



**Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP**  
**Escola de Minas**  
**Departamento de Engenharia de Produção**  
**Campus Morro do Cruzeiro**  
**Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil**



## **MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**“O aproveitamento energético do carvão vegetal no contexto das mudanças climáticas:  
Uma abordagem do setor siderúrgico do Estado de Minas Gerais”**

**Amanda Cristina Gonçalves Silva**

**Ouro Preto, 13 de Janeiro de 2022.**

**Amanda Cristina Gonçalves Silva**

**“O aproveitamento energético do carvão vegetal no contexto das mudanças climáticas:  
Uma abordagem do setor siderúrgico do Estado de Minas Gerais”**

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

Área de concentração: Ciências Exatas

Orientador: Prof. Dr. Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino

Ouro Preto, 13 de Janeiro de 2022.

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586o Silva, Amanda Cristina Goncalves.

O aproveitamento energético do carvão vegetal no contexto das mudanças climáticas [manuscrito]: uma abordagem do setor siderúrgico do Estado de Minas Gerais. / Amanda Cristina Goncalves Silva. - 2022. 65 f.

Orientadora: Profa. Dra. Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino. Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Produção . Área de Concentração: Planejamento Energético.

1. Siderurgia. 2. Carvão Vegetal. 3. Mudanças Climáticas. 4. Alto-forno. I. Flausino, Bruna de Fátima Pedrosa Guedes. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 658.562

Bibliotecário(a) Responsável: Angela Maria Raimundo - SIAPE: 1.644.803



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



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Amanda Cristina Gonçalves Silva**

**O aproveitamento energético do carvão vegetal no contexto das mudanças climáticas: uma abordagem do setor siderúrgico do Estado de Minas Gerais**

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

Aprovada em 12 de janeiro de 2022

Membros da banca

DSc - Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)

DSc - Paulo Santos Assis - (Universidade Federal de Ouro Preto)

DSc - Gustavo Nikolaus Pinto de Moura - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 12/01/2022



Documento assinado eletronicamente por **Bruna de Fatima Pedrosa Guedes Flausino, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/01/2022, às 14:25, 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 12/01/2022, às 20:20, 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 **0267619** e o código CRC **8A4ABFDA**.

## RESUMO

As mudanças climáticas têm afetado a consciência ambiental em todo o mundo. A siderurgia é uma das atividades produtivas de grande importância econômica, mas que também pode causar impactos ao meio ambiente, contribuindo, assim, com a emissão de gases de efeito estufa. Dentro desse cenário, o objetivo central deste trabalho é estudar a utilização do carvão vegetal como combustível na produção de ferro-gusa em altos-fornos, sob aspectos socioeconômicos e ambientais visto que este é uma alternativa para a redução de emissões frente à utilização do coque de carvão mineral. A metodologia empregada envolveu pesquisas bibliográficas e análise do setor siderúrgico do Estado de Minas Gerais, onde atuam grande parte das siderúrgicas que utilizam o carvão vegetal em seus altos-fornos. As principais conclusões apresentadas indicam que: para as siderúrgicas que utilizam coque proveniente do carvão mineral emitiram aproximadamente 5,84 Mt de CO<sub>2</sub> a mais ano de 2020, comparando-se as siderúrgicas a carvão vegetal utilizando-se a metodologia do IPCC para o cálculo, e 21 Mt a mais utilizando-se a metodologia da WorldSteel, devido principalmente ao processo fotossintético realizado no crescimento do eucalipto que não existe na obtenção do carvão mineral (combustível fóssil). De 2009 a 2019 houve um aumento de 620.329 hectares de área plantada de eucalipto, o que representa um aumento expressivo de 47,71% da área plantada em 10 anos. Tal aumento pode ser explicado pelo fato do eucalipto ter grande utilização para o fim de restauração de áreas degradadas, pela razão da sua capacidade de rápido crescimento, em condições de baixa fertilidade do solo, formando florestas catalisadoras de espécies arbóreas nativas, além disso as plantações de eucalipto possuem um baixo custo de implantação e manutenção e sustentabilidade das florestas plantadas. Portanto pode-se concluir que para fins de restauração de áreas degradadas a utilização da silvicultura se torna bem vantajosa, visto que o plantio de eucalipto consegue regenerar o solo em alguns anos. Porém no caso da devastação de mata nativa para plantio da monocultura de eucalipto, os impactos sócio-econômicos e ambientais são fatores que devem ser levados em conta quanto a produção de carvão vegetal para sua utilização na siderurgia.

**Palavras chave:** Siderurgia, Carvão Vegetal, Mudanças Climáticas, Alto-forno, Emissões.

## ABSTRACT

Climate change has affected environmental awareness around the world. The steel industry is one of the production activities of great economic importance, but which can also impact the environment, thus contributing to the emission of greenhouse gases. In this scenario, the main objective of this work is to study the use of charcoal as a fuel in the production of pig iron in blast furnaces, under socioeconomic and environmental aspects, since this is an alternative for the reduction of emissions compared to the use of coke of mineral coal. The methodology used involved bibliographic research and analysis of the steel sector in the State of Minas Gerais, where most of the steel companies that use charcoal in their blast furnaces operate. The main conclusions presented indicate that: for steel mills that use coke from coal, they emitted approximately 5.84 Mt of CO<sub>2</sub> more in 2020, comparing the charcoal-based steel mills using the IPCC methodology for the calculation, and 21 Mt more using the WolrdSteel methodology, mainly due to the photosynthetic process carried out in the growth of eucalyptus, which does not exist in obtaining mineral coal (fossil fuel). From 2009 to 2019, there was an increase of 620,329 hectares of eucalyptus planted area, which represents a significant increase of 47.71% in the planted area in 10 years. This increase can be explained by the fact that eucalyptus has great use for the purpose of restoration of degraded areas, due to its rapid growth capacity, in conditions of low soil fertility, forming catalyst forests of native tree species, in addition to plantations eucalyptus trees have a low cost of implantation and maintenance, and sustainability of the planted forests. Therefore, it can be concluded that for the purposes of restoration of degraded areas, the use of forestry becomes very advantageous, since the planting of eucalyptus can regenerate the soil in a few years. However, in the case of the devastation of native forest for the planting of eucalyptus monoculture, the socio-economic and environmental impacts are factors that must be taken into account regarding the production of charcoal for use in the steel industry.

**Key words:** Steel, Charcoal, Climate Change, Blast Furnace, Emissions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Propriedades do carvão vegetal .....	11
Figura 2: Carvão Vegetal Granulado .....	12
Figura 3: Preços de combustíveis utilizados para injeção .....	14
Figura 4: Área e distribuição de florestas plantadas no Brasil em 2019 .....	17
Figura 5: Fornos tipo “Rabo Quente” de superfície.....	22
Figura 6: Forno tipo Encosta.....	23
Figura 7: Forno de superfície.....	23
Figura 8: Fornos Missouri – Vallourec & Mannesmann Tubes .....	24
Figura 9: Planta DPC com 10 reatores interligados.....	26
Figura 10: Sistema de carbonização por micro-ondas.....	36
Figura 11: Zonas internas do alto-forno.....	38
Figura 12: Estrutura externa do alto-forno e principais dispositivos de funcionamento.....	39
Figura 13: Reações químicas fundamentais em um alto-forno .....	40
Figura 14: Fatores de emissão de carbono.....	43
Figura 15: Fatores de emissão de carbono (WorldSteel).....	43
Figura 16: Balanço de CO <sub>2</sub> no ciclo de fabricação do ferro-gusa tendo como termorreduzidor o carvão vegetal oriundo de florestas plantadas.....	46
Figura 17: Histórico da área plantada com árvores de eucalipto, 2009-2019 (hectares).....	51

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Emissões de CO <sub>2</sub> durante o processo de carbonização .....	44
Tabela 2: Produção total de ferro-gusa no Estado de Minas Gerais de 2011 a 2020 .....	46

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

- ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
- AMS - Associação Mineira de Silvicultura
- CAF – Companhia Agro Florestal
- CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa
- CERFLOR - Certificado nacional de Qualidade ambiental de Florestas
- CFC - Clorofluorcarbonetos
- CPEF - Companhia Paulista de Estradas de Ferro
- DPC - Drying Pyrolysis Cooling
- FSC - Forest Stewardship Council
- GEEs - Gases de Efeito Estufa
- HPAs - Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia
- ICP - Injeção de Carvão Pulverizado
- IDH - Índice de Desenvolvimento Humano
- IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
- ONU – Organizações das Nações Unidas
- PM10 - Partículas menores ou iguais a 10mm
- PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
- SIF - Sociedade de Investigações Florestais da Universidade Federal de Viçosa
- UNFCCC - Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	8
2. OBJETIVOS .....	10
2.1 Objetivo geral .....	10
2.2 Objetivos específicos.....	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	11
3.1.2. Carvão vegetal aplicado à siderurgia.....	12
3.1.3. A biomassa aplicada à siderurgia .....	14
3.2.O uso do eucalipto na produção do carvão vegetal .....	15
3.2.1. As plantações de eucalipto e o meio ambiente .....	17
3.2.2. Aspectos econômicos e eficiência da produção do carvão vegetal.....	20
3.2.3. Aspectos sociais da produção do carvão vegetal em carvoarias artesanais.....	27
3.3. Aspectos ambientais da produção do carvão vegetal .....	30
3.3.1. O clima e as mudanças climáticas .....	31
3.3.2. As emissões de CO <sub>2</sub> e o setor siderúrgico .....	33
3.4. Novas tecnologias para produção de carvão vegetal .....	35
3.5. Processo siderúrgico usando o alto-forno a carvão vegetal.....	37
4. METODOLOGIA .....	41
4.1 Emissões de carbono na siderurgia em Minas Gerais: estimativa e análise.....	42
4.2. Fatores de emissão de carbono.....	42
4.3. Balanço de CO <sub>2</sub> no ciclo de fabricação do ferro gusa a carvão vegetal .....	43
4.3.1. Emissões de CO <sub>2</sub> na carbonização da madeira .....	43
4.3.2. Emissão de CO <sub>2</sub> na rota produtiva utilizando alto-forno.....	44
4.4. Fixação de CO <sub>2</sub> nas florestas de eucalipto .....	44
4.5. Balanço de CO <sub>2</sub> no ciclo de fabricação do ferro-gusa .....	45
4.6. Emissões de CO <sub>2</sub> pela produção de gusa por carvão mineral x emissões de CO <sub>2</sub> pela produção de gusa por carvão mineral no ano de 2020 .....	46
4.7. Análise dos impactos causados pela supressão de mata nativa para o plantio de <i>Eucalipto</i> .....	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	53
6. CONCLUSÃO .....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos 270 anos a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera aumentou em 49% (ONU, 2021). Este fato pode ser reconhecido como uma das principais causas do aquecimento global. O efeito estufa é um processo natural responsável pelo clima na Terra. Este efeito proporciona um ambiente agradável na superfície da Terra, possibilitando a vida. Os chamados gases do efeito estufa, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFCs (clorofluorcarbonetos), são responsáveis por essa elevação natural na temperatura da superfície da Terra. Porém, as atividades humanas têm aumentado a concentração destes gases na atmosfera. O homem, modificando o ambiente, pode alterar o clima global, alterando o efeito estufa natural.

