



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**

**ESCOLA DE MINAS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**



**REDUÇÃO DA INTENSIDADE DE CARBONO DE USINAS  
SIDERÚRGICAS EM MINAS GERAIS: MEDIDAS DE  
PLANEJAMENTO ENERGÉTICO INTEGRADO**

**JOÃO VÍCTOR FREITAS PAES PINTO**

**OURO PRETO - MG  
2022**

**JOÃO VÍCTOR FREITAS PAES PINTO**

**joavictorfreitaspp@hotmail.com**

**REDUÇÃO DA INTENSIDADE DE CARBONO DE USINAS  
SIDERÚRGICAS EM MINAS GERAIS: MEDIDAS DE  
PLANEJAMENTO ENERGÉTICO INTEGRADO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

**Professor orientador:** Dr. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura

**OURO PRETO – MG  
2022**

07/04/22, 20:20

SEI/UFOP - 0307754 - Folha de aprovação do TCC



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,  
ADMINISTRAÇÃO E ECON



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**João Vítor Freitas Paes Pinto**

### **Redução da Intensidade de Carbono de Usinas Siderúrgicas em Minas Gerais: Medidas de Planejamento Energético Integrado**

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

Aprovada em 7 de abril de 2022

#### Membros da banca

D.Sc. - Gustavo Nikolaus Pinto de Moura - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto  
D.Sc. - Bruna De Fatima Pedrosa Guedes Flausino - Universidade Federal de Ouro Preto  
M.Sc. - Fidellis Bitencourt Gonzaga Louzada e Estanislau - 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 07/04/2022

Documento assinado eletronicamente por **Bruna de Fatima Pedrosa Guedes Flausino, PROFESSOR**

07/04/22, 20:20

SEI/UFOP - 0307754 - Folha de aprovação do TCC



**DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/04/2022, às 20:17, 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 **Fidellis Bitencourt Gonzaga Louzada e Estanislau, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/04/2022, às 20:17, 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 **Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/04/2022, às 20:19, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0307754** e o código CRC **8B3A6FC1**.

**Referência:** Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.004398/2022-64

SEI nº 0307754

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000  
Telefone: 3135591540 - www.ufop.br

A Deus agradeço por mais esta etapa vencida. Aos meus pais, pelo apoio e estarem sempre partilhando os momentos comigo.

A República Tróia por me receber e tornar Ouro Preto minha segunda casa e todos meus amigos que compartilharam os desafios que venci nessa jornada.

## AGRADECIMENTO

Inicialmente agradeço a Deus por sempre estar a frente da minha vida, me guiando para conseguir vencer os desafios que vida propõe. Ofereço essa monografia aos meus pais por todo amor, apoio e incentivo durante toda minha vida. Dedico também a minha família que sempre se mostrou solícita e dando forças para encarar cada etapa.

Agradecimento a Escola de Minas e DEPRO pelo ensino público e de qualidade, em especial ao meu orientador Professor Doutor Gustavo Nikolaus pelo incentivo e orientação neste trabalho, colocando em prática os conhecimentos adquiridos ao longo dessa jornada na Universidade Federal de Ouro Preto, na qual usufruí de momentos memoráveis na vida academia, pessoal e profissional. Aos professores do curso de Engenharia de Produção por suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho.

A vida republicana de Ouro Preto onde pude aprender como lhe dar em equipe, desafios da vida longe dos pais e toda convivência entre pessoas de diferentes personalidades e culturas. Em especial minha segunda casa, República Tróia, lugar onde encontrei pessoas de confiança que com certeza levarei por toda vida. Em especial aos irmãos republicanos Pinssa, Tele+, Vovô por partilharem todo o período de faculdade comigo.

## RESUMO

A indústria siderúrgica, responsável pela produção de aço, matéria prima essencial para a indústria de transformação e a construção civil, tem sido tema de diversos assuntos de desenvolvimento e sustentabilidade no cenário mundial. A produção de aço respondeu por 6,2% do total de energia consumida no Brasil em 2014, em torno de 15.942 toe e tem como um dos principais contrapontos a alta emissão de gases carbônicos, sendo o ramo da siderurgia responsável por cerca de 6,5% das emissões totais, em torno de 6,9 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Para esta pesquisa foi utilizado o método de pesquisa explicativa, mostrando os fenômenos estudados para identificar suas razões, seus fatores determinantes, suas causas. A Intensidade de Carbono (IC) considera o efeito do CO<sub>2</sub> e de outros gases de efeito estufa emitidos na produção, distribuição e uso de energia disponível de um combustível. Após o Protocolo de Quioto, os países desenvolvidos deveriam reduzir, em média, 5,2% das emissões de gases do efeito estufa em relação aos níveis medidos em 1990, tornando-se um assunto em pauta também para países em desenvolvimento. Diversos projetos de melhorias estão sendo aplicados no setor industrial e esse estudo tem foco na siderurgia, analisando o processo produtivo, cenários econômicos, projetos de melhoria na eficiência e a emissão de gases de efeito estufa em partes do processo. Esta pesquisa também apresenta dados sobre mudanças climáticas, aquecimento global e como as empresas estão se preparando para mitigá-las com uma produção mais sustentável. O objetivo principal é apresentar soluções viáveis para reduzir a intensidade de carbono, as quais as empresas possam implementar e ainda obter redução financeira nos processos, fazendo uso das metodologias de injeção de finos, utilização de gás natural e injeção de oxigênio no alto-forno. Nas teses apresentadas para redução de gases, são calculadas reduções de até 94 mil reais a cada 10 toneladas de gusa produzida no processo de injeção de O<sub>2</sub> no alto-forno. Outra possível solução é o maior uso de gás natural na geração de energia elétrica nos turbogeradores, reduzindo a compra de energia elétrica oriunda de hidroelétricas e aumentando a produção interna com maior aproveitamento dos gases de processo. A pesquisa concentra sua análise nos principais desafios que a indústria siderúrgica está enfrentando e como as empresas estão buscando soluções para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, como a Gerdau que chegou à intensidade de emissões de gases de efeito estufa de 0,93 tCO<sub>2</sub> e/t de aço produzido em 2020, reduzindo cerca de 4% em relação ao ano anterior.

**Palavras-chave:** Siderurgia. Intensidade de Carbono. Créditos de Carbono. Resíduo. Ciclo Carbono.

## ABSTRACT

*The steel industry, responsible to produce steel, essential raw material for the transformation industry and civil construction, has been the subject of several development and sustainability issues on the world stage. Steel production accounted for 6.2% of the total energy consumed in Brazil in 2014, around 15,942 toe and has as one of the main counterpoints the high emission of carbon dioxide, with the steel industry responsible for about 6, 5% of total emissions, around 6.9 billion tons of CO<sub>2</sub>. For this research, the method of explanatory research was used, showing the phenomena studied to identify their reasons, their determining factors, their causes. Carbon Intensity (CI) considers the effect of CO<sub>2</sub> and other greenhouse gases emitted in the production, distribution, and use of available energy from a fuel. After the Kyoto Protocol, developed countries were expected to reduce, on average, 5.2% of greenhouse gas emissions in relation to the levels measured in 1990, becoming an issue on the agenda for developing countries as well. Several improvement projects are being applied in the industrial sector and this study focuses on the steel industry, analyzing the production process, economic scenarios, efficiency improvement projects and the emission of greenhouse gases in parts of the process. This research also presents data on climate change, global warming and how companies are preparing to mitigate them with more sustainable production. The main objective is to present viable solutions to reduce carbon intensity, which companies can implement and still obtain financial reduction in the processes, making use of the fines injection methodologies, use of natural gas and oxygen injection in the blast furnace. In the theses presented for gas reduction, reductions of up to 94 thousand reais are calculated for every 10 tons of pig iron produced in the O<sub>2</sub> injection process in the blast furnace. Another possible solution is the greater use of natural gas in the generation of electric energy in turbogenerators, reducing the purchase of electric energy from hydroelectric plants and increasing internal production with greater use of process gases. The research focuses its analysis on the main challenges that the steel industry is facing and how companies are looking for solutions to reduce greenhouse gas emissions, such as Gerdau, which reached the intensity of greenhouse gas emissions of 0.93 tCO<sub>2</sub> e/t of steel produced in 2020, down around 4% compared to the previous year.*

**Keywords:** Steel. Carbon Intensity. Carbon Credits. Residue. Carbon Cycle.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Distribuição dos produtores de aço no Brasil .....	2
Figura 2 - Fluxo de pesquisa bibliográfica .....	5
Figura 3 - Fluxograma de usina integrada .....	8
Figura 4 - Fluxograma de uma planta de coqueria .....	9
Figura 5 - Fluxograma de uma sinterização .....	10
Figura 6 - Centrais Elétricas Autoprodutoras .....	18
Figura 7 - Estrutura de consumo no setor Ferro-gusa e aço .....	19
Figura 8 - Intensidade energética na siderurgia.....	20
Figura 9 - Exemplo de fluxos de insumos e energéticos .....	22
Figura 10 - Emissões de créditos.....	24
Figura 11 - Consumo Gás de Coqueria .....	25
Figura 12 - Evolução da produção de aço (2010-2050) .....	28
Figura 13 - Medidas de eficiência energéticas .....	29

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Cenário atual de uma usina integrada.....	34
Tabela 2 - Cenário com mais uso de GN.....	34
Tabela 3 - Cenário financeiro .....	34
Tabela 4 - Balanço térmico ICP .....	36
Tabela 5 - Impacto financeiro ICP .....	37
Tabela 6 - Emissão evitada de CO2 com a ICP.....	37
Tabela 7 - Balanço térmico – Injeção de Oxigênio .....	38
Tabela 8 - Impacto financeiro Injeção de Oxigênio .....	38
Tabela 9 - Ganho produtivo Injeção de Oxigênio .....	38
Tabela 10 - Emissão Direta Gerdau.....	40

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos.....	3
1.1.1	Objetivo geral .....	3
1.1.2	Objetivos específicos .....	3
1.2	Justificativa.....	4
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>INDÚSTRIA SIDERÚRGICA BRASILEIRA .....</b>	<b>7</b>
3.1	Produção do aço.....	7
3.1.1	Preparação da carga .....	8
3.1.2	Redução .....	11
3.1.3	Refino .....	12
3.1.4	Lingotamentos .....	14
3.1.5	Laminação .....	15
3.2	Balanco energético .....	15
3.2.1	Conceito de energia .....	15
3.2.2	Balanco Energético aplicado à siderurgia .....	16
3.3	Intensidade energética na siderurgia.....	19
3.4	Norma ISO 14401-1 .....	21
3.4.1	Limite da emissão de CO <sub>2</sub> .....	21
3.4.2	Fluxos de massa e energia .....	21
3.4.3	Fatores de conversão .....	22
3.5	Fontes de Emissões.....	23
3.5.1	Emissões diretas .....	23
3.5.2	Emissões indiretas (ou <i>upstream</i> ).....	23
3.5.3	Emissões de créditos.....	24
3.6	Geração de energia elétrica na siderurgia.....	24
3.7	Mudanças climáticas.....	25
3.8	Eficiência energética na siderurgia.....	27
3.9	Cenário econômico na indústria do aço.....	31
<b>4</b>	<b>REDUÇÃO DA INTENSIDADE CARBONO NA SIDERURGIA.....</b>	<b>32</b>
4.1	Intensidade de carbono .....	32

4.2	Métodos para redução da intensidade de carbono .....	33
4.2.1	Utilização de Gás Natural.....	33
4.2.2	Utilização de injeção de finos (ICP).....	35
4.2.3	Utilização de injeção de Oxigênio.....	37
4.3	Análise dos resultados .....	38
4.4	Plano ambiental .....	39
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A siderurgia é o ramo da metalurgia que se dedica à fabricação e tratamento de aços e ferros fundidos. A produção siderúrgica nacional iniciou-se no século XX, mais precisamente no ano de 1925, apresentando um crescimento demasiadamente lento até os anos de 1950. As primeiras indústrias do setor no país foram a Usina Sabará e a Companhia Siderúrgica Nacional. Nos anos de 1950, outras empresas se desenvolveram, como por exemplo: Acesita, Mannesmann, Companhia Siderúrgica Paulista – Cosipa e Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais – Usiminas (SCHERRER, 2006). O período compreendido entre os anos de 1950 e 1973 foi caracterizado por uma forte expansão da indústria siderúrgica mundial, quando a produção de aço bruto cresceu a um ritmo de 5,8% ao ano, passando de 190 para 696 milhões de toneladas anuais.

Certa estagnação da indústria siderúrgica mundial foi registrada entre os anos 1970 e 1990, período em que houve os dois choques do preço do petróleo e a fragmentação da União Soviética, o que encareceu os custos da indústria, além de enfraquecer a demanda mundial de aço. Entre 1973 e 1998, a produção mundial de aço subiu, em média, 0,4% ao ano, atingindo 777 milhões de toneladas em 1998.

A partir de então, a indústria siderúrgica mundial volta a apresentar altas taxas de crescimento apoiadas, principalmente, na forte expansão da economia chinesa. Com isso, entre os anos de 1998 e 2007, houve incremento médio de 5,6% ao ano da produção mundial de aço bruto, atingindo em 2007 o montante de 1,3 bilhões de toneladas. Ainda que relativamente recente, a indústria siderúrgica nacional possui grande importância para o país, sendo que *“no ano de 2010 o aço foi responsável por um total de R\$ 146,8 bilhões, ou 4,0% do produto interno bruto do país”* (IABr, 2012).

O Brasil possui o maior parque industrial de aço da América do Sul e é o maior produtor da América Latina, ocupando, no ranking mundial, o nono lugar como produtor de aço (SGM, 2019). Entre 1994 e 2016, as siderúrgicas investiram US\$ 46,6 bilhões, priorizando a modernização e atualização tecnológica das usinas (IABr, 2019). A cadeia do aço está diretamente ligada à história de desenvolvimento do Brasil, especialmente no Estado de Minas Gerais, onde este cenário é ainda mais expressivo. O estado possui a maior concentração de siderúrgicas do país, principalmente devido à proximidade com as fontes de matérias-primas (minério, carvão etc.). Os indicadores econômicos mostraram que, em 2015, 79% da produção de aço bruto nacional foram das quatro maiores usinas siderúrgicas que atuam no país, aqui

classificadas como as “4S”: Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), Usiminas S.A, Gerdau S.A. e ArcelorMittal Brasil S.A (IABr, 2015). De acordo com a Figura 1, pode-se observar a distribuição geográfica dos produtores de aço no país, mostrando a grande concentração no sudeste brasileiro.

Figura 1 - Distribuição dos produtores de aço no Brasil



Fonte: INSTITUTO DO AÇO BRASIL, 2013.

Existem dois tipos de usinas siderúrgicas: integradas e semi-integradas. As usinas que serão abordadas e trabalhadas nesse trabalho são majoritariamente usinas integradas. A produção em usinas integradas é composta de três etapas (CARVALHO, 2015): a redução (produção de ferro); o refino (produção e resfriamento do aço) e a laminação (conformação mecânica dos produtos siderúrgicos destinados à comercialização). Nas usinas integradas a coque, a etapa de redução é responsável por 80-85% do consumo de energia, e, portanto, concentra as principais oportunidades de mitigação de emissões e eficiência energética (PAULA, 2012).

