderurgia.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais,, 2007.

NIKOLERIS, A.; ÅHMAN, M.; NILSSON, L. J. **Decarbonising industry in sweden.** 2012.

Nippon Steel Corporation (NSC). **Nippon Steel Sustainability Report.** 2020.

OLIVEIRA, F. N. de. **Consumo de aço no brasil: um modelo baseado na técnica da intensidade do uso.** 2014.

PACTO DE AUTARCAS. de. 2017. **Factores de emissão - Anexo técnico às instruções do modelo de PAES.** Disponível em: http://www.soglasheniemerov.eu/IMG/pdf/technical_annex_pt.pdf. Acesso em: 21 ago. 2021.

PAIXÃO, M. A. S. da. **A Indústria Siderúrgica e o Impacto Chinês: Uma Ameaça Para a Economia Verde ou Um Caminho Para Uma Nova Trajetória Institucional?** [S.l.], 2020.

PORTAL DA INDÚSTRIA. 2021. **Indústria brasileira faz a sua parte na redução de emissões.** Disponível em: <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/industria-brasileira-faz-a-sua-parte-na-reducao-de-emissoes/>>. Acesso em: 27jul. 2021.

REGISTRO PÚBLICO DE EMISSÕES. 2019. **Sobre o Registro.** Disponível em: <<http://www.registropublicodeemissoes.com.br/sobre>>. Acesso em: 01 ago. 2021.Revista pesquisa e debate.

PAULA, M. X. D.; SANTI, A. M. M.; MERCEDES, S. S. **Políticas públicas de incentivo à redução de emissões de gases de efeito estufa na indústria siderúrgica brasileira.** 2020.

SANTOS, F. R. **Max weber e a racionalidade burocrática.** 2015.

SOUZA, A. M. T. de. **ESTUDO DE EFICIENTIZAÇÃO DE USO DE ENERGIA EM UMA USINA SIDERÚRGICA INTEGRADA.** Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2009.

TERNIUM. 2021. **Ternium anuncia plano para reduzir suas emissões de CO2 em 20% até 2030.** Disponível em: <<https://br.ternium.com/pt/novidades/noticias/ternium-anuncia-plano-para-reduzir-suas-emissoes-d--10129992721>>. Acesso em: 31 jul. 2021.

VITAL, M. H. F. **Aquecimento global: Acordos internacionais, emissões de co2 e o surgimento dos mercados de carbono no mundo**. BNDES, 2018.

VOGL, V.; ÅHMAN, M.; NILSSON, L. **The making of green steel in the eu: a policy evaluation for the early commercialization phase**. 2021.

World Steel Association (WSA). 2020. **Sustainability Indicators** Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/sustainability/sustainability-indicators.html>>. Acesso em: 29 mai. 2021