Houve um aumento mundial no consumo de aço desde a década de 1950, juntamente com um grande desenvolvimento das tecnologias e consequente redução do consumo de combustível e custos operacionais. Durante as últimas décadas foi desenvolvido para o alto-forno as mais eficientes tecnologias e modos operacionais. O consumo de carbono está hoje entre os menores possíveis, chegando, em um alto-forno otimizado, a 5% dos limites impostos pela termodinâmica (Korthas *et al.*, 2004). A maior parte das emissões de CO<sub>2</sub> na siderurgia origina-se da redução do minério de ferro e não da combustão (IBS, 2007) e, apesar de toda a tecnologia já desenvolvida, segundo Korthas *et al* (2004), essas emissões chegam a quase 5% do total das emissões de CO<sub>2</sub> mundial.

O Brasil demonstrou, ao longo de sua história, ser possível a produção de ferro-gusa a partir de um redutor renovável e totalmente ecológico, o carvão vegetal, produzido por madeira de árvore reflorestada. O Brasil é um país com grande extensão territorial, clima e outras condições propícias para a produção de carvão vegetal para consumo no alto-forno, como uma forma de reduzir a emissão global de CO<sub>2</sub>. Tanto o coque como o carvão vegetal são fontes de carbono capazes de fornecer o combustível e o redutor necessários para produção do ferro-gusa no alto-forno. Porém, cada um possui diferenças básicas nas suas propriedades, que influenciam o processo que os utilizam. O carvão vegetal é favorecido pela alta produtividade das florestas energéticas brasileiras, além de possibilitar a não dependência do mercado intencional, visto que, no Brasil, o carvão mineral é importado, já que o carvão brasileiro possui alto teor de cinzas.

Porém a produção de carvão vegetal ainda é um problema no país, pois, em muitas das vezes, as carvoarias não respeitam a legislação vigente e os trabalhadores são expostos a regimes de trabalho fatigantes, sem nenhum tipo de segurança e com uma remuneração baixíssima, em alguns casos inclusive, trabalho infantil é utilizado.

Segundo o Instituto Aço Brasil, o Brasil no ano de 2020 o Brasil foi o maior produtor

de aço bruto da América Latina, seguido do México e da Argentina, e o nono maior produtor do mundo, atrás da China, Índia, Japão, Estados Unidos, Rússia, Coreia do Sul, Alemanha e Turquia (Instituto Aço Brasil, 2020).

Neste cenário é que se insere esse estudo, que analisou as perspectivas sobre o uso do carvão vegetal pela indústria siderúrgica no contexto das mudanças climáticas atuais, levando em conta aspectos ambientais, econômicos e sociais, e a possibilidade de produção de ferro-gusa, no Brasil, com menor emissão de gases do efeito estufa, com a utilização da biomassa, carvão vegetal, proveniente de florestas plantadas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Analisar o carvão vegetal como potencial energético aplicado em um setor econômico, considerando os aspectos de produção, impactos sócio ambientais e sustentáveis.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Identificação da energia da biomassa proveniente do carvão vegetal;
- Fazer um estudo da arte sobre a produção e consumo de carvão vegetal no Estado de Minas Gerais;
- Identificar as emissões de gases causadores do efeito estufa quando o carvão vegetal é utilizado comparando ao carvão mineral;
- Analisar o desmatamento de vegetação nativa para o plantio de eucalipto e desvantagens ambientais do cultivo da espécie.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico serão apresentados alguns aspectos gerais do uso de carvão vegetal, sua produção e perspectivas para seu uso no futuro. A revisão bibliográfica foi realizada com o objetivo de relacionar dados existentes na literatura com os dados que serão obtidos nesse estudo. Serão comentados aspectos gerais sobre o carvão vegetal, o uso do eucalipto na produção do carvão vegetal, clima e meio ambiente, novas tecnologias para produção do carvão vegetal e sobre o processo siderúrgico usando o alto-forno a carvão vegetal

#### 3.1.1. Propriedades do carvão vegetal

Um dos combustíveis que utilizado no alto-forno para produção do ferro gusa é o carvão vegetal. O carvão vegetal, de uma maneira geral, é utilizado no Brasil pelas usinas independentes de ferro-gusa. As características do carvão vegetal podem ser vistas na Figura 1.

Figura 1: Propriedades do carvão vegetal

Item	Unidade	Carvão Vegetal
Carbono fixo	%	65 - 75
Materiais voláteis	%	25 - 35
Cinza	%	2 - 5
Enxofre	%	0,03 - 0,10
Composição da cinza		
SiO <sub>2</sub>	%	5 - 10
CaO	%	37 - 56
MgO	%	5 - 7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2 - 12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	6 - 13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	8 - 12
K <sub>2</sub> O	%	15 - 25
Na <sub>2</sub> O	%	2 - 3
Resistência à compressão	kg/cm <sup>2</sup>	10 - 80
Faixa granulométrica	mm	9 - 100
Densidade	kg/m <sup>3</sup>	180 - 350
Reatividade		Maior

Fonte: JACOMINO *et. al.* (2002)

O carvão vegetal tem origem na carbonização da madeira e teor de carbono fixo na faixa de 65% a 75%, enquanto o coque é proveniente do carvão mineral e tem aproximadamente 88% de carbono fixo. Outra diferença a se considerar é o teor de material volátil, que para o carvão vegetal é de 25% a 35%. O teor de cinzas é de 2% a 5% para o carvão vegetal (JACOMINO *et al.*, 2002).

Devido a sua baixa resistência mecânica, a utilização do carvão vegetal em alto-forno de grande porte é considerada, nos dias de hoje, inviável, devido a grande produção de finos que dificulta a percolação de gases no alto-forno. Os altos-fornos a carvão vegetal produzem até 1.200 toneladas por dia (JACOMINO *et al.*, 2002).

### 3.1.2. Carvão vegetal aplicado à siderurgia

O carvão vegetal é um combustível de biomassa obtido a partir da queima parcial da madeira em ausência de ar. Como já dito anteriormente, o Brasil é o maior produtor de ferro gusa oriundo de altos-fornos a carvão vegetal do mundo, onde a produção é realizada por mini altos-fornos. Esta tecnologia verde é possibilitada devido a grande extensão de terras em áreas tropicais no Brasil (FERREIRA, CASTRO & SILVA, 2010).

O carvão vegetal, mostrado na Figura 2, pode ser considerado como vetor energético de uso amplo, tanto que após o primeiro choque de preço do petróleo (1973) foi estimulada, pelo governo federal brasileiro, a substituição do óleo combustível por carvão em vários setores da produção industrial, cabendo ao carvão vegetal uma participação expressiva nesse esforço (PATUSCO *et al.*, 2006).

Figura 2: Carvão Vegetal Granulado



Fonte: ASSIS, (2008)

A produção de carvão vegetal no Brasil é destinada ao atendimento da demanda de diversos segmentos da indústria (siderurgia, metalurgia, cimento, etc.), bem como para utilização residencial urbana e rural. A principal utilização, no entanto, se faz ver na indústria de siderurgia por favorecer a produção de ferro-gusa com teores muito baixos de enxofre, fósforo e outros elementos indesejáveis. Esta indústria consome cerca de 90% de carvão produzido no Brasil, com o setor de ferro gusa e aço detendo quase 85% do consumo de carvão (PATUSCO *et al.*, 2006).

A indústria siderúrgica iniciou-se no Brasil no século 19 e até quase meados do século 20, o carvão vegetal foi a exclusiva fonte termorreduzora de seus altos fornos. Somente com

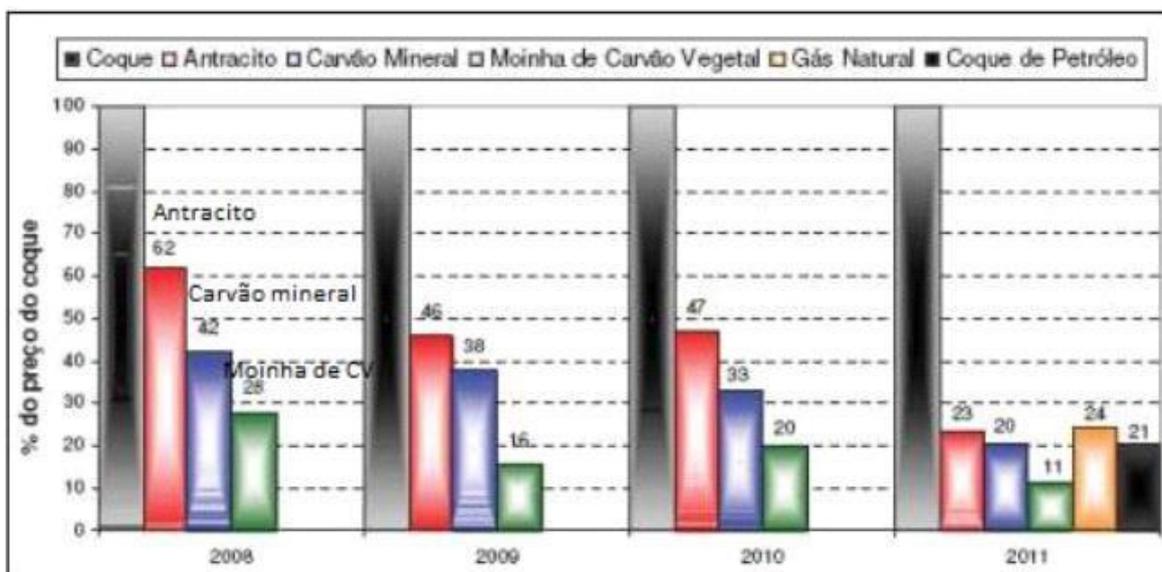
o advento da operação das usinas siderúrgicas de grande porte, como a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), 1946, Cosipa e Usiminas (anos 1960), Açominas e Tubarão (anos 1980), passou-se a utilizar o coque, produzido, principalmente, a partir do carvão mineral importado, tendo em vista as exigências tecnológicas, em função da escala dos novos altos fornos (CGEE, 2015). Atualmente, o cenário de dependência total de carvões importados por parte da siderurgia brasileira pode ser alterado. Em termos da demanda de carvões, tem-se observado o incremento da taxa de injeção de finos de carvão minerais não-coqueificáveis nos altosforos. No que tange à oferta doméstica de carvões, estudos relativos ao carvão mineral da Região Sul têm mostrado sua viabilidade para o processo de injeção pelas ventaneiras, visto que para a produção de coque, há a necessidade de obtenção de coque do mercado externo, devido a qualidade do carvão mineral existente no Brasil (CGEE, 2010).

A produção de carvão vegetal, porém, tem uma grande desvantagem: o alto índice de geração de finos, a chamada moinha. A alta friabilidade deste tipo de carvão possibilita a geração de até 25% de moinha de carvão vegetal (OLIVEIRA, GOMES & ALMEIDA, 1982).

Os finos de carvão vegetal, por estarem abaixo da granulometria estabelecida para os pequenos altos-fornos a carvão vegetal, não são carregados pelo topo, sendo empregados para injeção em suas ventaneiras. A Injeção de Carvão Pulverizado (ICP), se apresenta como uma excelente alternativa tecnológica para aproveitamento desses finos de carvão vegetal (BARBIERI, 2013).