As alterações causadas ao meio ambiente devido às ações antrópicas vêm provocando diversas mudanças, dentre essas alterações destacam-se as mudanças climáticas, mais

especificamente o aquecimento global. A partir do momento em que o aquecimento global passou a ser visto como uma ameaça, iniciou-se um processo de acompanhamento e mensuração de emissões de gases de efeito estufa, dentre os quais destaca-se o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

O CO<sub>2</sub> pode ser emitido por fontes naturais, mas a maior emissão de gases de efeito estufa ocorre por meio das atividades industriais. Alguns setores apresentam emissões consideráveis, como por exemplo: energia, agropecuária, siderurgia, cimentos e transporte.

O foco deste trabalho é o ramo da siderurgia, e estuda empresas engajadas na redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE). A siderurgia mundial é responsável por cerca de 6,5% das emissões totais, em torno de 6,9 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> (PAULA, 2014). Do total de emissões de gases de efeito estufa do setor, mais de 80% são resultantes do consumo de insumos energéticos, cerca de 1,36 tCO<sub>2</sub>eq/t (CARVALHO, 2015). A produção de aço e ferro-gusa respondeu por 6,2% do total de energia consumida no Brasil em 2014, em torno de 15.942 toe (EPE, 2015) e 43% das emissões de GEE nos processos industriais no Brasil em 2012, em torno de 0,92 bilhões de toneladas de GEE (BRASIL, 2014). O gás carbônico (CO<sub>2</sub>) corresponde a mais de 90% dos GEE emitidos na siderurgia, ou seja, 0,83 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Além dos GEE, o setor da siderurgia emite gases que provocam a chuva ácida e material particulado.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Identificar medidas de Planejamento Energético Integrado no setor siderúrgico de Minas Gerais, para reduzir a intensidade carbono das usinas integradas.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Identificar a importância do setor siderúrgico;
- Analisar a produção de aço no país e em Minas Gerais, considerando as usinas de siderurgia integrada;
- Identificar a demanda de energia na siderurgia integrada;
- Relatar a intensidade de carbono no setor siderúrgico;
- Identificar estratégias para reduzir a intensidade de carbono nas usinas;
- Identificar estratégias de suprimento de energia elétrica para a produção de aço;
- Sugerir medidas relacionadas a injeção de finos no Alto-Forno;

- Discutir os planos de mudanças climáticas das indústrias siderúrgicas.

## 1.2 Justificativa

As ações humanas têm causado grandes impactos ao meio ambiente. Isso se deve ao desenvolvimento da industrialização que acelerou o processo de degradação da natureza. Em face a esses acontecimentos, a partir da segunda metade do século XX, iniciou-se uma mobilização que gerou uma série de relatórios e conceitos como, por exemplo, o desenvolvimento sustentável.

Este trabalho está alinhado com a estratégia das empresas siderúrgicas para a redução da intensidade de carbono emitida. O tema é diretamente ligado ao futuro das empresas no Brasil e no mundo, pois o termo “descarbonizar” está cada vez mais evidente em países em desenvolvimento. Como meio de garantir um ambiente com menores danos climáticos extremos (secas, enchentes, furacões, proliferação de doenças) para as futuras gerações, empresas que investem em sustentabilidade têm benefícios imediatos, entre eles, o desenvolvimento da imagem e a geração de valor agregado para os negócios. Para alcançar o objetivo de minimizar a pegada de carbono, existem diferentes meios e estratégias que podem ser adotados, que serão apresentados no estudo.

O relatório elaborado pelo Instituto do Desenvolvimento Sustentável e Relações Internacionais (IDDRI, 2020) mostrou como os 15 países que mais emitem esses gases, entre eles o Brasil, podem baixar drasticamente a concentração de dióxido de carbono e demais gases de efeito estufa em suas atividades até 2050 e ajudar a evitar o aumento da temperatura do planeta em mais de 2°C, conforme estabelecido pelo Acordo de Paris na COP 21 em 2015.

De acordo com a Petrobras (2020), a Iniciativa Climática para Óleo e Gás (OGCI, na sigla em inglês) definiu a meta coletiva de redução até 2025 da intensidade de carbono das operações de exploração e produção e energia para 20 kg a 21 kg de CO<sub>2</sub> por barril de óleo equivalente (CO<sub>2</sub>e/boe) comercializado. Em 2017, a média das signatárias foi de 23kg de CO<sub>2</sub>e/boe. Todas as empresas que compõem esse grupo (BP, Equinor, Exxon, Chevron, Shell, Repsol, Aramco, Total, CNPC, ENI e Occidental) estão fazendo altos investimentos nessa área e voltando suas decisões para a sustentabilidade, no qual, as companhias integrantes da OGCI investem mais de US\$ 7 bilhões por ano em soluções de baixo carbono.

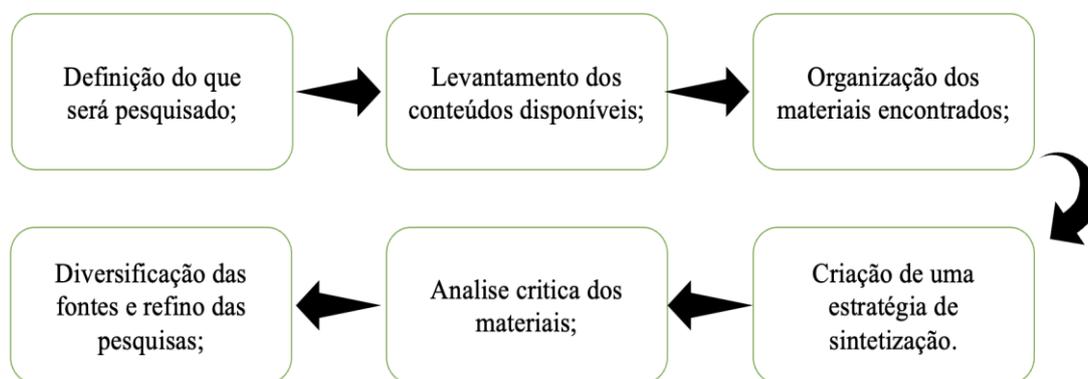
## 2 METODOLOGIA

Para a realização dessa pesquisa, foi utilizado o método de pesquisa explicativa, mostrando que os fenômenos estudados são para identificar suas razões, seus fatores determinantes e suas causas. Neste modelo de pesquisa, a natureza básica foi o método empregado, pois o objetivo é gerar conhecimento que seja útil para a ciência e tecnologia, sem necessariamente haver uma aplicação prática ou para obtenção de lucro.

Além disso, a tese possui abordagens qualitativa e quantitativa com objetivo central de entender a explicação de algum fenômeno e com a função de apresentar os resultados, a partir de uma estrutura, como tabelas e gráficos. Isso significa traduzir opiniões e números em informações para elaborar classificações e análises (NASCIMENTO, 2016).

A pesquisa bibliográfica é o passo inicial na construção efetiva do processo de investigação e precede o reconhecimento do problema ou do questionamento que funcionará como delimitador do tema de estudo. A Figura 2 apresenta as etapas em que a pesquisa foi dividida (Nascimento, 2016).

Figura 2 - Fluxo de pesquisa bibliográfica



Fonte: Elaboração própria

A primeira etapa de definição do tema tem como objetivo identificar qual é a bibliografia ideal a ser utilizada, trazendo um racional a ser levantado no conteúdo. Após a definição do tema, na próxima etapa são os levantamentos de conteúdos disponíveis sobre o assunto. São utilizadas ferramentas como o *Google Scholar*, livros dos assuntos, artigos científicos publicados em congressos e relatórios setoriais. Uma pesquisa bibliográfica eficiente conta com mais de uma fonte. Por isso, é importante estudar diversos autores e diferentes meios de publicação, tais como revistas, periódicos, dissertações de mestrado e teses de doutorado, dentre

outros. Conforme a realização do levantamento bibliográfico é feita, a separação do material deve ser realizada para encontrá-lo facilmente depois.

Após o levantamento e organização do material é necessário realizar uma análise crítica dos materiais para poder desenvolver o seu próprio estudo e apresentar sua contribuição para o tema. Buscando discernir o que pode acrescentar ou não na discussão do trabalho. Por fim, sintetizar o material coletado e pontuar as informações mais relevantes e criar uma conexão entre elas, de modo que um novo rico material seja produzido.

Este estudo baseia-se em trabalho desenvolvido no curso PRO556 Planejamento Energético Integrado. O curso permite o contato com metodologias para Planejamento Energético Integrado, pelo lado da oferta e da demanda, de diferentes setores econômicos, dentre os quais o setor industrial de ferro-gusa e aço.

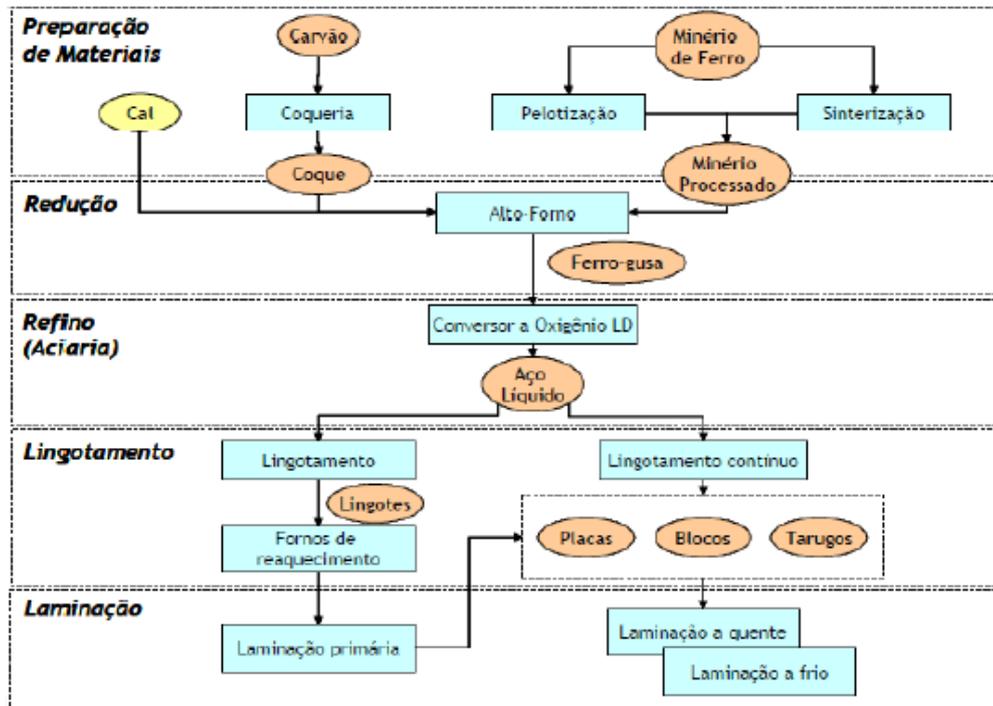
### **3 INDÚSTRIA SIDERÚRGICA BRASILEIRA**

A indústria do aço no Brasil vem crescendo por vários anos, segundo o Instituto Aço Brasil (2021), projeta-se um crescimento de 14,7% em 2021, chegando a 36 milhões de toneladas de aço. Esse substancial incremento não é apenas em função dos investimentos realizados pelas empresas já atuantes, mas também como resultado de novos entrantes na indústria. Do lado do consumidor, as perspectivas de crescimento também são muito promissoras, com projeções de 22,4 milhões de toneladas de aço para 2022, pois a demanda doméstica por produtos siderúrgicos está em alta devido ao aumento da renda das famílias em 2022 e expansão do crédito, além do ressurgimento de indústrias consumidoras de aço, como a construção naval. De acordo com o relatório do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE, 2010) sobre a siderurgia no Brasil 2010-2055, os cenários para a siderurgia brasileira são preponderantemente otimistas.

#### **3.1 Produção do aço**

O aço é produzido, basicamente, a partir do minério de ferro, carvão e cal. De acordo com o Instituto Aço Brasil (2020), a produção de aço em uma usina integrada é dividida em 4 macro etapas e são destrinchadas em subetapas do processo, por exemplo no refino separa-se o refino (aciaria) dos lingotamentos. Pode-se observar na Figura 3 o fluxograma de uma usina integrada com suas etapas de processamento.

Figura 3 - Fluxograma de usina integrada



Fonte: EPE (2009)

### 3.1.1 Preparação da carga

Grande parte do mineral ferroso (finos) é aglomerado com fibras de cal e coque, originando um produto conhecido como sinter, enquanto o carvão é processado em uma coqueria e transformado em coque.

#### 3.1.1.1 Coqueria

A coqueria é a unidade industrial que transforma mistura de carvões minerais em coque. O coque metalúrgico é empregado nos altos-fornos, onde pode atuar como combustível, redutor, fornecedor de carbono para a produção de ferro-gusa e permeabilizador da carga. No custo de produção do ferro-gusa, a fatia do coque supera 40%, daí a importância que lhe é conferida na siderurgia (MACHADO, PAULO e FLÁVIO, 2003).

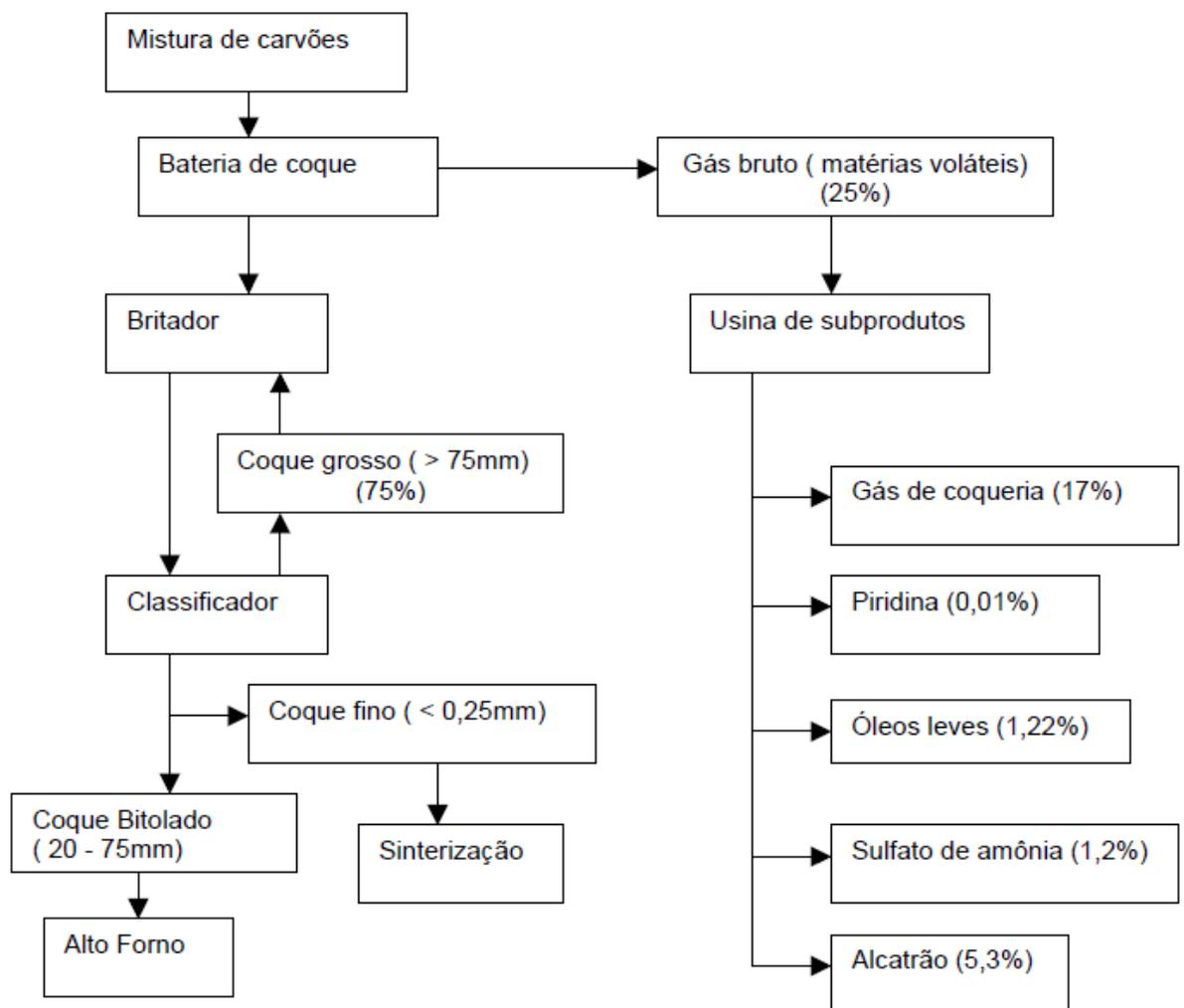
A coqueificação consiste no aquecimento em ausência de ar de uma mistura de carvões de características adequadas, a temperaturas entre 900 °C e 1200 °C. Este aquecimento provoca a remoção de materiais voláteis e o aparecimento de um resíduo sólido, poroso, infusível, basicamente constituído de carbono, que é o coque.

O material volátil depois de tratado pode ser processado em uma planta carboquímica, e seus coprodutos podem ser utilizados na própria usina ou vendidos.

O ciclo operacional de uma coqueria ilustrado na Figura 4 pode ser resumido nas seguintes fases:

- Preparação da mistura de carvões;
- Enfornamento Aquecimento;
- Desenfornamento Apagamento;
- Preparação do coque;
- Tratamento das matérias voláteis.

Figura 4 - Fluxograma de uma planta de coqueria



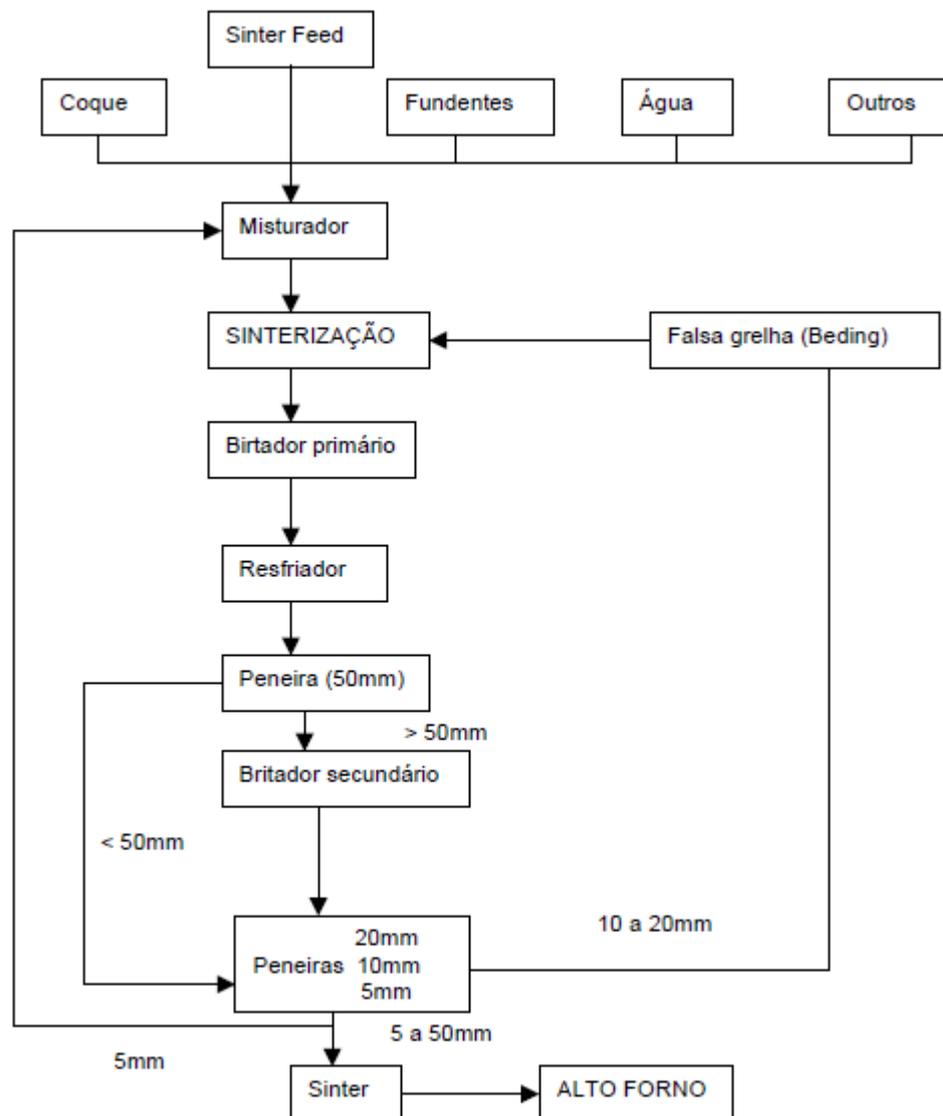
Fonte: MACHADO, PAULO e FLÁVIO (2003)

### 3.1.1.2 Sinterização

A sinterização é um processo de aglomeração de partículas finas de minério de ferro. O fluxograma típico de uma sinterização é ilustrado na Figura 5. O produto resultante da sinterização é denominado sínter. O processo de aglomeração de partículas é crucial para o

êxito da produção de aço via rota alto-forno dada às limitações que este tipo de reator apresenta em relação à presença de material fino, o qual reduz a permeabilidade do gás dentro do reator e a velocidade das reações de redução e produção do ferro-gusa. A maioria das usinas no mundo operam com carga de sinter superior a 60% (STARLING, 2012).

Figura 5 - Fluxograma de uma sinterização



Fonte: MACHADO, PAULO e FLÁVIO (2003)

A sinterização do ferro é um processo em contracorrente de componentes gasosos e sólidos, que consiste em misturar finos de minérios de ferro com finos de outros materiais, sendo a mistura resultante alimentada em uma grelha permeável. As matérias-primas utilizadas na composição da mistura de sinterização são: finos de minério de ferro (*sinter feed*), combustíveis sólidos, fundentes e resíduos siderúrgicos (STARLING, 2012).

A temperatura da superfície superior da mistura da sinterização é elevada pela queima de gás ou óleo em queimadores localizados acima da mistura na grelha. O processo de sinterização começa com a ignição da camada superior da mistura colocada sobre a grelha atingindo temperatura de 1200 °C/1400 °C. O ar quente é então enviado para baixo na direção da grelha (BALL, 1973).

O alto-forno exige uniformidade da carga, isenção de finos, faixa granulométrica estreita e suficiente resistência mecânica para assegurar boa permeabilidade. A carga do alto-forno deve apresentar boa redutibilidade e elevado teor de ferro para que o desempenho do reator seja estável e o consumo de combustível seja minimizado. *“Um bom aglomerado deve resistir a elevadas temperaturas, forças e pressões internas do alto-forno sem amolecer ou decrepitar”*. Além destas características busca-se um aglomerado com alto teor de ferro, baixo teor de fósforo e enxofre, pequena quantidade de partículas finas ou muito grossas (BALL, 1973).

### **3.1.2 Redução**

Essas matérias-primas, agora preparadas, são carregadas no alto-forno. Com isso, oxigênio aquecido a uma temperatura de 1000 °C é soprado pela parte de baixo do alto-forno e o carvão, em contato com o oxigênio, produz calor que funde a carga metálica e dá início ao processo de redução do minério de ferro em um metal líquido: o ferro-gusa. Portanto, o ferro-gusa é uma liga de ferro e carbono, com um teor de carbono muito elevado. O processo resumido acima, pode ser obtido de duas formas: redução direta ou indireta.

#### **3.1.2.1 Processo de redução direta**

Processos de redução direta são aqueles nos quais a redução do minério de ferro a ferro metálico é efetuada sem que ocorra, em nenhuma etapa do processo, a fusão da carga no reator. A redução no estado sólido de minério de ferro por carvão é praticada desde a antiguidade, tendo sido o principal processo de obtenção de ferro até o desenvolvimento dos altos-fornos. Assim, o produto metálico é obtido na fase sólida, sendo chamado de “ferro esponja” (MACHADO e OLIVEIRA, 1984).

O ferro esponja é um produto metálico com 85 a 95% de ferro e de 0,1 a 1,0% de carbono, podendo chegar a 2,0% de carbono. Tem aspecto esponjoso e é obtido no estado sólido à temperatura em torno de 1100 °C, a preços relativamente reduzidos se comparado a grandes siderúrgicas. É utilizado como matéria-prima em fornos elétricos a arco em substituição à sucata para obtenção do aço, pois sua característica vantajosa é a sua superioridade em relação à sucata

em termos de pureza (elementos de liga contidos na sucata podem dificultar o atendimento à especificação do aço a ser produzido) (MACHADO, PAULO e FLÁVIO, 2003).

Os processos de redução direta podem ser divididos conforme o tipo de redutor, em duas classes: redutor sólido (carvão ou coque) ou redutor gasoso (gás natural-CH<sub>4</sub> e/ou gases redutores como CO, H<sub>2</sub>). É um processo altamente viável em países pouco industrializados, com minérios de alta qualidade, com escassez de sucata e com gás natural em abundância, reduzindo conseqüentemente o emprego do coque que é necessário nos altos-fornos (MACHADO, PAULO e FLÁVIO, 2003).

### **3.1.2.2 Processo de redução indireta**

O ferro é com certeza o mais versátil dos metais e várias aplicações de diversos materiais sempre é possível encontrar uma liga que tenha como base o ferro. Dessa maneira, a produção do aço em larga escala tornou-se uma necessidade mundial, notadamente no pós-guerra com o desenvolvimento industrial (MACHADO, PAULO e FLÁVIO, 2003).

O desenvolvimento das aplicações ou das qualidades dos diversos tipos de aço ou ligas de ferro em larga escala só foi possível graças à abundância do minério de ferro, sendo na maior parte na forma de óxidos. Por coincidência o minério de ferro pode ser reduzido num redutor relativamente abundante que é o carvão. Desta forma, passou-se então a desenvolver métodos e máquinas que associassem à “abundância de minério”, “abundância de carvões” e “abundância de aplicações”, resultando em um processo denominado "Alto-Forno".

O alto-forno é um tipo de forno de cuba empregado na produção de ferro-gusa, pela fusão redutora de minérios de ferro em presença de carvão vegetal ou coque e fundente, os quais são carregados no topo e, na descida, são transformados pela ação dos gases ascendentes, provenientes da combustão do carvão com o oxigênio soprado pelas ventaneiras, obtendo-se escória e ferro-gusa líquido pelo cadinho e poeiras e gases no topo (MACHADO, PAULO e FLÁVIO, 2003).

São utilizados como matérias-primas uma carga metálica de minério de ferro, pelota e sinter, como combustível são utilizados o coque, carvão ou vegetal e gás natural e como fundentes são utilizados o calcário, dolomita e quartzo.

### **3.1.3 Refino**

Aciarias a oxigênio ou elétricas são utilizadas para transformar o gusa líquido ou sólido e a sucata de ferro e aço em aço líquido. Nessa etapa parte do carbono contido no gusa é

removido juntamente com impurezas. A maior parte do aço líquido é solidificada em equipamentos de lingotamento contínuo para produzir semi-acabados, lingotes e blocos. Na aciaria existem duas rotas tecnológicas predominantes no mundo: o conversor a oxigênio—também chamado LD (Linz-Donawitz) - e o forno elétrico a arco. O primeiro é utilizado em usinas integradas a coque ou a carvão vegetal. O segundo é mais usado em usinas semi-integradas, cujo processo começa na aciaria, ou em usinas integradas que empregam a redução direta (ABM, 2009).

### **3.1.3.1 Aciaria convencional**

A carga de um conversor LD é composta basicamente de gusa líquido e sucata. O ferro-gusa líquido fornece quase a totalidade da energia necessária ao processo, devido ao alto valor de seu calor sensível e à oxidação de seus elementos.

As vantagens dos processos a oxigênio são:

- a) rapidez na transformação do gusa em aço;
- b) reaproveitamento da sucata de recirculação, gerada na própria usina, e que pode corresponder a 20% do aço bruto. Esta sucata é isenta das impurezas contidas na sucata externa (ferro velho).

### **3.1.3.2 Aciaria elétrica**

As aciarias elétricas podem operar em escala reduzida (unidades com capacidade inferior a 500 mil toneladas por ano), embora, atualmente, já existam plantas com capacidade superior a dois milhões de toneladas anuais (EPE, 2009).

O forno elétrico de arco é o instrumento mais versátil de produção de aço e, nas últimas décadas, vem se tornando um dos mais eficientes. No entanto, para ocorrer um aumento expressivo da produção de aço por essa rota, é necessário haver maior geração de sucata de aço que, por sua vez, está condicionada ao aumento do consumo de produtos intensivos em aço, como automóveis, geladeiras, fogões, expansão das obras de infraestrutura e de construção civil etc. (CNI, 2012).

### **3.1.3.3 Refino secundário**

Os processos de fabricação do aço são processos oxidantes, portanto, a quantidade de oxigênio no mesmo supera em muito os teores admissíveis para alguns produtos. Durante o vazamento ocorre também a absorção de alguns gases como nitrogênio e hidrogênio. Depois do vazamento, com a perda de temperatura. A solubilidade desses gases no aço diminui

drasticamente, formando bolhas e inclusões. Desta forma, foram desenvolvidas técnicas de desoxidação onde se obtém os valores desejados (MACHADO, PAULO e FLÁVIO, 2003).

Além da desoxidação, o refino secundário permite o ajuste de temperatura, da composição química, adição de elementos especiais, dessulfuração para teores abaixo de 0,005%, desfosforação e descarburização para teores abaixo de 0,002%.

### **3.1.4 Lingotamentos**

A partir da obtenção do aço líquido, abrem-se duas possibilidades distintas na etapa de lingotamento. No processo convencional, o aço é vazado em moldes – lingotes, onde é solidificado. A seguir, ele precisa ser reaquecido em fornos do tipo poço, cuja finalidade é aquecer uniformemente os lingotes sem provocar superaquecimento. Estes fornos usam gases pobres, ou misturas desses gases, óleo pesado ou gás natural como combustível (CNI, 2012).