Quanto à questão econômica, os redutores carregados pelo topo do alto-forno apresentam um custo maior do que os combustíveis auxiliares injetados pelas ventaneiras, conforme é possível visualizar na Figura 3, o que torna ainda mais vantajosa a utilização da moinha de carvão vegetal.

Figura 3: Preços de combustíveis utilizados para injeção



Fonte: BARBIERI, (2013).

No Brasil, o setor de produção de carvão vegetal teve seu marco inicial em meados do século XVIII no Estado de Minas Gerais. O crescimento e o domínio desse insumo levaram nosso país a liderar o ranking mundial na produção e uso do carvão vegetal no setor industrial. Parte desse resultado é devida à grande disponibilidade do minério de ferro no Estado, à excelente capacidade nacional de geração de biomassa florestal e às características inadequadas do carvão mineral nacional (AMS, 2013).

A produção de carvão vegetal se destaca em razão da grande demanda gerada pelo setor siderúrgico e com isso o Estado de Minas Gerais se sobressai como o principal produtor e consumidor desse insumo, dispondo do maior parque siderúrgico a carvão vegetal do mundo (SANTOS et al., 2012).

### 3.1.3. A biomassa aplicada à siderurgia

A biomassa tem desempenhado um importante papel no suprimento energético nacional. O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 64,9% da oferta interna. As fontes renováveis representam 83,0% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável. A indústria registrou uma redução em 2019 no consumo eletricidade de 2,44% em relação ao ano anterior, com destaque para siderurgia cujo decréscimo da produção física de 8,7%, provocando a retração do consumo de eletricidade nos segmentos de ferro-ligas, aço e pelotas (BEN, 2020).

De acordo com Masuda (1980) a avaliação do potencial brasileiro de carvão vegetal, tendo em vista a utilização de vegetação nativa, se torna bastante complicada pelo fato de que vários aspectos devem ser considerados. Primeiramente, a exploração não deve conduzir à exaustão das formações vegetais, como tem sido até o momento. Técnicas modernas de exploração sustentável deveriam ser utilizadas, apesar de o Brasil não ter experiência neste sistema de produção, que se baseia na capacidade de regeneração da mata. Segundo, nem todas as formações vegetais são passíveis de exploração, como, por exemplo, matas de reservas ambientais. A grande preocupação, então, deve estar relacionada à expansão de florestas plantadas, de espécies de rápido crescimento, que no Brasil tem potencial ilimitado.

Masuda (1980) ainda afirma que a floresta plantada é a forma ideal de suprir a demanda energética futura e preservar as nossas reservas naturais necessárias ao equilíbrio ecológico. Outras fontes de madeira legal para a produção de carvão vegetal são as sobras de serraria e desmatamento legalizado visando a expansão da fronteira agrícola.

Para a conversão da biomassa em energia, a combustão direta é o processo tradicional utilizado. São utilizadas também os processos de hidrólise, pirólise e digestão anaeróbica. Na hidrólise a madeira é convertida em combustível líquido em um digestor, onde os carboidratos (celulose) são hidrolisados em açúcares pela solução ácida, que após a ação das leveduras, se transformam em álcool e CO<sub>2</sub>. Na pirólise ocorre a destilação por aquecimento da matéria orgânica a altas temperaturas e com controle da atmosfera de oxigênio. Na digestão anaeróbica, a matéria orgânica é convertida, pela ação das bactérias, em metano e CO<sub>2</sub>, na ausência de ar (MASUDA, 1980).

### **3.2.O uso do eucalipto na produção do carvão vegetal**

A principal matéria-prima para a fabricação do carvão vegetal é a madeira (lenha). Esta pode ser dividida em dois grupos principais, o grupo de madeira nativa e madeira de reflorestamento:

- Madeira nativa - provém do desmatamento das florestas do Brasil. Sendo suas espécies variadas de acordo com a região;
- Madeira de reflorestamento – provém do plantio de espécies para este fim. O eucalipto é o mais utilizado devido as suas propriedades químicas, físicas e econômicas (ASSIS, 2008)

De acordo com Assis (2008), a madeira quando submetida a altas temperaturas, passa por um processo que transforma os seus componentes. Existem dois tipos de processo de transformação da madeira pelo calor: a pirólise e a carbonização. A pirólise é todo processo de destilação, sem a presença de oxigênio. Se houver uma quantidade de oxigênio suficiente para

transformar toda a madeira em vapor e gases, restará como resíduo os óxidos minerais ou cinzas (ex: fogueira ao ar livre, com queima total da madeira). Já a carbonização é o método utilizado no sistema descontínuo (convencional), em que o oxigênio é controlado, libera água, líquidos orgânicos e gases não condensáveis. O resíduo desse processo é carvão vegetal.

O processo pode, além de produzir o carvão, processar os voláteis para a obtenção de produtos químicos. Além disso, é possível utilizar os voláteis na produção de combustíveis ou, na produção de energia elétrica (MASUDA, 1980).

O processo de carbonização ocorre em temperaturas acima de 280°C. Nesse processo a madeira pode ter seu comportamento representado pelo somatório do comportamento isolado dos seus três principais componentes que são a celulose, hemicelulose e lignina. A interação desses componentes quando estão juntos são considerados desprezíveis, o estudo realizado separadamente desses componentes pode caracterizar bem o fenômeno como um todo (BRAGA, 1992).

O eucalipto pertence à família das mirtáceas e é originário da Oceania. As espécies pertencentes a essa família são plantas lenhosas, arbustivas ou arbóreas, com folhas de disposições alternadas ou opostas e às vezes cruzadas (SCARPINELLA, 2002).

No Brasil, o gênero *Eucalyptus* foi introduzido em 1825 como espécie ornamental e como quebra-vento. Para finalidades econômicas seu uso iniciou-se em 1903, quando eram necessários dormentes para atender ao desenvolvimento das estradas de ferro através da CPEF (Companhia Paulista de Estradas de Ferro). Atualmente, existem mais de 700 espécies de eucalipto catalogadas, sendo *Eucalyptus saligna*, *E. grandis* e *E. urophila* (e seu híbrido, o *E. urograndis*) as mais cultivadas no país (ELDRIDGE *et al.*, 1993).

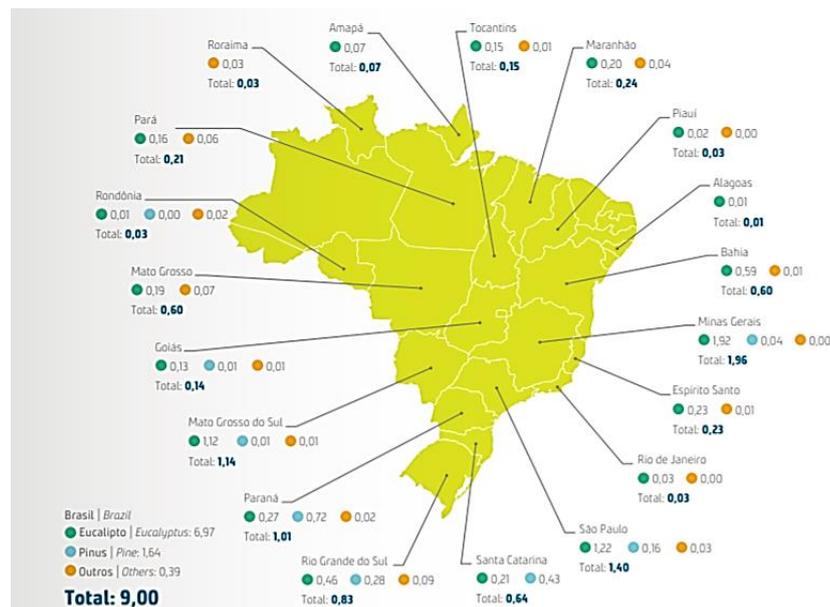
As condições climáticas favoráveis ao plantio de ciclo reduzido e o desenvolvimento de tecnologias que geram alta produtividade por hectare possibilitam que o cultivo de eucalipto no Brasil seja altamente competitivo em escala global (ABRAF, 2007).

O produto final é fator determinante do ciclo da cultura do eucalipto. Como a madeira do eucalipto é utilizada em várias finalidades o tempo de cultivo é um fator muito importante a ser levado em conta nessa cultura. O ciclo curto é utilizado para a celulose, papel, carvão, lenha, paletas e caixotaria, o tamanho desse ciclo é de 7 a 10 anos após o plantio. Nesse caso, a área é reaproveitada, permitindo-se mais de dois ciclos seguintes, ou seja, mais duas rebrotas até que se faça a reforma da área. Já o ciclo longo é o utilizado pelo setor moveleiro, construção cívica e outros fins que exijam um diâmetro da tora maior. Neste ciclo, a madeira pode ser colhida a partir dos 14 anos até os 25 anos, tendo-se uma variação no tempo de cultivo

atrelada à finalidade do produto, ao sistema de cultivo, espaçamento e adubação, entre outros fatores (SCARPINELLA, 2002).

Os plantios de eucalipto ocupam 6,97 milhões de hectares da área de árvores plantadas do País e estão localizados, principalmente, em Minas Gerais, em São Paulo e no Mato Grosso do Sul. Na Figura 4 está ilustrado a distribuição dessas áreas plantadas no país (ABRAF, 2020).

Figura 4: Área e distribuição de florestas plantadas no Brasil em 2019



Fonte ABRAF (2020).

No Brasil, o gênero *Eucalyptus* teve sua utilização com finalidade econômica iniciada em 1903 para utilização em estradas de ferro, produção de lenha e carvão. Navarro de Andrade foi um dos primeiros engenheiros a observar as vantagens do eucalipto em comparação a várias outras espécies, especialmente em relação à produtividade. A partir de 1940, foram estabelecidas plantações em regiões de minério de ferro como alternativa energética para substituir o coque no processo de produção do ferro-gusa. O crescimento das plantações se deu com a Lei dos Incentivos Fiscais em 1967, juntamente com a crise do petróleo. Com o fim dos incentivos, as plantações voltaram a decrescer. Hoje, o mercado de carbono demonstra ser uma nova fonte de receita e incentivo para as futuras ampliações das plantações florestais (SCARPINELLA, 2002).

### 3.2.1. As plantações de eucalipto e o meio ambiente

Segundo o SINDIFER (2008), as plantações de eucalipto têm sido alvo de restrições, polêmicas e preconceitos, quase sempre resultantes da desinformação científica. Essa

conceituação negativa acaba desestimulando pequenos e médios produtores rurais a praticar o cultivo de eucalipto e contribui para criar a ideia de que a espécie causa degradação ambiental.

Durante a expansão florestal promovida pelo Programa de Incentivos Fiscais, a partir 1967, não foram considerados aspectos ambientais, resultando em algumas experiências negativas elevando muitos produtores e ambientalistas a condenarem a prática da monocultura de eucalipto (COUTO *et al.*, 2001).