Alternativamente, pode-se empregar um processo chamado de lingotamento contínuo, com ganhos na qualidade do aço produzido, com a redução nas perdas de aço inferiores e com um menor consumo de energia.

O lingotamento contínuo que produz placas diretamente do aço líquido em um único equipamento foi o mais importante avanço tecnológico nos processos metalúrgicos desde os anos sessenta, pois permitiu a substituição do lingotamento convencional feito através de lingoteiras, que é um processo bastante oneroso porque envolve equipamentos adicionais como forno-poço, laminador desbastador, estripadores, manutenção de lingoteiras, transportes internos (pontes rolantes, etc.), para obter a mesma placa de aço. O lingotamento contínuo eliminou os gastos com os equipamentos citados resultando além de redução de tempo e custo em melhoria da qualidade do aço (MACHADO, PAULO e FLÁVIO, 2003).

A importância da solidificação nos processos metalúrgicos do lingotamento contínuo, tais como, estrutura cristalográfica, distribuição de inclusões não metálicas, micro e macro segregações e as propriedades mecânicas, estão intimamente ligadas aos fenômenos de solidificação do aço (MACHADO, PAULO e FLÁVIO, 2003).

Desta forma, a transferência de calor durante a solidificação no processo de lingotamento contínuo influencia fortemente na qualidade do produto e na produtividade do processo, por isto, grande atenção é dedicada a automação deste item. Entretanto, existem outros fatores operacionais que também influenciam na qualidade e produtividade como nível

do molde e do distribuidor e a velocidade da máquina, que são também controlados automaticamente (MACHADO, PAULO e FLÁVIO, 2003).

### **3.1.5 Laminação**

Os semi-acabados, lingotes e blocos são processados por equipamentos chamados laminadores e transformados em uma grande variedade de produtos siderúrgicos, cuja nomenclatura depende de sua forma e/ou composição química. A laminação é um processo de conformação mecânica no qual o material é forçado a passar entre dois cilindros, girando em sentidos opostos, com praticamente a mesma velocidade superficial e separados entre si de uma distância menor que o valor da espessura inicial do material a ser deformado.

O processo de laminação pode ser realizado a frio ou a quente. Normalmente, a laminação a quente é usada para as operações de desbaste e a laminação a frio, para as operações de acabamento. Na laminação a quente, antes de laminar é necessário elevar a temperatura dos produtos semiacabados, (blocos, placas ou tarugos), até que o material esteja suficientemente plástico para permitir a redução mecânica à secção desejada.

Pelo fato destas operações com frequência serem as últimas e podem alterar a microestrutura do aço, elas devem ser projetadas de modo a permitir que a microestrutura desejada seja alcançada. Desta forma, as operações de acabamento envolvem tratamentos térmicos, tais como: esferoidização, normalização, e recozimento, ou tratamentos superficiais, como: galvanização, estanhamento, cementação, usinagem tempera etc. (MACHADO, PAULO e FLÁVIO, 2003).

## **3.2 Balanço energético**

Neste tópico é apresentado conceitos de energia, relatório síntese do balanço energético nacional e sua relação e impacto na siderurgia. São abordadas as matrizes energéticas com a finalidade de apresentar quais combustíveis e fontes de energia fazem parte do cenário brasileiro.

### **3.2.1 Conceito de energia**

A energia é normalmente definida como a capacidade de realizar trabalho. No entanto, esta definição não é totalmente satisfatória. Duas quantidades iguais de energia apresentando qualidades distintas têm capacidades diferentes de realizar trabalho. Pode-se então definir a

energia como uma quantidade que circula e participa de todos os processos, podendo ser medida sua qualidade pela sua capacidade de produzir trabalho (EPE, 2005).

A etapa da energia primária compreende os fluxos de produção, importação e exportação de fontes primárias, além das variações de estoques, não aproveitamentos, rejeição e perdas. As fontes primárias de energia são os produtos providos pela natureza na sua forma direta, como o petróleo, gás natural, carvão mineral, energia hidráulica, resíduos vegetais e animais, energia solar, eólica etc. (EPE, 2005).

A etapa da energia secundária compreende os fluxos de todas as fontes secundárias de energia, produtos energéticos resultantes do processamento nos diferentes centros de transformação, além das importações, das exportações, das perdas e não aproveitamentos, que têm como destino os diversos setores de consumo e, eventualmente, outros centros de transformação (EPE, 2005).

Dentre essas fontes é possível citar o óleo diesel, óleo combustível, gasolina (automotiva e de aviação), Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), nafta (petroquímica e combustível), querosene (iluminante e de aviação), gás natural processado, gás manufacturado, coque de carvão mineral, urânio contido no  $UO_2$ , eletricidade, carvão vegetal, álcool etílico (anidro e hidratado), outras secundárias de petróleo (gás de refinaria e outros derivados de petróleo) e, outras secundárias de carvão mineral (gás de coqueria, gás de aciaria, gás de alto-forno e alcatrão), entre outras.

Os produtos não energéticos de petróleo, embora contabilizados como fontes secundárias de energia, têm significativo conteúdo energético, mas são utilizados para outros fins, tais como graxas, lubrificantes, parafinas, asfaltos, solventes etc. (EPE, 2005).

### **3.2.2 Balanço Energético aplicado à siderurgia**

O balanço energético é uma das ferramentas essenciais para a compreensão da influência e inter-relação entre a energia, os processos de transformação e aplicação final, sendo definido como um sistema contábil que pretende explicitar determinadas relações entre o consumo energético e a estrutura de produção de um determinado setor em um período definido (EPE, 2005).

Essa ferramenta oferece uma base organizada de estatísticas sobre energia, e por isso é um instrumento indispensável ao planejamento energético, pois apresenta um quadro contábil que explicita o comportamento e a dinâmica dos fluxos de energia ao longo de um sistema energético, permite um diagnóstico da dinâmica das atividades de produção, transformação,

compra, venda e consumo de energia, servindo como alicerce para os estudos de projeção e avaliação das condições futuras do setor energético e suas interferências e influências na sociedade e nos demais setores da economia (EPE, 2005).

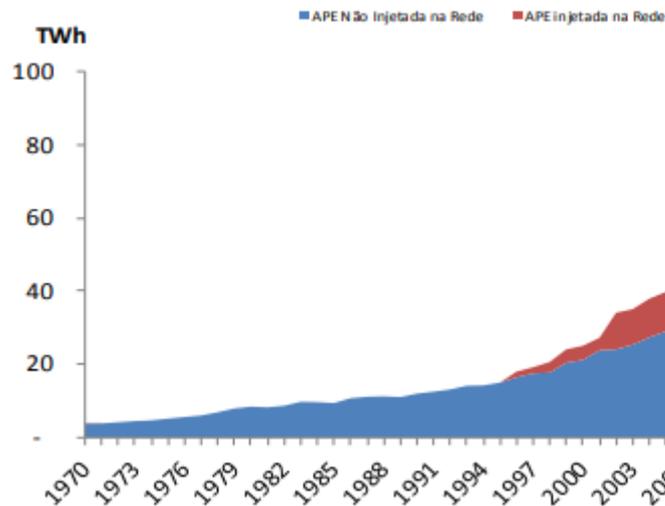
O primeiro passo na construção de um balanço energético é a uniformização de conceitos e definições fundamentais utilizados na sua elaboração, tais como as fontes energéticas, suas características físicas, os processos principais de fluxo da energia, os parâmetros de conversão das unidades de medida para as fontes energéticas, as convenções e as definições usadas para a coleta, consolidação e apresentação das estatísticas de energia, bem como a estrutura setorial de produção e consumo utilizada (EPE, 2005).

A produção siderúrgica nacional totalizou 31 milhões de toneladas no ano de 2020, queda de 4,9% comparativamente ao volume produzido em 2019, de acordo com balanço do Instituto Aço Brasil (2021). Portanto, é visível a redução de demanda também dos insumos energéticos para a fabricação do aço.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) 2021 - Ano base 2020, A geração de energia elétrica no Brasil em centrais de serviço público e autoprodutores atingiu 621,2 TWh em 2020, resultado 0,8% inferior ao de 2019. Desse total, 60,7 TWh não foram injetados na rede, ou seja, produzidos e consumidos pela própria instalação geradora, usualmente denominada como APE clássica. A autoprodução clássica agrega as mais diversas instalações industriais que produzem energia para consumo próprio, a exemplo dos setores de Papel e Celulose, Siderurgia, Açúcar e Alcool, Química, entre outros, além do Setor Energético (EPE, 2021).

A Figura 6 mostra a evolução do mercado brasileiro em produção de energia elétrica por autoprodutores. Pode-se observar uma demanda crescente em geração de energia de 20 anos até hoje, saindo de 25 TWh por ano para 106 TWh. Do total de autoprodução, a siderurgia contribui em 11,6 TWh, representando mais de 10% em toda geração em solo brasileiro.

Figura 6 - Centrais Elétricas Autoprodutoras



Fonte: EPE (2021)

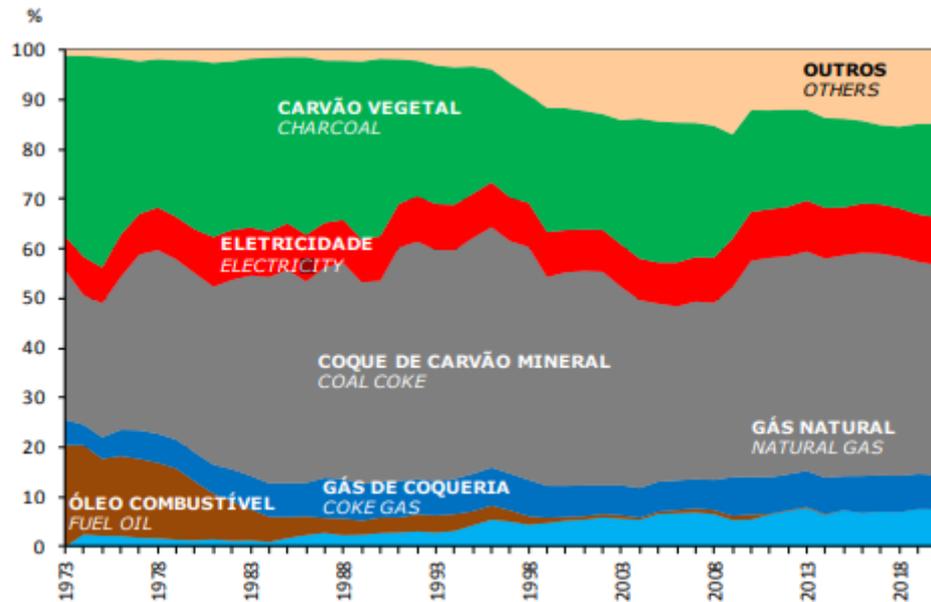
Em relação ao consumo de eletricidade na indústria, o BEN 2021 mostrou uma redução de 4,34% no consumo total no ano de 2020 no setor de aço e gusa em relação ao ano de 2019. Em números, o consumo do setor saiu de 15.942 toe para 15.249 toe. No total de consumo entre todos os setores, a indústria do aço representou 6% no total.

Sobre os combustíveis e seu consumo na siderurgia é possível analisar um pouco sobre o cenário impactado pela pandemia mundial ocasionada pelo COVID-19. O gás natural teve uma redução de consumo de  $1.368 \times 10^6 \text{ m}^3$  para  $1.296 \times 10^6 \text{ m}^3$  assim como todos os setores que consomem o GN nacionalmente. O mesmo acontece no consumo de carvão vapor, saindo de um consumo de  $3.865 \times 10^3 \text{ t}$  para  $3.675 \times 10^3 \text{ t}$ .

Ao analisar o uso de derivados de petróleo e gás natural, o cenário é o inverso das fontes anteriores. O consumo aumentou de  $88 \times 10^3 \text{ toe}$  para  $92 \times 10^3 \text{ toe}$  no setor de ferro-gusa e aço. É também possível observar esse mesmo comportamento com o diesel, óleo combustível, biodiesel, GLP, e outros combustíveis apesar de ser de pequena representatividade na matriz energética da indústria do aço.

Por fim, analisando a matriz energética do setor de ferro-gusa e aço ao longo dos anos é possível verificar a drástica redução do carvão vegetal. Também é visível o uso de óleo combustível chegando à extinção de uso nos últimos 5 anos. A entrada de outros combustíveis na estrutura como o biodiesel, GLP e o grande aumento do uso de gás natural nos últimos 10 anos é observável. Além do coque permanecer como principal combustível no setor do aço, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 - Estrutura de consumo no setor Ferro-gusa e aço



Fonte: EPE (2021)

### 3.3 Intensidade energética na siderurgia

A intensidade energética é um indicador que representa a razão entre o consumo de energia de um país e o seu Produto Interno Bruto (PIB). Convém mencionar que o consumo interno de energia leva em consideração a soma das seguintes energias: carvão, petróleo, gás natural, eletricidade, resíduos industriais e energias renováveis. O objetivo do uso deste indicador é medir e avaliar a eficiência e a sustentabilidade de um país, bem como alcançar a dissociação entre o consumo de energia e o crescimento econômico.

No setor siderúrgico, as intensidades energéticas por etapa do processo e por energético são apresentadas na Figura 8 com os dados advindos da EPE (2009). É possível observar que a etapa da cadeia mais energointensiva é a redução do minério no alto-forno, cuja contribuição para a intensidade energética é de 12,2 GJ/t, isto é, em torno de 74% do consumo final energético total até a fase de laminação a quente. Por sua vez, o combustível responde por 90% deste consumo final energético total, a eletricidade por cerca de 6% e o oxigênio por 4%.

O processo completo, incluindo laminação e acabamento, resulta em uma intensidade energética de 18,0 GJ/t, da qual o consumo de combustível responde por 87%, a eletricidade por 7% e o vapor e o oxigênio, cada um, por 3%.

Figura 8 - Intensidade energética na siderurgia

Etapa	Processo	Energético	GJ/t
Preparação de Materiais (minério e carvão)	Sinterização	Combustível	2,0
		Vapor	-0,2
		Eletricidade	0,2
		<b>Total</b>	<b>1,9</b>
	Coqueificação	Combustível	0,6
		Vapor	0,1
<b>Total</b>		<b>0,8</b>	
Redução (fabricação do ferro)	Alto-forno	Combustível	11,4
		Vapor	0,4
		Eletricidade	0,1
		Oxigênio	0,2
		<b>Total</b>	<b>12,2</b>
Aciaria (fabricação do aço)	Forno a Oxigênio	Combustível	-0,7
		Vapor	-0,2
		Eletricidade	0,1
		Oxigênio	0,4
	<b>Total</b>	<b>-0,4</b>	
	Refino	Eletricidade	0,1
<b>Total</b>	<b>0,1</b>		
Lingotamento	Lingotamento Contínuo	Combustível	0,0
		Eletricidade	0,0
		<b>Total</b>	<b>0,1</b>
Laminação a quente	Planos (Strip)	Combustível	1,3
		Vapor	0,0
		Eletricidade	0,3
		<b>Total</b>	<b>1,6</b>
	Longos (Bars)	Combustível	1,6
		Eletricidade	0,3
		<b>Total</b>	<b>1,8</b>
	Arame (Wire)	Combustível	1,7
		Eletricidade	0,4
<b>Total</b>		<b>2,1</b>	
Sub-Total (baseado em Longos (Bars))	Combustível	14,9	
	Vapor	0,1	
	Eletricidade	0,9	
	Oxigênio	0,6	
	<b>Total</b>	<b>16,5</b>	

Fonte: EPE (2009)

O consumo específico de energia para a produção siderúrgica, definido como a energia necessária para produzir uma unidade de produto físico, que é uma medida de eficiência energética da indústria, pode ser afetado por vários fatores, entre os quais se destacam: a rota tecnológica e os processos utilizados, o tipo e a qualidade dos materiais e energéticos utilizados e o mix de produtos produzidos. As fontes de energia e os materiais utilizados na produção siderúrgica variam em função dos processos tecnológicos utilizados. O consumo específico de energia na indústria siderúrgica brasileira tem mostrado comportamento crescente ao longo dos últimos anos, em função principalmente da maior produção de laminados, registrando, porém, uma redução em 2007 (EPE, 2009).

### 3.4 Norma ISO 14401-1

O plano de norma ISO 14404-1 especifica o método para cálculo de intensidade de emissões de CO<sub>2</sub> para siderúrgicas integradas. Foi construído a partir de um manual criado pela *World Steel Association*, que é a associação (até 2013) composta por 170 grandes produtoras de aço do mundo todo como: CSN, Usiminas, Gerdau, dentre outras. A norma ISO 14404-1 inclui a definição de limite, material e insumos, fluxo de energia e fatores de conversão de CO<sub>2</sub>. Inclui conceitos de emissões diretas, indiretas (também chamadas de *upstream*) e créditos.

#### 3.4.1 Limite da emissão de CO<sub>2</sub>

Como ao redor do mundo existem siderúrgicas integradas com os mais variados *layouts*, disposições e equipamentos, nos mais variáveis tipos de climas e geografias, a ISO 14404-1 optou por aferir a siderúrgica integrada sob a ótica de um limite (fronteira), mais precisamente por um volume de controle. Portanto, deve-se analisar tudo o que entra e tudo o que sai do mesmo.

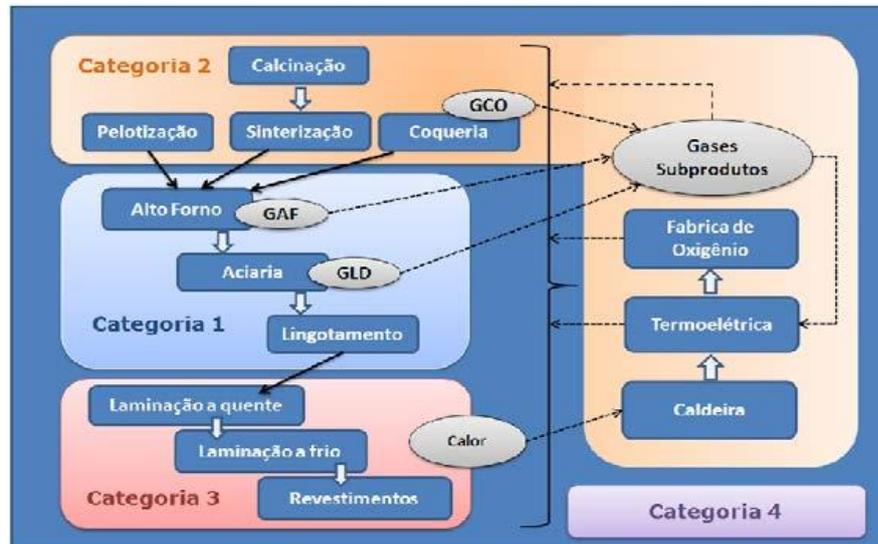
A ISO 14404-1 caracteriza essas instalações por categoria:

- Categoria 1: instalações essenciais, como: Alto-Forno, Aciaria e Lingotamento;
- Categoria 2: instalações que operam dentro do limite ou podem ser terceirizadas, como: Sinterização, Coqueria, Fábrica de Cal, Pelotização, Fábricas de Oxigênio, Nitrogênio e Argônio, termoelétrica e caldeiras;
- Categoria 3: instalações não essenciais (ou linhas de acabamento), como Laminação a quente, Recozimento, Laminação a frio, Zincagem e Galvanização;
- Categoria 4: outras instalações para todas as atividades auxiliares.

#### 3.4.2 Fluxos de massa e energia

Com as categorias definidas, identificam-se todos os fluxos de insumos e fluxos energéticos relacionados as categorias e ao volume de controle da usina. O objetivo desse procedimento é registrar todo insumo que entra e todo insumo que sai, o que é consumido e o que não é consumido pela usina. A Figura 9 exhibe um exemplo de fluxos de insumos e energéticos.

Figura 9 - Exemplo de fluxos de insumos e energéticos

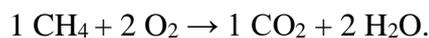


Fonte: CARVALHO (2015)

### 3.4.3 Fatores de conversão

Para contextualizar os fatores de conversão é necessário entender sobre os fatores de emissão. O fator de emissão de CO<sub>2</sub> de um insumo é a proporção de emissão de CO<sub>2</sub> em relação a quantidade pura do insumo, em uma reação de combustão ou dissociação.

Considere a reação estequiométrica de metano com oxigênio:



O volume molar do CH<sub>4</sub> é 22,4x10<sup>-3</sup> Nm<sup>3</sup>. A notação N significa que o volume é adotado nas condições normais de temperatura e pressão (0 °C e 1 atm., respectivamente). Como a massa molar do CO<sub>2</sub> é 44 g.mol<sup>-1</sup>, tem-se o fator de emissão para o CH<sub>4</sub>:

$$\begin{aligned} \text{FE}_{\text{CH}_4} &= \frac{\text{massa molar do CO}_2}{\text{volume molar do CH}_4} = \frac{44 \text{ g}}{22,4 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3} = 1964 \frac{\text{g CO}_2}{\text{Nm}^3 \text{ CH}_4} \\ &= 1,964 \frac{\text{t CO}_2}{\text{Nm}^3 \text{ CH}_4}. \end{aligned}$$

Como premissa, utiliza-se tonelada de CO<sub>2</sub> por unidade de volume de CH<sub>4</sub> por se tratar de um combustível gasoso.

A ISO 14404-1 fornece apenas fatores de conversão, que é a média ponderada dos fatores de emissão dos componentes de um determinado insumo. A lógica da ISO14404-1 é que todo insumo consumido e entrante nos limites do *site* deve ser multiplicado pelo seu respectivo fator de conversão contabilizando sua respectiva emissão de CO<sub>2</sub>.

### 3.5 Fontes de Emissões

A ISO 14404-1 (2015) identifica três tipos de fontes de emissão: emissões diretas, emissões indiretas (*upstream*) e emissões de créditos. Com esses dados de emissão é possível calcular a intensidade de carbono de uma usina e analisar possíveis soluções para tal problema. Os itens a seguir descrevem o processo de identificação das fontes de emissões.

#### 3.5.1 Emissões diretas

As emissões de CO<sub>2</sub> relativas às atividades de produção do aço dentro dos limites do *site* são as responsáveis pelas emissões diretas, ou seja, todos os gases gerados pelo processo siderúrgico. No processo de produção do ferro-gusa, as principais fontes de energia são a térmica e elétrica. As principais consumidoras da energia elétrica são os sistemas de força motriz e iluminação. Já a energia térmica tem como principais consumidores o alto-forno e regeneradores (glendons). Os gases gerados no processo são utilizados para o aquecimento do ar nos regeneradores e nas caldeiras para a produção do vapor destinado à cogeração de energia elétrica. O alto-forno é o principal equipamento consumidor de energia térmica, através do carvão vegetal, que é um combustível e fonte do gás redutor do minério de ferro. Além disso, outros grandes consumidores são os regeneradores (glendons), que utilizam a maior parte do gás de alto-forno para o aquecimento do ar e a cogeração de energia elétrica.

Em relação à energia elétrica, os principais equipamentos consumidores de energia elétrica são os eletro-sopradores da sala de máquinas para as ventaneiras do alto-forno, motores diversos para o sistema de despoejamento, injeção de finos (ICP), correias transportadoras e bombas para o circuito de refrigeração do alto-forno.

#### 3.5.2 Emissões indiretas (ou *upstream*)

Emissões de materiais importados relacionadas com as atividades de produção de aço de terceiros fora da fronteira são caracterizadas como emissões indiretas ou *upstream*. Para melhor entendimento, todo material ou insumo que seja processado antes de entrar na indústria, possui um adicional de *upstream* quando entra nos limites do *site*. São exemplos: coque, cal calcítica, cal dolomítica, pelota, minério sintetizado, metal quente, ferro frio, ferro diretamente reduzido, oxigênio, nitrogênio e argônio.

### 3.5.3 Emissões de créditos

As emissões de créditos são emissões de CO<sub>2</sub> correspondentes aos materiais ou insumos exportados, conforme mostra a Figura 10, por exemplo, óleos de descartes, alcatrão gerado na coqueria, coque excedente de produção, eletricidade excedente ou vapor, entre outros.

Figura 10 - Emissões de créditos



Fonte: CARVALHO (2015)

### 3.6 Geração de energia elétrica na siderurgia

Em relação à geração de energia elétrica nas usinas integradas, estas possuem uma área denominada CTE, central termoelétrica, onde é feita a transformação térmica dos gases para energia elétrica.

São utilizados os gases gerados nos processos de coqueria, alto-forno e aciaria. Nomeados esses gases de GCO, GAF e GAC, respectivamente, eles são levados para as caldeiras e adicionado o gás natural para enriquecer o PCI dos gases, onde é feito a queima para produção de vapor que movimentará as pás de uma turbina par gerar energia elétrica.

De acordo com EPE (2021), é possível analisar os números de consumo e transformação do gás de coqueria. A consumo total do gás foi de  $3.634 \times 10^6 \text{ m}^3$ , sendo que 20% do GCO foi utilizado para geração de energia elétrica, 68% foram destinados exclusivamente a indústria de aço e os 12% restante na indústria energética, conforme pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 - Consumo Gás de Coqueria

	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>										
FLUXO	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	FLOW
PRODUÇÃO	4.182	4.036	3.915	3.960	3.802	3.650	4.131	4.266	3.889	3.575	PRODUCTION
VARIAÇÃO DE ESTOQUES, PERDAS E AJUSTES	-16	-94	-96	54	-123	26	0	-78	-25	59	STOCK VARIATIONS, LOSSES AND ADJUSTMENTS
CONSUMO TOTAL	4.166	3.941	3.819	4.014	3.679	3.675	4.132	4.188	3.864	3.634	TOTAL CONSUMPTION
TRANSFORMAÇÃO <sup>1</sup>	700	616	592	788	571	606	867	819	793	759	TRANSFORMATION <sup>1</sup>
CONSUMO FINAL	3.467	3.326	3.226	3.226	3.108	3.069	3.265	3.370	3.072	2.875	FINAL CONSUMPTION
CONSUMO FINAL ENERGÉTICO	3.467	3.326	3.226	3.226	3.108	3.069	3.265	3.370	3.072	2.875	FINAL ENERGY CONSUMPTION
SETOR ENERGÉTICO	470	449	436	436	438	479	470	485	442	407	ENERGY SECTOR
INDUSTRIAL	2.996	2.877	2.791	2.790	2.670	2.590	2.795	2.885	2.629	2.468	INDUSTRIAL
FERRO-GUSA E AÇO	2.996	2.877	2.791	2.790	2.670	2.590	2.795	2.885	2.629	2.468	PIG-IRON AND STEEL

Fonte: EPE (2021)

### 3.7 Mudanças climáticas

As mudanças climáticas no planeta vêm ocorrendo de maneira mais acelerada que o previsto, e o aquecimento global está ocorrendo em uma intensidade desenfreada. Isso vem acontecendo devido a um progressivo aumento na concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera nos últimos 150 anos. Tal aumento tem sido provocado pelas atividades do homem que produzem emissões excessivas de poluentes para a atmosfera. Entre os gases do efeito estufa que estão aumentando de concentração, o dióxido de carbono, metano e o óxido nitroso são os mais importantes.

Devido à crescente quantidade emitida, o CO<sub>2</sub> é o gás que tem maior contribuição para o aquecimento global. O tempo de permanência deste gás na atmosfera é, no mínimo, de cem anos. Isto significa que as emissões de hoje têm efeitos de longa duração, podendo resultar em impactos no regime climático ao longo de vários séculos. A quantidade de metano emitida para a atmosfera é bem menor, mas seu “efeito estufa” (potencial de aquecimento) é vinte vezes superior ao do CO<sub>2</sub>. No caso do óxido nitroso e dos clorofluorcarbonos, suas concentrações na atmosfera são ainda menores. No entanto, o “efeito estufa” desses gases é 310 e até 7.100 vezes maior do que o gás CO<sub>2</sub>.

A preocupação com o aquecimento global, relatada pelos cientistas do clima, fez com que a Organização Meteorológica Mundial e o Programa das Nações para o Meio Ambiente criassem, em 1988, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change*), com o objetivo de divulgar o conhecimento e as informações sobre as mudanças climáticas, indicando suas causas, efeitos e

riscos para a humanidade e para o meio ambiente natural, além de sugerir meios para combatê-las.

O IPCC é uma organização híbrida (política e científica), de caráter intergovernamental e envolve a contribuição voluntária de milhares de cientistas de centenas de países que a cada relatório produzido, apresentam conclusões relevantes para que os tomadores de decisões se orientem de acordo com as vontades políticas e sobre o que realizar perante as mudanças climáticas.

O IPCC tem como seu principal objetivo compartilhar e analisar informações científicas, técnicas e socioeconômicas relevantes para a compreensão das mudanças climáticas de origem antropogênica, seus potenciais impactos e opções para sua mitigação e adaptação. O IPCC periodicamente publica relatórios de avaliação, desenvolve e aprimora diretrizes de metodologia para elaboração de inventários nacionais de gases de efeito estufa, relatórios especiais e documentos técnicos (IPCC, 2020).

Por meio de suas avaliações, expressas em seus relatórios, o IPCC indica o nível de conhecimento sobre mudanças climáticas de origem antropogênica, identifica lacunas nas áreas de pesquisa e apontam os tópicos onde há consenso na comunidade científica mundial. Os relatórios resultantes da avaliação do IPCC são neutros, relevantes para a política e não prescritivos. Assim, as avaliações constituem insumos fundamentais para as negociações internacionais e para fornecer aos formuladores de políticas avaliações científicas regulares sobre a mudança do clima, suas implicações e possíveis riscos futuros, bem como para propor opções de adaptação e mitigação (BRASIL, 2020).

Os relatórios de avaliação do IPCC são resultados dos esforços de cientistas de todo o mundo que avaliam regularmente uma vasta literatura científica, contribuindo para uma compreensão mais articulada de como o sistema climático funciona e como ele está mudando em resposta à atividade humana (IPCC, 2020; BRASIL, 2020).