Xico Grazino no editorial do Jornal SIF - Sociedade de Investigações Florestais da Universidade Federal de Viçosa (2008), comenta que “*Inventaram que a árvore trabalha para o mal. No passado amargou a triste fama de secar o solo onde vivia. Agora, imputaram-lhe a sina de causador da miséria.*”

A Associação Mineira de Silvicultura (AMS), (2004), afirma que, as plantações florestais possuem políticas ambientais avançadas e adequadas aos padrões da lei, além de possuir a capacidade de sequestrar carbono da atmosfera durante o crescimento da floresta. As florestas brasileiras de eucalipto fixam 9,2 toneladas de carbono/hectare/ano, enquanto nos Estados Unidos fixam 3,5 toneladas e na Suécia 1,5 toneladas. Cada tonelada de ferro-gusa produzido com carvão vegetal captura 890 kg de gás carbônico e deixa na atmosfera um saldo de 203 kg de oxigênio.

Pesquisas comprovam que o eucalipto não apresenta comportamento ambiental diferente de outras espécies arbóreas (AMS, 2004). Estudos demonstram que a maior concentração de nutrientes encontra-se nas folhas, galhos e manta orgânica. Após a colheita da madeira (atualmente feita sem a movimentação intensiva da terra e posterior queima da matéria orgânica), essas partes permanecem no campo, enriquecendo o solo em matéria orgânica e nutrientes minerais.

No cultivo de eucalipto os nutrientes (fósforo, potássio, cálcio e nitrogênio) do solo podem ser devolvidos em até 30% se as cascas, folhas, galhos e raízes se forem deixadas no local na hora da colheita. Se comparado a culturas como cana de açúcar, feijão, milho a floresta de eucalipto apresenta superioridade em termos de eficiência no uso de água, nutrientes e em relação à biodiversidade. A forma como é realizado o plantio desta cultura, permite a criação de corredores ecológicos interligando fragmentos de matas nativas. O cultivo de eucalipto ainda corrobora para o sequestro de carbono (VITAL; PINTO; 2009).

Em Portugal, inúmeras áreas cultivadas com eucalipto por períodos entre 30 e 50 anos foram convertidas em vinhedo com excelentes resultados (CAF, 2007). O solo fica muito mais empobrecido com plantio de culturas de ciclo curto, como soja, café e milho. O eucalipto não

empobrece o solo mais que as lavouras e pastagens, pelo contrário, são os sistemas que mais se aproximam das florestas nativas (SINDIFER, 2008).

Outra concepção equivocada, segundo a AMS (2004), diz respeito ao consumo excessivo de água pelo eucalipto. Estudos desenvolvidos na Universidade de São Paulo indicam que o consumo total de água da espécie situa-se dentro da faixa de consumo das árvores nativas e muito inferior às culturas agropecuárias. Com 1 litro de água, o *Eucalyptus grandis* é capaz de produzir 2,9 gramas de madeira, sendo que uma espécie do cerrado produz apenas 0,4 gramas. Outra teoria explica que, em muitos casos, as plantações de eucalipto são feitas em áreas anteriormente utilizadas para pastagem, que com a retirada da vegetação tiveram o lençol freático rebaixado e o posterior ressecamento da terra. O reflorestamento com espécies de eucalipto, como toda cobertura florestal, tem ação benéfica sobre o solo, oferecendo proteção contra erosão e melhorando as condições de infiltração de água para lençol subterrâneo (AMS, 2004).

Já se acusou o eucalipto de produzir substâncias inibidoras da germinação e do crescimento de outras espécies. Algumas espécies possuem substâncias alelopáticas, tais como, *E. camaldulensis*, *E. globulus*, *E. rostrata*, *E. pilularis*, *E. microteca* e *E. hybrid*. Nenhuma destas espécies está entre as mais cultivadas no Brasil. Culturas de aveia, trigo, fumo, cevada também apresentam o efeito alelopático (Scapinella, 2002). Além da alelopatia, a inibição pode ocorrer em plantios densos, que não permitem a penetração da luz solar. Plantios tecnicamente corretos registraram a presença de um intenso sub-bosque nas florestas de eucalipto, especialmente de capim, permitindo, a criação consorciada de gado. Outro aspecto polêmico relacionado à cultura do eucalipto é a redução da biodiversidade promovida pela implantação de uma monocultura. Uma monocultura realmente provoca alterações na flora e na fauna, reduzindo a biodiversidade (Scapinella, 2002). Se cuidados forem tomados, os efeitos negativos podem ser evitados e a fauna remanescente pode conviver de forma harmônica, adaptando-se ao novo habitat.

A produção de madeira significa proteção da floresta nativa. Segundo a AMS (2004), cada hectare de eucalipto plantado permite a preservação de até cinco hectares de cerrado. Segundo a Assembleia Legislativa de Minas Gerais *apud* AMS (2007), o plantio de eucalipto em área degradada representa: “*Um fator de recomposição do solo e melhoria da permeabilidade, criação de ambiente ameno para instalação de outras espécies, além de outros benefícios como geração de emprego e renda*”.

As empresas, com o intuito de atestar a origem e características de produtos florestais, têm procurado a certificação florestal. A certificação é o reconhecimento e garantia junto aos

clientes e à sociedade de que o produto tem origem em florestas manejadas, com base sustentável quanto aos aspectos ambientais, sociais e econômicos. No Brasil existem atualmente dois sistemas de certificação florestal em operação: Forest Stewardship Council - FSC e o Certificado nacional de Qualidade ambiental de Florestas (CERFLOR). (DE MORAES, 2008).

### **3.2.2. Aspectos econômicos e eficiência da produção do carvão vegetal**

Segundo o AMS (2004), os grandes projetos florestais promovem o aumento na receita municipal, melhoria na infraestrutura rural (construção, manutenção de estradas e melhoria do 20 sistema de comunicação) e o favorecimento da dinâmica da economia regional. A AMS também afirma que o setor florestal possui uma grande capacidade de gerar e multiplicar postos de trabalho. Nas regiões onde as atividades do setor de base florestal estão presentes, o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), teve crescimento superior à média estadual. O setor de florestas desenvolve importantes ações de responsabilidade social e de proteção ambiental. As empresas associadas à AMS têm promovido desenvolvimento e crescimento nas comunidades locais, com a expansão do emprego formal, assistência médica, apoio educacional e lazer.

O carvão vegetal é uma fonte renovável de energia, porém parte da produção de carvão vegetal ainda ocorre em fornos modestos, que apresentam baixo rendimento gravimétrico ocasionando perda econômica e uma maior área plantada para atender a demanda, ou seja, a produção é realizada de forma artesanal. Na produção artesanal, o controle durante o processo de carbonização é baseado em aspectos subjetivos, como a cor da fumaça. Os trabalhadores ficam expostos por longos períodos à emissão de gases tóxicos e altas temperaturas, e muitas vezes não há recuperação de subprodutos provenientes da carbonização (CARNEIRO *et al.*, 2012). Entretanto, alguns sistemas e adaptações podem ser adotados para aprimorar aspectos ambientais, econômicos e proporcionar melhores condições de trabalho na produção de carvão vegetal.

Taccini (2010) relata a geração de gases não condensáveis durante o processo de carbonização da madeira, como CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. No caso da queima completa destes gases, ocorreria somente a liberação de CO<sub>2</sub> e vapor de água. De acordo com OLIVEIRA (2012), visando reduzir a emissão dos gases poluentes para a atmosfera, tem-se feito a combustão destes através de fornalhas acopladas aos fornos de carvão vegetal. OLIVEIRA *et al.* (2014), descreve que a fornalha tem o objetivo de incinerar os gases gerados durante o processo de carbonização, transformando a poluição em energia na forma de calor.

Conforme Dias *et al.* (2002), faz-se necessário a introdução de processos mais limpos,

que visem além de aumentar o rendimento do carvão, possibilitar o reaproveitamento de subprodutos, diminuindo a emissão de poluentes e agregando valor ao processo.

No Brasil, cerca de 80% da produção é proveniente de pequenos e médios produtores. Os fornos com fonte interna de calor, construídos de alvenaria, com baixo rendimento e que não possuem controle da temperatura de carbonização e das emissões atmosféricas são grande maioria (CARNEIRO *et al.*, 2011). Os processos industriais para produção de carvão vegetal apresentam um processo mais estruturado, controlado e com melhor rendimento gravimétrico que os processos artesanais. A seguir serão apresentados tipos de fornos utilizados na produção de carvão vegetal, para processos industriais e artesanais. Dentre os modelos mais utilizados na produção de carvão vegetal, estão os fornos de encosta e “rabo quente”. Há modelos mais modernos, como os fornos retangulares, e o processo DPC (Drying Pyrolysis Cooling).

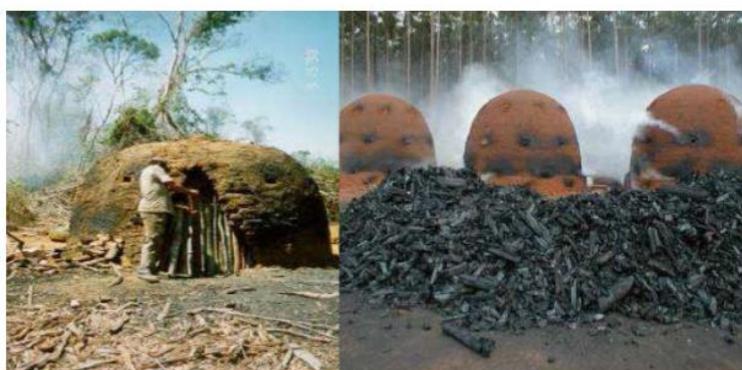
**Forno Rabo quente:** É um tipo de forno de carbonização bastante utilizado na produção artesanal, e se destaca pelo seu baixo custo de construção e pela sua simplicidade. Geralmente é construído em locais planos que não necessitam de muito preparo do terreno. É um forno que na maioria das vezes se encontra em conjunto com outros fornos semelhantes. Os principais materiais utilizados para a construção do Forno Rabo Quente são tijolos de barro “cozido” e argamassa de barro e areia. A argamassa destinada à construção do forno é um combinado de terra, areia e água em quantidades adequadas para que o barro formado seja de fácil manuseio. A mistura de areia utilizada tem como intuito a redução de trincas que surgem durante as carbonizações (CETEC, 1982).

O carregamento do forno, para que a carbonização tenha um melhor rendimento, deve ser feita com madeira seca, pois o teor de umidade da lenha tem grande influência na eficiência do forno. O tamanho da lenha também é um parâmetro de grande importância, pois toras de lenha de grande diâmetro e grande comprimento retardam a carbonização, gerando maior quantidade de tiços (carbonização parcial). O arranjo da madeira no interior do forno também é um parâmetro importante, uma vez que ele também tem relevante influência no rendimento gravimétrico do forno. A madeira de menor espessura deve ser colocada nos espaços entre os toletes de maior espessura, a primeira camada de madeira deve ser colocada na vertical, enquanto a segunda camada de lenha deve ser colocada na horizontal. Deve-se evitar que haja espaços vazios no interior do forno, pois além de não permitirem o aproveitamento adequado do volume do forno, tais espaços prejudicam o processo de carbonização, dessa forma afetando negativamente o rendimento gravimétrico do processo. O acendimento do forno é feito em um orifício deixado na parte superior, colocando-se algum material que se inflame

facilmente, por exemplo, folhas secas e galhos. O controle do forno é feito empiricamente, através da cor da fumaça que sai durante o processo. É analisada cada fase em que a carbonização se encontra, a fumaça de cor esbranquiçada significa o início da carbonização, enquanto que a fumaça de cor azulada significa que a carbonização está em seu ápice (CETEC,1982).