A emissão continuada de gases de efeito estufa intensificará o aquecimento global e causará mudanças significativas e duradouras em todos os componentes do sistema climático, aumentando a probabilidade de impactos graves, generosos e irreversíveis para pessoas e ecossistemas. Assim, reprimir a mudança climática exige políticas e ações ambiciosas, em nível mundial, para reduções substanciais e sustentadas das emissões de gases de efeito estufa que, somados a adaptação e colaboração mútua, podem reduzir os perigos da mudança climática (IPCC, 2014).

A ênfase em torno do aquecimento global antropogênico foi fortalecida gradativamente com o trabalho do IPCC desde sua criação. Isso implicou no aumento da visibilidade da climatologia, ampliação das pesquisas na área, aumento dos recursos disponíveis, do prestígio e reconhecimento dos cientistas envolvidos, fortalecendo e tornando o IPCC uma referência mundial sobre o assunto, trazendo para os holofotes da política e da mídia mundial a produção de uma comunidade científica, suas controvérsias e sua dinâmica interna (LEITE, 2015).

### **3.8 Eficiência energética na siderurgia**

A indústria do aço busca continuamente alternativas tecnológicas e operacionais para aumentar sua eficiência energética. Nos últimos cinquenta anos, o setor reduziu o consumo energético por tonelada produzida em 60%, chegando em 2013 a um consumo energético de 21,02 GJ/t de aço bruto. Destarte, em razão dessa vertiginosa queda, a redução do consumo de energia nos últimos anos, média de 1.169,46 kWh/t de aço bruto, tem ocorrido a taxas declinantes e deverá ser cada vez mais difícil obter ganhos de eficiência com base nas tecnologias existentes (CARVALHO, 2015).

Por sua vez, mais de 80% das emissões de GEE na siderurgia, cerca de 1,36 tCO<sub>2</sub>eq/t de aço bruto, provêm do consumo de insumos energéticos. Portanto, ao seguir um movimento semelhante ao do consumo de energia, reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> dependerá, cada vez mais, do desenvolvimento e da introdução de novas tecnologias na produção de aço.

De acordo com as projeções feitas pelo Centro Clima da UFRJ (2020), foi feito um gráfico com o comportamento da produção de aço bruto em milhões de toneladas, mostrando sua evolução de 2010 a 2050, apresentado na Figura 12.

Ao longo dos anos, observamos que a competitividade da indústria nacional com a China vem aumentando bastante, muito provavelmente em decorrência do aumento de custo da produção do aço pela indústria chinesa; entretanto, em contrapartida, temos o fato de que o nosso minério de ferro possui alto teor de pureza, fator estratégico e de grande na competitividade mundial, o que possibilita ao Brasil permanecer no ranking e poder competir em outros mercados mundiais. De acordo com o Centro Clima, a partir de 2030 haverá maior participação do Brasil nas exportações, mesmo com os limites decorrentes da expansão da produção asiática para o sudeste da Ásia, que poderá abastecer boa parte da demanda da região e o certamente levará o Brasil a utilizar melhores práticas a partir de 2030 (CENTRO CLIMA, 2020).

Figura 12 - Evolução da produção de aço (2010-2050)



Fonte: CENTRO CLIMA (2020).

A predominância do coque de carvão e utilização de carvão vegetal como energético em plantas industriais integradas é indiscutível. Porém, a pesquisa também abordou o fato de que as usinas do setor estão se comportando de forma contida e acanhada na substituição do GLP pelo gás natural, bem como o crescimento da utilização do carvão vegetal em detrimento do carvão mineral.

Com base nos projetos da DOE (2006), alguns projetos internacionais trouxeram melhor eficiência aos setores da produção, como a melhoria do ciclo da têmpera esferoidizada na manufatura de tubulações que reduziu o ciclo do tratamento térmico esferoidizado em 20%, aumentando a produtividade durante o processo em 10%. Também foi implantada a fornalha rotativa que produz pepitas de ferro com alta qualidade que obteve redução potencial de 30% na energia utilizada se comparado ao processo tradicional de três etapas em siderúrgicas integradas. Os sistemas de combustão de oxigênio diluído tipo DOC aumentaram em 50% a eficiência energética com relação a combustão convencional a ar e aumentou a produtividade entre 10 e 30%. Por fim, a avaliação em larga escala de rolos de níquel-alumínio nos fornos de tratamento térmico que obteve redução de consumo, podendo fazer a indústria economizar mais de 10.500 TJ por ano.

Outras soluções são apresentadas pelo Relatório da Cadeia Siderúrgica – Eficiência energética (EPE, 2018) de acordo com soluções já presentes no mercado e alguns como testes pilotos. Vale ressaltar que as principais linhas de processo e as etapas de produção do ferro-gusa não sofrerão mudanças significativas com a adoção de tecnologias mais eficientes.

O consumo de energia térmica corresponde a 98,5% do total do consumo de energia em uma planta de produção de gusa e a fonte principal da energia térmica é o carvão vegetal. Sendo assim, os maiores esforços para melhorar a eficiência energética devem se concentrar em novas tecnologias que permitam a redução do consumo específico de carvão vegetal por tonelada de gusa produzido (EPE, 2018).

A Figura 13 mostra algumas das medidas sugeridas e qual tipo de energia ela busca reduzir: térmica ou elétrica, além de categorizar a magnitude de impacto em redução alta, média ou baixa.

Figura 13 - Medidas de eficiência energéticas

Medidas de eficiência energética no subsegmento de gusa	Maturidade da tecnologia	Redução de consumo de energia térmica	Redução de consumo de energia elétrica
Redução do consumo de carvão vegetal com PCI (Pulverized Coal Injection)	Comercial	Alto	Não se aplica
Utilização de pó de balão como combustível	Piloto	Baixo	Não se aplica
Aumento da eficiência energética dos glendons	Comercial	Alto	Não se aplica

Alto
  Médio
  Baixo
  Não se aplica

Fonte: Adaptado de EPE (2018)

Na primeira sugestão é abordado a redução do consumo de carvão vegetal com objetivo de diminuir o PCI e, com isso, gerar economia no desembolso do combustível e redutor, ou seja, aconteceria redução do custo de produção de gusa. Outras vantagens advêm do PCI, mas não se deve perder o foco de sua implantação - economia do carvão vegetal.

A substituição de parte do carvão vegetal pelo PCI pode desempenhar duas das três funções básicas do carvão vegetal, as quais são prover uma fonte de calor e servir como fonte de gás redutor. Em síntese, os seguintes benefícios são derivados do emprego da tecnologia do PCI em altos-fornos de acordo com EPE (2018):

- “• *Redução de custos pela substituição do carvão vegetal por moinha de baixo custo, devendo reduzir o custo energético dependendo do material injetado e mudanças operacionais;*
- *Elevação de produtividade devido ao uso de enriquecimento do ar soprado com oxigênio.*”

O potencial de redução de energia do carvão vegetal com a substituição por finos de carvão vegetal pulverizado é de 25%, tendo em conta que aproximadamente 85% da energia de entrada no alto-forno na produção de ferro-gusa é proveniente do carvão vegetal (SOARES, 2011).

Na segunda sugestão do relatório emitido pelo EPE (2018) o pó de balão ou pó do coletor é um resíduo gerado no processo de limpeza do gás de alto-forno. É comum ser reciclado como material de adição na carga das sinterizações de minérios. Visto que o pó de balão desempenha a função de combustível na mistura a sinterizar, decidiu-se avaliar se seria capaz de exercer essa mesma função quando misturado ao carvão pulverizado do alto-forno e substituir parte dessa massa de carvão.

A energia do pó de balão obtida no processo é de 0,63 GJ/t de ferro-gusa. Os resultados de testes realizados no alto-forno, quando se adiciona pó ao carvão pulverizado injetado, mostrou que o pó prejudica a combustão do PCI, o que faz com que esteja sendo investigada a aplicação desta tecnologia (SILVA, 2016).

Na parte de aumento da eficiência energética dos glendons, a instalação de chicanas, que são partes integrais do projeto de trocador de calor casco e tubos. São projetadas para suportar o feixe de tubos e direcionar o feixe de fluidos para a máxima eficiência na troca térmica, e com isso foi possível elevar a eficiência para 67,4%. A inclusão das chicanas se mostrou mais efetiva do que a redução da área de passagem dos gases da combustão, e promoveu um aumento na eficiência energética dos glendons de 53,1% para 67,4%. O objetivo da utilização de chicanas foi fazer com que o fluxo dos gases da combustão fosse cruzado ao fluxo de ar no interior das serpentinas e a turbulência do escoamento externo fosse aumentada, aumentando assim a troca de calor (VIEIRA, 2016).

Outro ponto abordado para aumento de eficiência é o apagamento a seco do coque (CDQ). No final do processo de coqueificação, sabe-se que o coque quente é encaminhado para fora do forno. Sendo assim, utiliza-se o processo CDQ, que consiste no resfriamento do coque por circulação de um gás inerte (por exemplo, nitrogênio) em uma câmara, geralmente denominada de câmara de resfriamento, onde o coque quente entra pela parte superior e o gás inerte entra em contracorrente pela parte inferior. Em seguida, o gás utilizado sai com a energia recuperada do coque quente, podendo ser utilizado para produzir vapor de alta pressão para o processo em questão, geração de eletricidade ou para outros fins. Por fim, após ser passado para geração de vapor de alta pressão, o ar inerte resfriado é recirculado para a câmara (JCOAL, 2018).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,3 GJ/t de coque, com custo bastante elevado de US\$ 110/t de coque, e *pay back* em longo prazo podendo ser maior do que 30 anos (BNDES, 2012).

Para aumentar a eficiência é possível também o controle de perdas e pressão interna dos altos-fornos, pois além de melhorar a distribuição de temperatura e evitar a entrada de ar frio nas câmaras de combustão, sendo um requisito necessário para o desempenho satisfatório do forno, o controle adequado da pressão interna do forno é um importante fator de segurança para o sistema, já que trabalha a uma pressão superior à pressão atmosférica. Dessa maneira, evitar a entrada de ar frio dentro do forno, portanto, evita riscos de explosão e incêndio (SARTORI, 2012).

### **3.9 Cenário econômico na indústria do aço**

Nos anos de 2018/2020, o Brasil enfrentou situações de extrema gravidade: primeiro, a greve dos caminhoneiros, cuja paralização afetou diretamente a distribuição de matéria-prima e dos produtos fabricados e acabados durante o período. Entretanto, mesmo diante da dificuldade para fazer escoar os produtos, merece destaque a indústria do aço que se manteve estável e sua produção superou em 1,8% o mesmo período no ano de 2017, atingindo a marca de 35,4 milhões de toneladas. Importante lembrar outro acontecimento extremamente marcante para a história do país e com reflexos diretos na indústria do aço: a tragédia que afetou o município de Brumadinho/MG. Em janeiro de 2019 o mundo parou estarecido diante da exponencial tragédia do rompimento da barragem de propriedade da empresa Vale, com centenas de pessoas mortas e danos ambientais imensuráveis. Além disso, trouxe como consequência a falta de matéria prima durante meses. Por fim, e não menos importante, em 2020 eclodiu a pandemia da COVID-19 ocasionada por um vírus originário da China, gerando uma redução na exportação de produtos originados de aço, levando as indústrias a buscar como foco o mercado interno, conforme aponta o relatório de sustentabilidade (IABr, 2021).

## 4 REDUÇÃO DA INTENSIDADE CARBONO NA SIDERURGIA

A pesquisa desenvolvida tem como objetivo demonstrar as possíveis formas de redução da emissão de gás carbônico na atmosfera no setor da indústria do aço. Inicialmente será feita uma introdução do cálculo da intensidade de carbono e após a apresentação de possíveis formas para diminuir esse número.

### 4.1 Intensidade de carbono

Contabilizar todos os insumos que fazem parte das emissões indiretas e multiplicá-los pelos seus respectivos fatores de conversão e por fim, contabilizar todos os insumos que fazem parte das emissões de créditos e multiplicá-los pelos seus respectivos fatores de conversão.

Quando um insumo é processado (emissões indiretas) antes de entrar nos limites do processo, deve-se multiplicar a quantidade deste insumo pelo seu respectivo valor de emissão direta e multiplicar a mesma quantidade pelo seu respectivo valor de emissão indireta e então somá-los.

Com o valor total de emissão de CO<sub>2</sub> em toneladas por ano, divide-se então este valor pela quantidade total de aço bruto que é produzida pelo *site*. Este valor é chamado de intensidade de emissão de CO<sub>2</sub>, e é o alvo final desta metodologia.

É importante notar que se o insumo que é produzido dentro do *site* não sai do volume de controle da empresa, ele não deve ser contabilizado. Por exemplo, o gás de aciaria, gás de alto-forno e gás de coqueria, quando utilizados apenas dentro do *site*, não são contabilizados, pois o CO<sub>2</sub> deles já está contabilizado nos insumos de entrada.

A emissão anual de CO<sub>2</sub> (E<sub>CO<sub>2</sub></sub>) é calculada de acordo com os parâmetros a seguir:

$$E_{CO_2} = \left( \begin{array}{l} \sum \text{Fontes de emissões diretas x respectivos fatores de emissão +} \\ \sum \text{Fontes de emissões indiretas x respectivos fatores de emissão -} \\ \sum \text{Créditos x respectivos fatores de emissão} \end{array} \right).$$

A intensidade anual de emissão (I<sub>CO<sub>2</sub></sub>):

$$I_{CO_2} = \frac{E_{CO_2}}{\text{Produção}} = \frac{t \text{ CO}_2}{t \text{ Aço bruto}}.$$

## 4.2 Métodos para redução da intensidade de carbono

Através dos estudos na disciplina de Planejamento Energético Integrado - PRO 556, é possível encontrar algumas possibilidades para a redução de emissão de CO<sub>2</sub> na siderurgia. No programa europeu chamado “*Ultra Low CO<sub>2</sub> Steelmaking*” da sigla ULCOS, uma das tecnologias que se destacaram é a parte do processo eletrolítico de produção de ferro. Com o uso da eletrólise na produção acontece uma redução no consumo médio de aço líquido em torno de 5 GJ/t, saindo de um consumo de 20 GJ/t para 15 GJ/t, porém não é muito viável pois o processo de geração de energia elétrica deve ser oriundo de processos com baixa emissão como hidroeletricidade. Os dados apresentados nas próximas tabelas são advindos de uma usina siderúrgica de Minas Gerais, foram coletados durante o período de estágio do autor e modificados com uma ordem de grandeza fixa para todos os indicadores com objetivo de não expor a empresa e preservar o sigilo.

Portanto, com essa alteração de escala e proporcionalidade é provável que algumas afirmações sejam apenas perspectivas futuras devido ao fato de que todas as situações citadas podem não ser diretamente proporcional, que afetaria análises futuras para aplicação das medidas. Contudo, o trabalho foi desenvolvido de maneira hipotética para que possa ser aplicado em situações futuras com base em dados originais, ressaltando novamente sua utilização de forma acadêmica, para preservação de sigilo.