Após a carbonização, que nos Fornos Rabo Quente leva um longo tempo, parte-se para o resfriamento do forno, etapa importante, pois a caso a carga seja retirada do forno a altas temperaturas visto que a entrada de ar pode causar a ignição e conseqüente incêndio do carvão. A temperatura ideal para que se proceda a descarga do forno, com segurança, é de 60°C (CETEC,1982). Na Figura 5 está apresentado um forno de rabo quente.

Figura 5: Fornos tipo “Rabo Quente” de superfície.



Fonte: COLOMBO; PIMENTA; HATAKEYAMA, (2000).

**Forno de encosta:** O Forno de Encosta, Figura 6, pode ser entendido como uma adaptação do Forno Rabo Quente, sendo que a principal diferença entre o Forno de Encosta e o Forno Rabo Quente é o uso do desnível natural de terrenos acidentados para sua construção. Este tipo de forno é bastante utilizado para a produção artesanal de carvão vegetal. Para construí-los corta-se o barranco em forma circular e apóia-se a copa do forno sobre a borda do terreno, dessa forma a borda do terreno funciona como a parede do forno (CETEC, 1982).

Quanto às características de operação, acendimento do forno, controle da carbonização e qualidade do carvão produzido, o Forno de Encosta se assemelha ao Forno Rabo Quente. O acendimento do Forno de Encosta também é feito pela parte superior do forno. As fumaças, após o fechamento do buraco de acendimento, começam a deixar o forno através das “baianas” e estas são fechadas ao passo que as fumaças adquirem cor azulada. O controle da carbonização é feito considerando-se a quantidade e cor das fumaças que saem pelas chaminés, além disto, também pode ser monitorado pela temperatura das paredes do forno. No momento em que a fumaça se apresenta pouco densa e com a coloração azulada em alguma chaminé, fecham-se todas as entradas de ar, pois está é a maneira de se determinar que a frente

de carbonização já esta distribuída homoganeamente pelo forno. Posteriormente à carbonização parte-se para o resfriamento do forno, quando a temperatura alcança 60°C pode-se executar a descarga do forno, os cuidados a serem tomados são semelhantes àqueles do Forno Rabo Quente (CETEC, 1982). Na Figura 6 está apresentado o forno de encosta:

Figura 6: Forno tipo Encosta.



Fonte: PINHEIRO, (2009).

**Forno de superfície:** Os fornos de superfície, como ilustrado na Figura 7, são muito utilizados pelos grandes produtores de carvão vegetal no Brasil para a produção de carvão destinada, principalmente, às indústrias siderúrgicas (produção industrial). Os fornos de superfície apresentam dimensões de 3m a 8m de diâmetro na base, sendo o diâmetro de 5m o mais comum, altura variando entre 2,3m e 5m e volume efetivo entre 5 e 200 toneladas de madeira (ASSIS, 2007).

Figura 7: Forno de superfície.



Fonte: AMODEI, (2008).

O forno de superfície vem sofrendo alterações para sua melhoria ao longo do tempo,

por exemplo, passou de 6 chaminés para 1 única chaminé central ou lateral. Seu ciclo médio de produção é de 8 a 10 dias (DE OLIVEIRA, 2009).

A fase de carbonização em fornos de superfície consiste em carregar os fornos com madeira seca e fechar o forno, deixando uma abertura na parte superior para que seja realizada a ignição e alguns outros orifícios no chão para que aconteça a entrada de ar (DE MOURA, 2010).

A ignição é realizada pelo orifício da cúpula com tocos secos, a entrada de ar pelos orifícios da base é controlada aumentando-se ou diminuindo-se o seu tamanho, dessa forma o processo de carbonização se processa lentamente sem que o ar que está entrando seja suficiente para queimar o carvão já formado (DE MOURA, 2010).

Após o período de carbonização procede-se ao resfriamento do forno para que a carga possa ser retirada sem que haja riscos de ignição da mesma.

**Fornos retangulares Missouri (Vallourec & Mannesman):** Raad (2000) *apud* Barcellos (2002) define os Fornos retangulares da Vallourec & Mannesman, como apresentado na Figura 8 como: fornos de grande capacidade volumétrica, construídos de modo a permitir carga e descarga mecanizada. Uma de suas características é a cinética de carbonização não uniforme dentro do forno, fato que se deve ao grande tamanho do forno. O monitoramento da carbonização de tais fornos é feita por meio da leitura da temperatura em vários pontos, através de um aparelho de infravermelho. Apresentam sistema de recuperação de alcatrão e o tempo necessário para o processamento da madeira é de 12 a 15 dias (BARCELOS, 2002). Estes fornos são utilizados para produção em escala industrial. A Figura 8 mostra o forno Missouri, utilizado na Vallourec & Mannesmann Tubes.

Figura 8: Fornos Missouri – Vallourec & Mannesmann Tubes



Fonte: FERREIRA, (2000).

Carneiro *et al.*, (2011), relata que esses fornos possuem grande capacidade volumétrica, há no mercado forno retangular que pode chegar até 700 st de madeira de enforamento, alcançando uma produção média em carvão de 350 mdc. Os rendimentos

gravimétricos em carvão vegetal apresentados por estes fornos chegam entre 30% e 35%, em média.

Os fornos FR 190 e RAC 700, se equipados com as devidas tecnologias para controle da temperatura e ou softwares de gerenciamento do processo de carbonização, promovem rendimentos na conversão de madeira em carvão, que pode saltar de 26% para 32 a 35% de rendimento gravimétrico. Assim sendo, anualmente estes fornos individualmente podem produzir aproximadamente de 750 até 2000 toneladas de carvão vegetal (CGEE, 2015). A viabilidade econômica da construção destes fornos é associada à unidade de produção de carvão vegetal, nesta deve haver ao menos a produtividade de 500 m<sup>3</sup>/mês de carvão vegetal. A construção destes fornos é aproximadamente R\$ 200.000,000/forno (BRITO, 2010).

**Processo DPC (Drying Pyrolysis Cooling):** O processo DPC (processo para produção de carvão vegetal em escala industrial) se baseia em alguns fundamentos básicos, que são os seguintes:

- Uso dos gases (condensáveis e não condensáveis) emitidos durante o processo de carbonização como fonte de energia que é requerida pelo processo de carbonização.
- Uso dos gases emitidos pela madeira que está sendo carbonizada como um fluido que auxilia na transferência de calor, enquanto ocorre a fase endotérmica da carbonização.
- A secagem da madeira, carbonização e o resfriamento do carvão vegetal produzido ocorrem concomitantemente em no mínimo três reatores, como mostra a Figura 10 (LÚCIO, 2006).

Os gases gerados durante a carbonização apresentam um poder calorífico significativo e são queimados em uma câmara de combustão, produzindo dessa forma gases quentes. Esses gases quentes são utilizados no reator de secagem da madeira (LÚCIO, 2006).

A madeira utilizada como matéria-prima no processo DPC pode ser colocada no interior do reator com qualquer comprimento, assim se adequando às características das florestas plantadas para tal finalidade (LÚCIO, 2006).

A principal peculiaridade do processo DPC está no uso dos gases produzidos durante a carbonização da madeira como fonte energética. Como não se consome parte da carga para sustentar energeticamente o forno, há um aumento do rendimento gravimétrico do processo (LÚCIO, 2006).

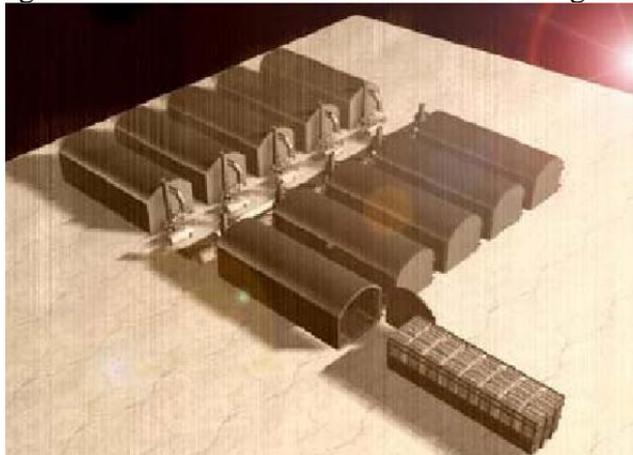
Os métodos atualmente usados para a carbonização da madeira requerem madeira com um teor máximo de 30% de umidade. Os gases gerados durante o processo DPC são capazes de secar madeira com até 50% de umidade, valor que representa o teor máximo de umidade

que a mesma pode conter após o corte, portanto no processo DPC não existe limitação quanto ao teor de umidade contido na madeira (LÚCIO, 2006).

As etapas de secagem, pirólise e resfriamento podem ser realizadas em qualquer reator. Podese utilizar mais de três reatores, dependendo da capacidade final desejada.

A Figura 9 mostra os conceitos do processo DPC aplicados a 10 reatores (LÚCIO, 2006).

Figura 9: Planta DPC com 10 reatores interligados.



Fonte: LÚCIO, (2006).

O processo DPC apresenta importantes vantagens em relação a outros processos de carbonização, dentre as quais pode-se citar:

- Não há emissão de gases nocivos a atmosfera, pois os mesmos são queimados;
- A madeira utilizada pode ser cortada em qualquer comprimento;
- Não é preciso armazenar a madeira para sua secagem;
- Rendimento gravimétrico mais elevado que em outros processos de carbonização;
- Controle adequado do processo de carbonização, o que facilita obter carvão vegetal de acordo com as especificações do consumidor;
- Processo de alta produtividade, o tempo de residência da madeira, recentemente cortada, é de aproximadamente 60 horas;
- O custo de investimento expresso, em reais por tonelada de carvão vegetal, é inferior ao dos processos de retorta (LÚCIO, 2006).

Em um âmbito econômico e de eficiência, é importante destacar as perdas no processo de produção do carvão vegetal. Os finos de carvão vegetal, por exemplo, são um coproduto indesejado da produção do aço e que é originado da degradação do carvão vegetal ao longo do processo até o abastecimento dos alto-fornos. A cada 100 toneladas de carvão vegetal

produzido, são geradas cerca de 25 a 30 toneladas de finos, o que representa uma grande perda econômica com impactos no meio ambiente. Os finos são produzidos durante a produção, manuseio e o transporte do carvão vegetal, onde o produto sofre degradações físicas que geram essas partículas finas, que representam perdas para o processo. Os finos são revendidos como um resíduo de menor valor agregado (SILVA, 2017).

Em relação à friabilidade do carvão vegetal, no trabalho de Oliveira, (1977), são citados que nas etapas do processo de fabricação do carvão vegetal (produção nas carvoarias, carregamento e transporte, estocagem e peneiramento) até sua utilização, são gerados os finos de carvão vegetal. O montante de finos produzidos em todo o processo é da ordem de 25%, distribuídos da seguinte forma: nas carvoarias 3,7%, no carregamento e transporte 5,8%, no armazenamento 6,3%, e no peneiramento 9,4% de perdas.