### 4.2.1 Utilização de Gás Natural

Uma das formas para reduzir a emissão é o uso de gás natural. Atualmente, o gás natural (GN) já é utilizado na geração de energia, porém essa fonte de energia tem um custo elevado, uma vez que o GN é utilizado em outros processos, como corte. Existe uma oportunidade de melhoria já que esse gás possui um alto poder calorífico em comparação com os gases usados no processo.

No cenário atual foi considerado uma usina com capacidade de produção de 5.000 toneladas/dia de aço e um consumo de energia de 4.320 MWh sendo que 3.479 MWh são adquiridos da concessionária e 841 MWh são gerados pela própria siderúrgica, a partir dos

gases de processo mais o gás natural. As produções de gases de processo através dos turbogeradores (TG's) estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Cenário atual de uma usina integrada

GERAÇÃO ATUAL - CAPACIDADE DE 80% DOS TG'S				
	PRODUÇÃO DO GÁS	PERDA DE GÁS	PCI	DISPONIBILIDADE
GCO (Nm <sup>3</sup> /h)	68.527	2.453	3.965	66.074
GAF (Nm <sup>3</sup> /h)	637.239	1.263	775	635.976
GAC (Nm <sup>3</sup> /h)	27.400	11.647	1.505	15.753
GN(COMPRA) (Nm <sup>3</sup> /h)	11.350	0	8.691	11.350

Fonte: Elaboração própria

Pode-se notar que o PCI do gás natural é mais que o dobro do gás mais eficiente, que é o GCO, de 3.965 Kcal/kg para 8.691 Kcal/kg.

Com isso, propôs-se um cenário em que o gás natural fosse mais consumido, pois é utilizado somente 40% do que a concessionária pode disponibilizar, demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Cenário com mais uso de GN

GERAÇÃO FUTURA - CAPACIDADE DE 90% DOS TG'S				
	PRODUÇÃO DO GÁS	PERDA DE GÁS	PCI	DISPONIBILIDADE
GCO (Nm <sup>3</sup> /h)	68.527	2.453	3.965	66.074
GAF (Nm <sup>3</sup> /h)	637.239	1.263	775	635.976
GAC (Nm <sup>3</sup> /h)	27.400	11.647	1.505	15.753
GN(COMPRA) (Nm <sup>3</sup> /h)	22.700	0	8.691	22.700

Fonte: Elaboração própria

A partir da Tabela 3 é possível analisar o possível retorno financeiro, concluindo que seria possível ter uma redução de R\$ 21 mil por dia, fazendo as equivalências de PCI e geração.

Tabela 3 - Cenário financeiro

IMPACTO FINANCEIRO					
Item	R\$/MWh	CENÁRIO ATUAL		CENÁRIO FUTURO	
		MWh / Ndam <sup>3</sup> /h	Custo	MWh / Ndam <sup>3</sup> /h	Custo
CONSUMO (MWh)		4.320,00		4.320,00	
GERAÇÃO (MWh)	R\$ -	841,00	R\$ -	1.026,00	R\$ -
GN PARA GERAÇÃO	R\$ 1.901,00	11,35	R\$ 21.576,35	22,70	R\$ 43.152,70
AQUISIÇÃO (MWh)	R\$ 234,05	3.479,00	R\$ 814.270,51	3.294,00	R\$ 770.970,70
		<b>TOTAL (R\$/MWh)</b>	<b>R\$ 835.846,86</b>	<b>TOTAL (R\$/MWh)</b>	<b>R\$ 814.123,40</b>

ECONOMIA		
R\$	21.723,46	Por dia
R\$	651.703,85	Por mês
R\$	7.820.446,16	Por ano

Fonte: Elaboração própria

A injeção de gás natural permite uma redução do consumo de coque com benefícios associados. Esta tecnologia requer pouco investimento adicional em equipamentos especiais, com exceção do distribuidor e equalizador de pressão do gás, e permite diminuir consideravelmente o consumo de coque. No entanto, os preços do gás natural podem limitar sua atratividade econômica. As taxas de substituição do gás natural variam entre 0,9 e 1,15 tonelada de gás natural por tonelada de coque (WORRELL, 2010).

A aplicação dessa medida pode alcançar uma economia de energia térmica de 0,90 GJ/t de gusa, com custo de US\$ 7,8/t de gusa, e *pay back* com curto prazo de 1,5 ano (BNDES, 2012).

#### 4.2.2 Utilização de injeção de finos (ICP)

O processo de injeção de finos (ICP) consiste em utilizar os finos de carvão (moinha) na injeção das ventaneiras dos altos-fornos junto com o ar aquecido, ajudando no processo de queima do combustível e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de carvão vegetal por tonelada de ferro-gusa produzido. O principal objetivo da injeção de finos está na substituição parcial do carvão vegetal carregado pelo topo do alto-forno.

Segundo Ângelo *et al.* (2013), alguns dos benefícios da ICP são:

- “• *Redução de custos pela substituição do carvão vegetal por moinha de baixo custo, devendo reduzir o custo energético dependendo do material injetado e mudanças operacionais;*
- *Elevação de produtividade devido ao uso de enriquecimento do ar soprado com oxigênio.*
- *Menor desmatamento, no caso de Alto-Forno a carvão vegetal, e geração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, pois, estar-se-á diminuindo o consumo de carvão vegetal;*

- *Diminuição na degradação ambiental por causa da otimização de consumo energético;*
- *Maior estabilidade de qualidade de gusa e redução do teor de silício.”*

Não obstante, foi realizada uma análise de cenários considerando a utilização da injeção de finos em um alto-forno com capacidade de produção de aproximadamente 10.000 toneladas de ferro-gusa por mês.

Inicialmente, com a auxílio de um *software* foram calculados a perda térmica, impacto financeiro e ganho produtivo para os cenários sem e com injeção de finos.

Em relação ao balanço térmico, a partir dos valores calculados que são apresentados na Tabela 4, percebe-se que quanto maior o índice de injeção de finos, maior é a perda térmica do processo. Isso se dá devido ao efeito refrigerante causado pelo carvão injetado. Dessa forma, há uma diminuição na temperatura de chama. Segundo Fernandes (2007), a soma destes fatores minimiza o consumo de combustíveis e aumenta a produtividade do forno.

Tabela 4 - Balanço térmico ICP

<b>BALANÇO TÉRMICO</b>		
<b>Item</b>	<b>Cenário 1: Sem ICP</b>	<b>Cenário 2: Com ICP</b>
Carvão (kg/t gusa)	640	550
Finos (kg/t gusa)	0	100
<b>Perda térmica</b>	<b>202.140,16</b>	<b>235.404,93</b>

Fonte: Elaboração do próprio autor

Para analisar o impacto financeiro na Tabela 5, foi considerado um cenário em que não há injeção de finos e um segundo cenário em que há injeção. No primeiro cenário, há um consumo de 640 kg/t gusa, enquanto no segundo cenário, esse consumo é reduzido para 550 kg/t gusa, já que quanto maior a taxa de injeção, menor o consumo de carvão vegetal. Sendo assim, aplicando o consumo de carvão e finos, considerando o custo de cada um, conclui-se que há uma economia de R\$ 32,90 por tonelada de ferro-gusa. Considerando uma produção mensal de 10.000 toneladas, há uma economia mensal de R\$ 329.000,00.

Tabela 5 - Impacto financeiro

IMPACTO FINANCEIRO					
Item	Preço por Kg de carvão	Cenário 1: Sem ICP		Cenário 2: Com ICP	
		Quantidade	Custo	Quantidade	Custo
Carvão (kg/t gusa)	R\$ 0,81	640	R\$ 518,40	550	R\$ 445,50
Finos (kg/t gusa)	R\$ 0,20	0	R\$ 0,00	100	R\$ 20,00
		Venda de Finos	R\$ 23,20	Venda de Finos	R\$ 0,00
		Custos total (R\$/t gusa)	R\$ 492,20	Custos total (R\$/t gusa)	R\$ 465,50
Diferença por tonelada de gusa = R\$ 32,90					
Economia mensal (p/ produção média de gusa = 10.000 t) = R\$ 329.000,00					

Fonte: Elaboração própria

Em relação aos fatores ambientais, relacionados à emissão de CO<sub>2</sub> é utilizado o artigo de Cavaliero e Jannuzzi (1999) como referência. No estudo de caso apresentado no artigo de Cavaliero e Jannuzzi (1999) foi constatado que pode ser reduzida a emissão com a adoção da ICP, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Emissão evitada de CO<sub>2</sub> com a ICP

Emissão evitada de CO <sub>2</sub> com a ICP							
Energéticos	Consumo evitado (TJ)	Fator emissão (tC/TJ)	Emissão "C" (tC)	Emissão "C" (Gg)	Fração "C" Oxidada	Emissão "C" (Gg)	Emissão "CO <sub>2</sub> " (Gg)
Coque	-1985	27,5	-54587,5	-54,6	0,99	-54,04	-198,15
Carvão vegetal	-1056	29,9	-31574,4	-31,6	1	-31,57	-115,78

Fonte: Elaboração própria

#### 4.2.3 Utilização de injeção de Oxigênio

O oxigênio pode ser injetado no alto-forno para melhorar a combustão e facilitar a injeção complementar de carvão pulverizado. O oxigênio é necessário em qualquer processo de combustão, através do enriquecimento ou substituição do ar de combustão por oxigênio. A viabilidade econômica dependerá do investimento nos injetores e na central de produção de O<sub>2</sub> ou no custo de aquisição do O<sub>2</sub> no mercado (YAMAGUCHI, K.; UENO, H.; TAMURA, K., 1992).

Contudo ao analisar o balanço térmico, indicado na Tabela 7, percebe-se que quanto maior o índice de injeção de oxigênio, menor é a perda térmica do processo e, consequentemente, há uma redução no consumo de carvão vegetal.

Tabela 7 - Balanço térmico – Injeção de Oxigênio

BALANÇO TÉRMICO			
Item	Cenário 1: 0% O <sub>2</sub>	Cenário 2: 2% O <sub>2</sub>	Cenário 3: 4% O <sub>2</sub>
Consumo de carvão (kg/t gusa)	550,00	543,75	538,32
Perda térmica (Mcal/t gusa)	283,00	251,10	224,40
Conversão Redução Carvão (kg/ gusa)	0,00	-6,25	-11,68

Fonte: Elaboração própria

Portanto, ao analisar o impacto financeiro gerado pela injeção de oxigênio nos três cenários, percebe-se através da Tabela 8 que existe um ganho financeiro.

Tabela 8 - Impacto financeiro Injeção de Oxigênio

IMPACTO FINANCEIRO			
Item	Cenário 1: 0% O <sub>2</sub>	Cenário 2: 2% O <sub>2</sub>	Cenário 3: 4% O <sub>2</sub>
Consumo de carvão (kg/t gusa)	550.00	543.75	538.32
Conversão Redução Carvão (Kg/t gusa)	0.00	-6,25	-11,68
Economia em carvão (R\$/t gusa)	R\$ 0,00	R\$ 5,06	R\$ 9,46
Economia mensal s/ O <sub>2</sub> (p/produção = 10.000t)	R\$ 0,00	R\$ 50.625,00	R\$ 94.608,00

Fonte: Elaboração própria

A análise foi realizada levando em consideração a redução do consumo de carvão para cada um dos cenários. Com isso, calculou-se a economia de carvão por tonelada de gusa, utilizando o custo de carvão de R\$ 0,81/kg, que foi citado no anteriormente. Dessa forma, para uma produção de 10.000 toneladas de ferro-gusa, desconsiderando o custo do oxigênio, concluiu-se que é possível ter uma economia mensal de R\$ 50.625,00 no cenário 2 e R\$ 94.608,00 para o cenário 3.

Para calcular o ganho produtivo, sabe-se que para cada 1% de enriquecimento de oxigênio no ar soprado no alto-forno a carvão vegetal, mantendo-se a vazão de ar, a produção terá um aumento de 5%. Dito isso, elaborou-se a Tabela 9, que apresenta a produção de ferro-gusa para cada cenário.

Tabela 9 - Ganho produtivo Injeção de Oxigênio

PRODUÇÃO			
Item	Cenário 1: 0% O <sub>2</sub>	Cenário 2: 2% O <sub>2</sub>	Cenário 3: 4% O <sub>2</sub>
PRODUÇÃO (t gusa)	10.000	11.000	12.000

Fonte: Elaboração própria

### 4.3 Análise dos resultados

De acordo com as possibilidades apresentadas nos tópicos anteriores é possível observar diversas formas de buscar a redução da intensidade de carbono nesse meio. É possível ressaltar

a maneira mais viável para obter essa redução seria a injeção de finos no alto-forno, pois é um insumo muito mais acessível em termos econômicos que o carvão mineral, não demandaria a alteração do fluxo de insumos mais caro como o gás natural, pois a oferta não é tão abrangente. Além de que o valor é maior e há maior dificuldade de implementação inicial no sistema. Com isso, é possível observar uma redução no preço R\$/kg do ferro-gusa.

#### **4.4 Plano ambiental**

O plano ambiental é importantíssimo para direcionar os caminhos possíveis para a empresa em relação ao âmbito ambiental, onde busca mapear os percalços que pode se enfrentar, o objetivo principal da empresa e suas metas abertas numa linha do tempo. Nesse parágrafo é mostrado como algumas empresas do setor estão se comportando.

De acordo com dados apresentados pela empresa siderúrgica Gerdau em seu próprio endereço eletrônico, a siderúrgica foi selecionada para compor a carteira do Índice Carbono Eficiente (ICO<sub>2</sub>), da B3. O ICO<sub>2</sub> reúne empresas do IBrX-100 comprometidas com a eficiência e transparência na gestão dos gases de efeito estufa, tema que se tornou um dos principais fundamentos para o desenvolvimento sustentável da empresa. A nova carteira do ICO<sub>2</sub> teve vigência de janeiro a abril de 2021, sendo rebalanceada a cada quatro meses, conforme as atualizações do IBrX-100. A Gerdau é a única empresa do setor de Materiais Básicos/Siderurgia e Metalurgia a compor o índice ICO<sub>2</sub>, reafirmando o seu compromisso com as questões climáticas e com a preparação para a economia de baixo carbono.

Além disso, em dezembro de 2021, a Gerdau alcançou nota B, valor acima da média regional da América do Sul e do setor de metais e metalurgia, de acordo com o levantamento anual no módulo Climate Change do CDP (Carbon Disclosure Project), a maior e mais respeitada plataforma global de informações ambientais. Os destaques foram sua gestão coordenada, transparência em ações de meio ambiente, emissões de gases de efeito estufa consideradas inferiores as médias globais da indústria do aço e iniciativas de redução de GEE, que contaram com cases de eficiência energética na operação da usina de Ouro Branco em Minas Gerais.

A empresa também apresenta em seu próprio *website* um relatório completo sobre todos os riscos, oportunidades, implicações financeiras sobre todos os capitais naturais que a empresa utiliza direta e indiretamente na fabricação dos seus produtos, nesse documento é abordado temas sobre a água e efluentes, consumo de energia elétrica, reciclagem de material, descarte

de materiais, mudanças climáticas, resíduos e o ponto principal da pesquisa, os gases de efeito estufa.