Uma etapa importante do processo de produção de carvão vegetal, já citada anteriormente e, onde ocorre perdas, é o transporte. O transporte de carvão vegetal nada mais é do que o deslocamento dessa alternativa energética das praças de carvoejamento para os pontos de consumo, podendo ser realizado por diferentes tipos de veículos. E para tanto, deve obedecer a uma legislação que o limita, gerando gargalos e comprometendo sua eficiência (SILVA, 2017).

De acordo com AMS (2010), o transporte de carvão vegetal em caminhões basculantes, gaiolas ou sacaria está longe de ser eficiente, pois dificulta a manipulação e ainda pode ocasionar perda do produto, por tanto recomenda a utilização de containers, modernizando o atual sistema e buscando sustentabilidade.

No trabalho de Silva, (2017), ao se relacionar a densidade do carvão vegetal transportado com os custos de combustível, pode se observar que os maiores gastos foram obtidos com transporte de materiais mais leves. Constatouse um aumento significativo na quantidade de carga transportada na medida em que se trabalha com um material com maior densidade, com um ganho expressivo de 6,22 t por carga transportada. Ao se relacionar a densidade do material transportado com os custos de combustível, pode se observar que os maiores gastos foram obtidos com transporte de materiais mais leves. Ao se analisar os efeitos do tipo de veículo utilizado para transportar o carvão vegetal no custo de frete, constatou-se uma diminuição significativa desse valor à medida que se utiliza uma composição de veículo de carga com maior capacidade de carga útil, gerando um custo de oportunidade de R\$55,33/t.

### **3.2.3. Aspectos sociais da produção do carvão vegetal em carvoarias artesanais**

O complexo industrial florestal integrado para produção de carvão vegetal, certamente,

causará impactos de natureza social. O desenvolvimento e uso dessas tecnologias possibilitam:

Melhoria do padrão de vida do habitante rural; Melhoria na produtividade agrícola e aumento da disponibilidade de alimentos; Redução do consumo de certos recursos naturais, em particular à cobertura vegetal arbórea nativa e Atenuação dos problemas decorrentes da migração para centros urbanos pela melhoria do padrão de vida na área rural (Masuda, 2010).

Por outro lado é importante avaliar as condições de trabalho e saúde dos trabalhadores das carvoarias artesanais, uma vez que o Brasil é o maior produtor de carvão vegetal do mundo, com estimativas de 350.000 trabalhadores envolvidos na produção e transporte deste insumo (KATO *et al.*, 2004).

Ao investigarem as condições de trabalho em carvoarias artesanais de Minas Gerais, pesquisadores (DIAS *et al.*, 2002) descreveram o seguinte:

Todos os sentidos do observador são tocados ao se aproximar de uma carvoaria. Em um local plano, escolhido por exigência do processo em meio à mata, depara-se com a fileira de fornos semelhantes a iglus envolvidos pela fumaça, cujo cheiro forte faz arder os olhos e impregna tudo e todos ao redor. Pilhas de madeira esperam a vez de ir para o forno e montes de carvão, às vezes, ainda fumegantes, pelo ensacamento. Os trabalhadores, geralmente seminus, têm o corpo coberto pela fuligem e deles, muitas vezes, somente se vêem os olhos e os dentes. No sistema de produção familiar, as crianças desde muito cedo, aos quatro, cinco anos, quando começam a andar com mais desenvoltura, acompanham os pais, especialmente as mães, às carvoarias e "brincam" de ajudar a encher o forno. Em torno de seis a sete anos, algumas delas já conhecem todo o processo, e aos 12, 13 anos assumem todas as tarefas, sem distinção de sexo. As mulheres são, geralmente, poupadas de algumas tarefas como o esvaziamento do forno; porém, observaram-se adolescentes do sexo feminino e mulheres jovens desempenhando todas as funções, além de acumularem as responsabilidades pelas tarefas domésticas, caracterizando uma dupla jornada de trabalho (DIAS *et al.*, 2002).

Sobre as condições de trabalho em tais carvoarias, são citados também que:

Nas carvoarias volantes, os trabalhadores moram ou ficam alojados próximos aos fornos, em instalações improvisadas, cobertas por lonas, dormem em catres e não dispõem de condições mínimas de higiene e saneamento básico. Nas situações analisadas, no conjunto das carvoarias visitadas, não existe água potável disponível. Ao longo das observações sistemáticas, das primeiras horas do dia até o almoço, isto é, entre sete e onze horas da manhã, os trabalhadores que estavam abastecendo um forno não ingeriram água, apesar do esforço físico realizado e daintensa sudorese. Questionados a respeito, os trabalhadores responderam que preferem tomar água apenas no período da tarde. Posteriormente, revelaram a crença de que a ingestão de água, nas condições de exposição ao calor, poderia "cozinhar as tripas" ou provocar "constipação". A dieta básica dos trabalhadores era composta basicamente de carboidratos, arroz, feijão e macarrão. Não havia banheiros para higiene pessoal e as condições de moradia eram, sempre, muito precárias. Quanto às exigências cognitivas da operação de abastecimento do forno, observou-se que, na maioria dos casos analisados, os trabalhadores eram analfabetos e a aquisição dos conhecimentos necessários à realização das tarefas obtida empiricamente (DIAS *et al.*, 2002).

Na carbonização controlada de biomassa, a combustão incompleta resulta na formação de substâncias potencialmente tóxicas, tais como monóxido de carbono, amônia e metano, entre outros, sendo que o material fino, contendo partículas menores ou iguais a 10 µm (PM10) (partículas inaláveis), é o poluente que apresenta maior toxicidade e que tem sido mais estudado. Ele é constituído em seu maior percentual (94%) por partículas finas e ultrafinas, ou seja, partículas que atingem as porções mais profundas do sistema respiratório, transpõem a barreira epitelial, atingem o interstício pulmonar e são responsáveis pelo desencadeamento de doenças graves (ARBEX *et al.*, 2004; GODOI *et al.*, 2004).

É importante destacar os dados apresentados por CANÇADO *et al.* (2006) entre outros pesquisadores brasileiros (CENDON *et al.*, 2006; MARTINS *et al.*, 2006), segundo os quais estudos experimentais e observacionais têm apresentado evidências consistentes sobre os efeitos da poluição do ar, especialmente do material particulado fino, na morbidade e mortalidade por doenças cardiovasculares (cardíacas, arteriais e cerebrovasculares) dos trabalhadores das carvoarias artesanais. Tanto efeitos agudos (aumento de internações e de mortes por arritmia, doença isquêmica do miocárdio e cerebral), como crônicos, por exposição em longo prazo (aumento de mortalidade por doenças cerebrovasculares e cardíaca) têm sido relatados. O aumento da poluição do ar tem sido associado ao aumento da viscosidade sanguínea, de marcadores inflamatórios e da progressão da arteriosclerose, a alterações da coagulação, à redução da variabilidade da frequência cardíaca (indicador de risco para arritmia e morte súbita), à vasoconstrição e ao aumento da pressão arterial, todos fatores de risco para doenças cardiovasculares.

Ainda, um abrangente estudo encontrou risco aumentado de mortalidade relacionada à poluição do ar que variou de 8% a 18%, para diversos tipos de doenças cardíacas. Portanto, tais dados levam a inferir-se que a exposição dos trabalhadores de carvoarias a materiais particulados gerados durante a carbonização da madeira, é um fator importante a ser considerado como possível causa do adoecimento de alguns destes trabalhadores. Dentre as substâncias presentes nos materiais particulados finos liberados durante a queima de biomassa (vegetação), os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA's), são os mais danosos à saúde, apresentando atividades mutagênicas, carcinogênicas e como desreguladores do sistema endócrino (GODOI *et al.*, 2004).

Estudos revelaram que a fumaça liberada pelos fornos das carvoarias contém mais de 130 substâncias, sendo 10 delas HPA's genotóxicos, incluindo o benzo-a-pireno (BARBOSA *et al.*, 2006). Por outro lado, pesquisas da área médica revelaram que os trabalhadores expostos à fumaça dos fornos das carvoarias são acometidos por problemas respiratórios e danos à

função pulmonar (KATO *et al.*, 2005; TZANAKIS *et al.*, 2001).

Em um estudo divulgado em 2004, foi relatado que testes realizados com a urina de trabalhadores de carvoarias artesanais, revelou que estes trabalhadores estão sistematicamente expostos a substâncias genotóxicas presentes na fumaça, aumentando significativamente os riscos de adoecimento por câncer, principalmente, de pulmão (KATO *et al.*, 2004).

Diante do exposto, conclui-se que os estudos científicos já divulgados indicam que o processo produtivo artesanal e industrial do carvão vegetal para uso em siderúrgicas, praticado no Brasil atualmente, repercute em riscos à saúde dos trabalhadores, sendo principalmente a produção artesanal causadora de danos a saúde dos trabalhadores, devido a emissão de gases e material particulado sem nenhum tratamento na atmosfera. A presença de trabalho escravo e infantil ocorre por vezes na produção artesanal, sendo extremamente necessário o combate de tais práticas, devido às condições desumanas em que os trabalhadores são submetidos e os impactos sociais causados.

### **3.3. Aspectos ambientais da produção do carvão vegetal**

As atividades de carvoejamento produzem uma série de impactos ambientais, sob o pretexto do crescimento econômico e dos benefícios que trazem à economia local de alguns municípios e regiões. A utilização do carvão vegetal como fonte de combustível marca um contexto da humanidade em que se substituiu a queima direta da madeira pelo potencial energético e calorífico da madeira carbonizada, o próprio carvão vegetal.

A análise da utilização do carvão vegetal como fonte energética deve ser realizada a partir da compreensão de determinados elementos. Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal (UHLIG; GOLDEMBERG; COELHO, 2008). Para obtenção de seu potencial energético é utilizada praticamente a mesma tecnologia do contexto histórico do Brasil colônia.

Conforme o Centro Nacional de Referência em Biomassa - CENBIO, a utilização da madeira para a produção de carvão vegetal é muitas vezes proveniente de floresta nativa, ou então decorrente da desapropriação destas para inserção de cultivos destinados a este fim. O desmatamento desordenado e intenso das florestas propicia a extinção de espécies, a proliferação de pragas, a elevação das temperaturas locais e regionais, aumento dos processos erosivos, empobrecimento do solo, diminuição dos índices pluviométricos e assoreamento de rios e lagos (CENBIO, 2008).

O plantio da espécie do *Eucalipto* causa impactos positivos e negativos em vários aspectos, dependendo do contexto. O *Eucalipto* se adapta a diversas regiões, com diferentes densidades pluviométricas, desde 400 mm a 1200 mm anuais. Em relação aos lençóis freáticos

é preciso observar a profundidade destes, pois as raízes de eucalipto podem atingir, até 2,5 m, podendo alcançar lençóis freáticos de baixa profundidade, sugando-os (VITAL; PINTO; 2009).

Como já citado, 80% da produção de carvão vegetal é oriunda de rudimentares fornos de alvenaria proveniente de pequenos e médios produtores, em que não ocorre controle de gases (CARNEIRO *et al.*, 2011). Durante o processo de produção, de toda a madeira inserida para queima, apenas 30% é convertida em carvão vegetal, o restante da biomassa é emitido para atmosfera, aumentando a concentração de gases poluentes (SENA *et al.*, 2014).

Há a emissão de gases não condensáveis, como metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H<sub>2</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) e outros hidrocarbonetos. A composição total destes é a seguinte: CO<sub>2</sub>, 62%; CO, 34%; CH<sub>4</sub>, 2,43%, H<sub>2</sub>, 0,63% e C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 0,13% (CENBIO, 2008).

Alguns destes gases corroboram para o efeito estufa, como o monóxido e dióxido de carbono, metanos e outros hidrocarbonetos. O efeito estufa é um fenômeno natural e necessário. Mantém a manutenção da temperatura global, sem este a temperatura seria 33°C mais baixa, não permitindo as formas de vida que atualmente existem. Ocorre que a emissão exagerada de alguns gases intensifica o efeito estufa, acarretando no aumento da temperatura global (AMORIM, 2012).

### **3.3.1. O clima e as mudanças climáticas**

O clima é descrito como a síntese das condições climáticas registradas durante um longo período de tempo. O clima está longe de ser estático. As condições climáticas de uma região mudam dia a dia e o clima do planeta modifica em um prazo de anos, décadas, séculos, milênios e a um período correspondente a história geológica da Terra. Vários fatores são responsáveis por estas variações, alguns internos ao sistema climático, outros externos, alguns devido a ocorrências naturais, outros devido às atividades humanas. Alguns dos fatores que podem determinar o clima da Terra são: a radiação incidente do sol; a forma esférica da terra orientada por eixos; o efeito estufa natural criado pelo vapor de água e outros gases; os vários processos físicos, químicos e biológicos que acontecem na atmosfera como, por exemplo, os ciclos biogeoquímicos (ciclo da água, ciclo do carbono, balanço de energia); a rotação da Terra, que modifica a circulação térmica da atmosfera e oceanos; a distribuição dos continentes; além, do resultado da ação dos seres humanos na natureza (BUREAU OF METEOROLOGY, 2003).

Variações naturais, bem documentadas, evidenciam a variação da órbita da Terra e consequentemente variações de incidência de energia solar. A energia de radiação do sol

também é conhecida por variar de tempos em tempos, porém, estas variações são pequenas, em torno de 0,1% a 0,4%. Não há evidências atuais de variações na taxa de rotação da Terra que demonstrem qualquer mudança no clima. Modificações na topografia da terra e do mar, resultantes de processos geológicos, influenciam na distribuição e na absorção da radiação solar, com impedimento físico na recirculação da atmosfera e oceanos. Na falta de todas as influências externas, o clima tem flutuações naturais em períodos de tempo de meses a mil anos. Uma destas variações naturais é conhecida como El Niño (Oscilação do Sul), que ocorre de 3 a 8 anos e envolve o ciclo de aquecimento e resfriamento do trópico central do oceano Pacífico. O extremo oposto do ciclo, quando o Oceano Pacífico central é resfriado mais que o normal, é conhecido como La Niña, e seu impacto é o oposto do El Niño, podendo afetar o clima por décadas (DE NEVERS, 2000).

Principalmente, após a Revolução Industrial, o homem tem exercido grande influência neste processo de modificação do clima do planeta. Com a construção das cidades, uso da terra, aumento da utilização de combustível fóssil, desmatamento, o homem contribuiu com alterações no clima local e globalmente. A poluição sempre foi tratada como um assunto local, antes de serem considerados os problemas em larga escala atualmente observados. Problemas, como chuva ácida em fronteiras internacionais, não podem ser tratados apenas conforme a legislação local. O sistema político tem respondido devagar a este desafio. Iniciou-se a preocupação pelos efeitos a longo prazo dos poluentes que afetam o clima globalmente. Alguns efeitos criados em partes do globo, continuam a mudar na mesma direção, mesmo após a redução do componente responsável pelo efeito (DE NEVERS, 2000).

De Nevers (2000) mostra a contribuição de vários gases do efeito estufa na redução da transparência da atmosfera no período de 1980 a 1990, indicando que o CO<sub>2</sub> contribuiu em mais que a metade (55%), seguido pelo CFC (24%), CH<sub>4</sub> (15%) e N<sub>2</sub>O (6%). Um dos mais importantes gases do efeito estufa, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), também conhecido como gás carbônico, é um gás incolor e inodoro, tendo feito parte da Terra desde que esta tem uma atmosfera. A concentração do dióxido de carbono na atmosfera terrestre em 2005 era de 379 ppm (IPCC, 2007). Esta concentração não tem nenhum efeito nocivo à saúde humana e é totalmente necessária para a fotossíntese.

Por volta de 1750, os homens começaram a queimar combustíveis em quantidades elevadas e a quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera aumentou. O total de CO<sub>2</sub> emitido por queima de combustível pode ser representado pela equação: (Emissão Total de CO<sub>2</sub>) = (População Global) x (Taxa per capita de uso do combustível) x (Emissão de CO<sub>2</sub> por unidade de combustível utilizado). Para a diminuição do total de CO<sub>2</sub> emitido deve-se reduzir algum dos

termos desta equação. A população global está crescendo 1,4% por ano, porém, este valor, tende a diminuir com os anos. A utilização do combustível depende do grau de desenvolvimento do país. Países mais ricos, como Estados Unidos e Japão, possuem um alto consumo per capita, países mais pobres da América Latina e África têm baixos consumos de combustível. À medida que os países pobres se desenvolverem, este consumo global pode aumentar. As pessoas utilizam energia para alimentação, cozinha, iluminação, aquecimento, transporte, processos industriais, refrigeração e comunicação. A medida que aumenta o acesso das pessoas a estes recursos, aumenta o consumo de energia e, conseqüentemente, de combustível (DE NEVERS, 2000)

Outro gás do efeito estufa o metano ( $\text{CH}_4$ ), o principal componente do gás natural, é o segundo em importância em relação a contribuição ao efeito estufa. Na época pré-industrial, a atmosfera continha 0,7 ppm de metano. Nos últimos séculos, este valor aumentou para 1,7 ppm, com um aumento de 0,01 ppm/ano até os anos 90. A molécula de metano é 20 vezes mais forte na absorção do infravermelho do que a molécula de  $\text{CO}_2$ . As principais fontes de metano são provenientes de combustões incompletas, atividades agrárias, mina de carvão e distribuição de gás natural. O óxido de nitrogênio ( $\text{N}_2\text{O}$ ), é outro gás responsável por contribuir para o efeito estufa e que não é conhecido por mais nenhum efeito nocivo à saúde dos seres vivos (DE NEVERS, 2000).

A temperatura média da terra também pode ser alterada pelo aumento do conteúdo de partículas em suspensão na atmosfera, porém, os efeitos são pequenos devido ao curto espaço de tempo que as partículas permanecem na atmosfera comparando com os gases (DE NEVERS, 2000).

### **3.3.2. As emissões de $\text{CO}_2$ e o setor siderúrgico**

Os problemas ambientais causados pela ação humana fez com que o mundo voltasse sua atenção para uma utilização mais racional dos recursos naturais e estratégias fossem propostas para proteger o sistema climático da interferência antrópica perigosa. O Brasil foi o primeiro país a assinar a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do clima e, apesar de não apresentar emissões tão expressivas como os países desenvolvidos, se propôs a combater as mudanças do clima, atestando seu compromisso com o Desenvolvimento Sustentável. Neste contexto foi então sancionado em dezembro de 2009, pelo Presidente da República, a Lei Federal nº 12.187 que instituiu no Brasil a Política Nacional sobre Mudança do Clima e que determinou que o Poder Executivo estabelecesse, em consonância com esta Lei, os Planos Setoriais de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas visando à

consolidação de uma economia de baixo consumo de carbono (PAULA, 2021)

Dos setores industriais, a siderurgia se posiciona como o maior emissor de gases de efeito estufa no Brasil. O Plano Setorial de Redução das Emissões na Siderurgia surgiu em 2010 e traçou um cenário de baixas emissões para a produção de ferro-gusa com carvão vegetal renovável, com metas para 2020, visando não apenas a promover a redução de emissões assumida voluntariamente no âmbito do Acordo de Copenhague, mas, principalmente, à modernização do processo de produção do carvão vegetal necessária para consolidar a sustentabilidade da produção do ferro-gusa a carvão vegetal, visto que a maior parte do insumo ainda é obtido a partir de processos artesanais em fornos de alvenaria, envolvendo trabalho semi-escravizado (quando não em condições de escravização) e muitas vezes, utilizando madeira de matas nativas (AÇO BRASIL, 2010).

O plano de ação foi alicerçado por dois pilares fundamentais: (I) Expansão do estoque de florestas energéticas plantadas; (II) Melhoria da eficiência e da qualidade ambiental do processo de carbonização. Para atingir os objetivos propostos, as ações para indução da melhoria da eficiência e qualidade ambiental do processo de carbonização consistiram na criação da Comissão de Estudo Especial da Produção de Carvão Vegetal, em 2010, cujo objetivo previu elaboração de normas técnicas para o setor estabelecendo critérios de qualidade para o processo, produto e pessoal empregado na atividade. O Plano Setorial de Redução das Emissões na Siderurgia começou a ser esboçado, porém, não foi concluído. Um de seus objetivos previa a expansão do estoque de florestas plantadas com uma parcela adicional de 2 milhões de hectares até 2020. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2018 o Brasil possuía aproximadamente 7,54 milhões de hectares de florestas de eucalipto. Em 2013 esse número era de aproximadamente 6,31 milhões. Logo, objetivo de expansão do estoque com parcela adicional de 2 milhões de hectares não foi alcançado (AÇO BRASIL, 2010).

Segundo o Instituto Aço Brasil, as emissões específicas de CO<sub>2</sub>, que representa a quantidade, em toneladas de CO<sub>2</sub>, emitida por tonelada de aço produzida, passou de 1,7 t CO<sub>2</sub>/t aço bruto em 2009 para 1,9 t CO<sub>2</sub>/t aço bruto em 2017. De acordo com o mesmo órgão, quanto às florestas plantadas, a procedência do carvão vegetal utilizado nas siderúrgicas afiliadas em 2009 era 90% originária de reflorestamentos próprios e de terceiros enquanto em 2017 esse número saltou para 99%. Tais dados contemplam uma produção nacional de aço de aproximadamente 27 milhões de toneladas em 2009 e 34,8 milhões de toneladas em 2017 (AÇO BRASIL, 2019; AÇO BRASIL, 2010).

Segundo os dados apresentados na 4ª Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-

Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), no ano de 2016 as emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da produção de ferro e aço corresponderam a 91% das emissões do setor metalúrgico, sendo a maior parte oriunda da produção de ferro-gusa no alto-forno. Além disso, entre os anos de 2010 e 2016, as emissões da indústria metalúrgica aumentaram 4,2% (AÇO BRASIL, 2017).

Os números apresentados sugerem que, desde a criação da Política Nacional sobre Mudança do Clima não houve avanços significativos que permitam inferir impacto positivo do Plano Siderurgia. Muito pelo contrário, a carência de atualização recorrente de dados com indicadores e resultados da política não contribui para o engajamento do poder público na implementação da política e a ausência de análise de impacto desfavorece a possibilidade de corrigir desvios e alterar as rotas de ação (SPERANZA, *et. al.*, 2017).