De acordo com os dados do relatório, a Gerdau apresenta uma redução das emissões direta e indireta conforme a Tabela 10:

Tabela 10 - Emissão Direta Gerdau

#### GRI 305-1 - Emissões diretas (Escopo 1) de gases de efeito estufa (GEE)

EMISSIONES DIRETAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE), EM TONELADAS DE CO <sub>2</sub> EQ	2019	2020
Total escopo 1	9,056,519	9,198,407
Emissões biogênicas de CO <sub>2</sub>	1,891,560	1,738,243

**Fontes de emissão consideradas no Escopo 1:** Processos Industriais; Combustão estacionária; Combustão móvel.

#### GRI 305-2 - Emissões indiretas (Escopo 2) de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da aquisição de energia

EMISSIONES DIRETAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE), EM TONELADAS DE CO <sub>2</sub> EQ	2019	2020
Total escopo 2	2,890,986	2,082,515

**Fontes de emissão consideradas no Escopo 2:** Energia Elétrica adquirida

Fonte: TORRES (2021)

Dessa forma, a Gerdau chegou à intensidade de emissões de gases de efeito estufa de 0,93 tCO<sub>2</sub> e/t de aço produzido em 2020, tendo uma redução de 4% em relação a 2019. Com esse volume de intensidade de emissão, a empresa atingiu a metade da média global do setor informada pela organização *World Steel Association*. A redução das emissões de gases de efeito estufa comparadas ao ano anterior está relacionada a uma melhor performance da unidade integrada que utiliza carvão de fonte renovável, mesmo com aumento de sua produção em relação as demais rotas produtivas, informa a Gerdau. Outro fator que contribuiu para este resultado foi a adoção dos fatores de emissão de energia renovável nas unidades no Canadá.

A Gerdau também adotou metas de produção sustentável e de baixo carbono que impacta em investimentos em tecnologias de produção e na baixa emissão de gases de efeito estufa. De acordo com Gerente de Meio Ambiente, Cenira de Moura Nunes, a gestão de CO<sub>2</sub> da empresa faz parte do negócio. Cenira afirma que o Conselho de Administração da Gerdau aprovou a proposta de incluir metas de desempenho em 2020. “Cerca de 20% do valor dos bônus de longo

*prazo, incorporados à remuneração variável dos executivos, estão condicionados ao cumprimento de metas, dentre elas, das emissões de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono)”, afirma o Gerente.*

Somente em 2020, a companhia reciclou 11 milhões de toneladas de sucata ferrosa, o que coloca a Gerdau como a maior recicladora do produto na América Latina. Vale ressaltar que 73% do aço produzido nas usinas da multinacional tem como matéria-prima a sucata ferrosa, e cada tonelada de aço produzida com sucata ferrosa equivale a deixar de emitir 1,5 tonelada de gases causadores de efeito estufa. Além de utilizar matéria-prima reciclada em boa parte de sua produção, a Gerdau reaproveita cerca de 98% da água usada em seus processos industriais e 78% de todos os resíduos gerados.

A Empresa Vale também avança neste caminho de desenvolvimento sustentável desde 2019. Segundo a gerente de Mudanças Climáticas da Vale, Vivian MacKnight, as ações vão desde as demandas da população no entorno da fábrica até o impacto no meio ambiente. De acordo com a gerente, a Vale se comprometeu em reduzir suas emissões de carbono em 33% até 2030. A implantação de novas ferramentas na produção do aço, como o uso do biocombustível na pelletização em substituição ao carvão e o uso de energia renovável, com eficiência energética são os métodos que estão sendo utilizados pela empresa Vale. Vivian MacKnight também diz: “A empresa pretende tornar-se uma mineradora carbono neutra em 2050”.

Preocupada com as mudanças climáticas e o aquecimento global, a ArcelorMittal Brasil também estabeleceu metas para baixo carbono. Até 2030, a empresa de aço comprometeu-se em reduzir em 10% a emissão de carbono, e, até 2050, de se tornar carbono neutra. A empresa de aço adota os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU.

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 ou ODS 12 trata-se do “consumo e produção responsáveis de acordo com a ONU. O ODS 12 visa a promoção da eficiência do uso de recursos energéticos e naturais, da infraestrutura sustentável, do acesso a serviços básicos. O objetivo é priorizar a informação, a gestão coordenada, a transparência e a responsabilização dos atores consumidores de recursos naturais como ferramentas chave para o alcance de padrões mais sustentáveis de produção e consumo.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho é pautar-se em apresentar a importância do setor siderúrgico na emissão de gases de efeito estufa e conseqüentemente da intensidade de carbono do setor, buscando mostrar estratégias para reduzir as emissões de forma sustentável e equilibrada, considerando aspecto financeiro para a indústria. Como base para pesquisa utilizou-se o método de pesquisa explicativa e de natureza básica com um caráter informativo e expositivo das situações.

A escolha do tema ocorreu pela importância da redução das emissões de gases de efeito estufa para contribuir com a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, assunto que vem sendo discutido nos principais fóruns mundiais. O trabalho possui o objetivo de colaborar com soluções para reduzir a emissão de gases de efeito estufa no setor siderúrgico, trazendo maior conscientização sobre o assunto, que começa a se apresentar em forma de normas, metas e leis para diferentes tipos de indústrias e em quase todos os países do mundo.

Para atingir uma compreensão da redução da intensidade de carbono nas indústrias siderúrgicas, definiu-se três objetivos principais. O primeiro foi compreender todo o mercado e suas emissões, depois se propôs mudanças para que ocorra a redução mesmo que gradual de gases emitidos no processo; analisou-se, então, os critérios adotados e a forma de atuação das empresas e indústrias para que se torne realidade, em médio e longo prazo, o decréscimo da emissão de gases e, por fim, qual o formato adotado para que referidas mudanças se tornem realidade.

As emissões de GEE no mundo são aproximadamente 6,9 bilhões de toneladas, cerca 6,5% de responsabilidade da siderurgia de acordo com a *World Steel Association* (2013). O Brasil é responsável por cerca de 2,28% ao ano do total emitido mundialmente, ou seja, em torno de 1.052 Milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e Sendo a indústria siderúrgica brasileira responsável por 105,2 Milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e. Destarte, o processo siderúrgico no Brasil, consome 6% de total energia consumida no país, chegando 15.249 toe por ano.

Com isso, três principais soluções foram apresentadas no projeto: injeção de finos nos altos-fornos, utilização de gás natural nos turbo geradores e uso de oxigênio também no alto-forno. A partir dessas soluções foram detalhados os modos para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, além de abranger o impacto financeiro de cada solução. Assim, mostrou-se que esses processos podem ser viáveis tecnicamente e economicamente.

Na injeção de finos é possível concluir que seja uma solução viável com aplicação imediata, gerando benefícios financeiros e de produtividade, pois aumentando a perda de calor durante o processo se obtém um aumento de produtividade e redução no uso de combustível. Financeiramente há um retorno de R\$ 32,90 por tonelada de gusa, uma vez que o preço da tonelada de finos é bem menor que o preço do carvão vegetal. Considerando uma produção mensal de 10.000 t é possível obter uma economia de R\$ 329.000,00 mensalmente.

Sobre a utilização de gás natural é possível apontar alguns bloqueios estruturais, sendo necessárias instalações capazes de suportar o processo e ainda haver disponibilidade para usar na geração de energia nos turbogeradores. Porém a utilização dessa fonte traz um poder calorífico mais alto ao ser combinado com os gases de processo GAC, GAF e GCO, trazendo um mix mais rico. Apesar do custo alto para aquisição, o gás traz rentabilidade quando se trata de uma geração constante, saindo de um patamar de aquisição de energia elétrica da concessionária de 3.479 MWh/ Ndam<sup>3</sup>/h para 3.294 MWh/ Ndam<sup>3</sup>/h, isso representa mais de R\$ 21.000 por dia, apenas dobrando o consumo de gás natural.

O uso de oxigênio para se injetar no alto-forno ajuda na combustão, reduzindo assim a perda de calor no forno e com isso é possível aumentar a produtividade de gusa e reduzir o gasto financeiro. Há menor consumo de carvão vegetal por tonelada de gusa, trazendo um ganho financeiro entre R\$ 50 a R\$ 94 mil dependendo da porcentagem de injeção de O<sub>2</sub> no alto-forno, variando entre 2% e 4%.

Por fim, ao analisar os movimentos da indústria do aço é possível concluir que as empresas estão trabalhando fortemente para realizar uma produção mais limpa, embora não seja a atenção ideal dispensada a esse tema. Porém, empresas como Gerdau e Vale, apresentaram uma média de emissão de GEE 50% menor que a média global, como mostra os relatórios da *World Steel Association* (2019), demonstrando que estão atentas ao tema e incorporando essa conscientização as metas da empresa e dos seus colaboradores.

Em pesquisas futuras, outro ponto de melhoria e base de pesquisa e análise seria a abordagem do tema de redução de consumo de energia elétrica no processo de siderurgia como um todo, por estar indiretamente ligado a emissão de GEE nas indústrias.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO. **Eficiência Energética na Siderurgia – Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico**. Campinas, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISSO 14.001-1 Associação Brasileira de Normas Técnicas**. Rio de Janeiro, 2015.

ÂNGELO, M. M, **Construção e simulação de um algoritmo que permita prever os efeitos da injeção de diferentes materiais pulverizados pelas ventaneiras em altos-fornos**. UFOP, 2013.

BALL, D. F. **Agglomeration of ore**. London: Heinemann Educational Books Limited, 1973.

BNDES - **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade**. BNDES Setorial 41, p. 181-236, 2012

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa Brasil**. Brasília, 2014.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. **Quarta comunicação nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília, 2020.

CARVALHO, D.S. **Análise de emissões de CO<sub>2</sub> e de energia - simulação com novas tecnologias siderúrgicas**. Guaratinguetá: UNESP – Universidade Estadual de São Paulo, 2015.

CARVALHO, P. S. L. et al. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade**. BNDES Setorial, n. 41, Rio de Janeiro, p. 181-236, mar. 2015.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Eficiência Energética na Siderurgia – Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2009.

CENTRO CLIMA (COPPE). **Emissão de Gases de Efeito Estufa – 2050: Implicações Econômicas e Sociais do Cenário de Plano Governamental**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2020.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Siderurgia no Brasil 2010-2025; subsídios para tomada de decisão**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.

CNI - Confederação Nacional da Indústria. **A indústria do aço no Brasil**. Brasília, 2012.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria. Relatório Setorial – Setor ferro-ligas**. Confederação Nacional da Indústria – Brasília, 2010

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados: SEGMENTO CADEIA SIDERÚRGICA**. Rio de Janeiro, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco energético nacional 2015: ano base 2014**. Rio de Janeiro, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco energético nacional 2021: ano base 2020**. Rio de Janeiro, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Caracterização do uso da energia no setor siderúrgico brasileiro**. Rio de Janeiro, 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Procedimentos de elaboração de balanços energéticos**. Rio de Janeiro, 2005.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **A Siderurgia em Números 2020**. Rio de Janeiro – RJ:2020.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade 2012**. 7ª ed. Rio de Janeiro - RJ: 2012.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2013**. 8ª ed. Rio de Janeiro - RJ: 2013.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2015**. 10ª ed. Rio de Janeiro - RJ: 2015.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2019**. 14ª ed. Rio de Janeiro - RJ: 2019.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2020**. 15ª ed. Rio de Janeiro - RJ: 2020.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2021**. 16ª ed. Rio de Janeiro - RJ: 2021.

IPCC. **PAINEL GOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (IPCC, sigla em inglês)**. IPCC, 2020

IPCC. **Mudanças Climáticas 2014: Relatório de Síntese**. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [Equipe de Redação Central, RK Pachauri e LA Meyer (eds.)]. IPCC, Genebra, Suíça, 151 pp. 2014.

JCOAL. **Coke Dry Quenching Technology**. Japan Coal Energy Center, 2018.

LEITE, José Correa. **Controvérsias na climatologia: o IPCC e o aquecimento global antropogênico**. Sci. stud., São Paulo, v. 13, n. 3, p. 643677, set. 2015.

LINKE. P.P. **Controle de Emissões de CO2 na siderurgia: Estratégias empresariais da ArcelorMittal Tubarão**. Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM.

MACHADO, A. C.; OLIVEIRA, G. F. **Sistema de Energia na Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais - ABM, 1984.

MACHADO, M. L. P.; PAULO, V. F. M. S.; FLÁVIO, L. A. **Siderurgia para não Siderurgistas**. Vitória: Associação Brasileira de Metais - ABM, 2003.

MORELLO, T.F. **Carvão vegetal e siderurgia: De elo perdido a solução para um mundo pós Kyoto**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009.

NASCIMENTO, F.P. **Metodologia da Pesquisa Científica: teoria e prática – como elaborar TCC**. Brasília: Thesaurus, 2016

QUENTAL, E. A. **Modelo de balanço energético para gerenciamento e previsão de demandas para uma planta siderúrgica típica brasileira**. São João Del Rei, 2015.

PAULA, G. M. de. **Economia de baixo carbono: avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas: produção independente de ferro-gusa (“guseiros”): relatório final**. Ribeirão Preto: Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, 2014.

SALES, Gabriel. **Setor de mineração avança na agenda de consumo e produção sustentáveis**. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/economia/setor-de-mineracao-avanca-na-agenda-de-consumo-e-producao-sustentaveis/> Acesso em 23 jan. 2022

SARTORI, S. C. - **Análise dos riscos e medidas de segurança em fornos de atmosfera controlada para tratamento térmicos e termoquímicos**. Atibaia, SP: 2012.

SCHERRER, C. **A indústria Siderúrgica Brasileira: um estudo econométrico**. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Economia Faculdade de Ciências Econômicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS. Porto Alegre: 2006.

SILVA, H. P. **Efeito da adição de pó de balão na combustibilidade do carvão** - Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências – Física de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto: 2016.

STARLING, A. R. D. A. R. **Avaliação de metodologias de simulação física**. Dissertação (Mestrado) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Belo Horizonte. 2012.

SOARES, L. N., 2011 - **A energia e a sustentabilidade aplicadas a uma usina siderúrgica integrada a carvão vegetal**. UFMG, 2011

TORRES, Pedro. **Capital Natural**, 2021. Disponível em: <https://centraldeindicadores.gerdau.digital/capital-natural.html> Acesso em 23 Jan. 2022

VIEIRA, D. D. C., OLIVEIRA, T. L. - **Cálculo da eficiência térmica do glendons**. ABM week, 2016.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel’s contribution to a low carbon future and climate resilient societies**. 2013 Disponível em: [https://www.apeal.org/wp-content/uploads/2015/03/Steel\\_s-contribution-to-a-low-carbon-future.pdf.pdf](https://www.apeal.org/wp-content/uploads/2015/03/Steel_s-contribution-to-a-low-carbon-future.pdf.pdf) Acesso em 27 Fev 2022

**WORRELL, E.- Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry, 2010.**

**YAMAGUCHI, K.; UENO, H.; TAMURA, K. Maximum Injection Rate of Pulverized Coal into Blast Furnace through Tuyeres with Consideration of Unburnt Char. Japão, 1992.**