#### **3.4. Novas tecnologias para produção de carvão vegetal**

Em função da crise energética e do aquecimento global, faz-se necessário a utilização de novas fontes de energia como uso sustentável da matriz energética disponível. Trabalhos que avaliam a produção de carvão vegetal via micro-ondas vêm sendo desenvolvidos, e esta vem se mostrando uma tecnologia viável e sustentável para a produção do carvão (MORAIS *et al.*, 2015).

O uso de micro-ondas permite aquecimento homogêneo, rápido e eficiente em uma grande faixa de temperatura (até 2.000°C ou mais), e uma maior flexibilidade e liberdade em relação aos processos de aquecimento chamados convencionais. A utilização de aquecimento por micro-ondas data de 1945, quando T.L. Spenser requereu a patente para o aquecimento de comida com radiação de micro-ondas. Em 1952, Spenser recebeu a patente de um sistema de guia de micro-ondas, o qual levou à industrialização das técnicas de aquecimento por micro-ondas. Nos anos 60 e 70, muitas companhias iniciaram o desenvolvimento de equipamentos de micro-ondas e aplicações para o uso industrial, particularmente em produtos alimentícios. Na década de 80 processos em larga escala tornaram-se comercializáveis. Atualmente, micro-ondas são utilizadas no processamento de materiais cerâmicos (supercondutores, isolantes, etc.) ,esterilização de alimentos enlatados e dejetos hospitalares, tratamento de câncer e diagnósticos médicos, cura do concreto. É utilizado na secagem de diversos materiais como madeira, tecidos, géis e alimentos. Na química são utilizados na síntese de substâncias orgânicas, na fusão de boratos alcalinos, extração de solventes para cromatografia de gases ou líquidos, no processamento de polímeros, geração de plasma, além de outras aplicações. Em alguns casos, com micro-ondas, podem ser sintetizados novos materiais e microestruturas que não podem ser produzidas por outras técnicas (PINHEIRO, 2008).

O processo de pirólise da madeira, que foi analisado no estudo de Morais *et al.*,(2015), ocorreu em modo contínuo e em dois estágios, a secagem da biomassa e a pirólise propriamente dita, com a produção de carvão vegetal, gás de pirólise (GNC) e bio-óleo (GC). Para o estudo do potencial energético dos efluentes da pirólise (carbonização) proposto neste estudo, foi utilizado como matéria-prima o *Eucalypto Citriodora*. O sistema (forno) de carbonização utilizado foi construído pela ONDATEC – Tecnologia Industrial em Micro-ondas, empresa situada em Uberaba no Triângulo Mineiro. O forno utilizado é constituído por uma esteira de alimentação de cavacos, uma balança de alimentação, uma cavidade de secagem por micro-ondas, uma cavidade de pirólise por micro-ondas e um silo de armazenamento de carvão, conforme pode ser observado na Figura 10. A biomassa foi enforcada em um processo contínuo.

Figura 10: Sistema de carbonização por micro-ondas.



Fonte: MORAIS *et al.*, (2015).

Considerando a madeira como biomassa para produção do carvão vegetal pela técnica de micro-ondas, torna-se necessário levar em consideração várias características, como sua composição química, elementar e imediata. Além destas, propriedades como densidade básica, teor de umidade, poder calorífico inferior, superior e líquido são de considerável relevância. O teor de minerais afeta negativamente o valor calórico do combustível, sendo, portanto, indesejável. Em relação a sua composição química, a madeira madura é formada por uma mistura de polímeros, constituída basicamente por carboidratos (holocelulose), lignina, extrativos e elementos minerais, em que os teores de lignina e de extrativos são de grande relevância energética (MORAIS *et al.*, 2015).

Sabe-se que nos fornos convencionais mais de 75% da massa seca da madeira enforcada é transformada em gases que são lançados diretamente na atmosfera sem qualquer controle. Desta forma, a mudança de tecnologia para o micro-ondas eliminará a poluição que existe no processo convencional e produzirá energia limpa e renovável (MORAIS *et al.*, 2015).

Essa tecnologia é uma boa alternativa para o melhor aproveitamento da biomassa das florestas destinadas a produção de carvão vegetal. Há no estado de Minas Gerais, bem como no país, um potencial de aproveitamento da energia do processo de produção de carvão vegetal muito grande. As contribuições não serão apenas no âmbito da possibilidade de geração excedente por tonelada de carvão produzido, mas para o meio ambiente e para a qualidade de vida das pessoas envolvidas na sua cadeia produtiva. Essa tecnologia pode contribuir muito para desoneração da cadeia produtiva do ferro-gusa no Brasil, além da possibilidade de geração de co-produtos como o bio-óleo, utilizado para produção de energia (MORAIS *et al.*, 2015).

### **3.5. Processo siderúrgico usando o alto-forno a carvão vegetal**

O alto-forno é o principal equipamento para produção de ferro primário (ferro-gusa) no mundo, responsável por cerca de 58% do aço produzido mundialmente (IBS, 2011). No Brasil, 33,2% do total de ferro-gusa é produzido pelo uso do carvão vegetal como agente redutor (ROMEIRO, 1997; FERRAZ, 2003).

Os altos-fornos são equipamentos utilizados para a produção de ferro-gusa líquido, composta de ferro (92 a 95%), carbono (4% a 4,5%) e outros elementos. A composição química típica pode variar em função do tipo de utilização deste material, matéria prima para a produção de aço carbono ou ferro fundido. Usam-se como matérias-primas uma carga metálica (minério de ferro granulado, pelota e sinter), combustível (coque ou carvão vegetal) e fundentes (calcário, dolomita e quartzo), variando de acordo com o alto-forno e a própria matéria-prima. A redução do óxido de ferro se processa à medida que as matérias-primas descem em contracorrente em relação aos gases, provenientes da queima do carbono com o oxigênio do ar aquecido soprado pelas ventaneiras. Os produtos formados pela interação e reações entre gases e matérias primas são escória, ferro-gusa, gases, poeira e lama (ARAÚJO, 1997).

De acordo com CAMPOS (1984), a estrutura interna dos alto-forno só ficou bem conhecida a partir da década de 70 com a experiência de dissecação destes equipamentos realizada pelos russos e japoneses. A partir destas experiências o alto-forno foi dividido em cinco zonas distintas. As diversas zonas observadas podem ser descritas como:

**Zona granular:** região onde toda carga se encontra no estado sólido. A carga metálica granulada (minério de ferro e/ou sinter e/ou pelota), o redutor (carvão vegetal ou coque) e os fundentes descem sólidos em contra corrente com os gases. O minério e o coque mantêm sua distribuição em camadas, tal como carregados.

**Zona de amolecimento e fusão (zona coesiva):** região onde os componentes da carga

metálica e fundentes passam por um estado de amolecimento e se fundem.

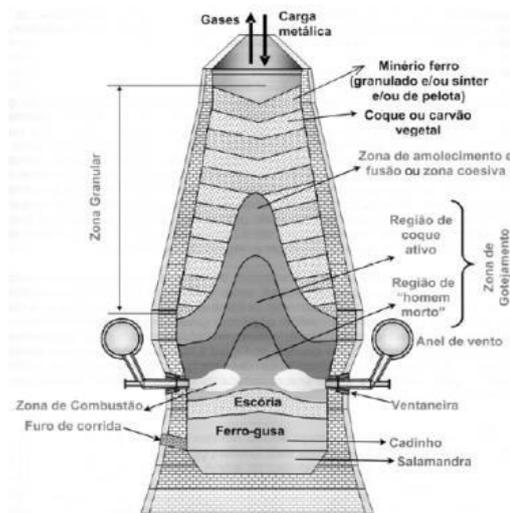
**Zona de gotejamento:** região onde o metal e a escória, já na forma líquida, escoam em contracorrente com os gases através de um empilhamento de coque (ou carvão vegetal) parcialmente reagido, logo abaixo da zona coesiva, que fornece coque para a combustão na ventaneiras (zona de coque ativo) e para o homem-morto (zona de coque estagnado).

**Zona de combustão:** região onde ocorre a combustão do coque da zona ativa com o oxigênio do ar desopro. Trata-se de uma cavidade em frente às ventaneiras formada pelo efeito do jato de ar, no qual as partículas granuladas de coque tem um movimento circular vão sendo queimadas, gerando o gás redutor e energia.

**Zona do cadinho:** essa região é formada pelo empilhamento de coque do homem morto junto com o gusa e a escória que gotejam da zona de amolecimento e fusão.

Conforme se observa na Figura 11, pode-se ver as zonas que o alto-forno é dividido:

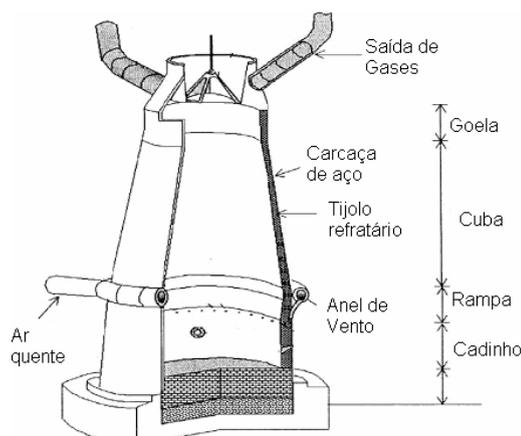
Figura 11: Zonas internas do alto-forno



Fonte: RIZZO, (2009)

O corpo físico do alto-forno é dividido basicamente nas seguintes partes: goela, cuba, ventre, rampa e cadinho, como mostrado na Figura 12 a seguir:

Figura 12: Estrutura externa do alto-forno e principais dispositivos de funcionamento.

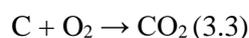


Fonte: ARAÚJO, (1997).

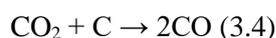
Neste corpo físico há de se destacar a região das ventaneiras, que é constituída por peças de cobre refrigerado a água, situadas na parte superior do cadinho, por onde é injetado ar quente e os materiais pulverizados (ASSIS, 2008).

Segundo Kwietniski (2007), o processo de obtenção do ferro-gusa se dá por um conjunto de etapas e reações químicas fundamentais, das quais se pode citar:

- As temperaturas mais elevadas ocorrem nas proximidades das ventaneiras da ordem de 1.800 a 2.000°C. Nesta região, verifica-se a Reação 3.3:



- Este  $\text{CO}_2$ , ao entrar em contato com o coque incandescente, decompõe-se segundo a Reação 3.4:



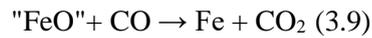
O CO originado é o agente redutor. A carga introduzida pelo topo, ao entrar em contato com a corrente gasosa ascendente sofre umasecagem.

- A decomposição dos carbonatos se dá em temperaturas distintas, conforme mencionado abaixo. As reações 3.5 e 3.6 mostram como se processa esta decomposição:



É de se observar que o carbonato de cálcio se decompõe em temperaturas da ordem de 900°C e o carbonato de magnésio se decompõe em temperaturas da ordem de 650°C. Além do CO como agente redutor, o próprio carbono do carvão atua nesse sentido.

- As reações químicas de redução do minério de ferro ocorrem segundo as Reações 3.7, 3.8 e 3.9 ou 3.10:

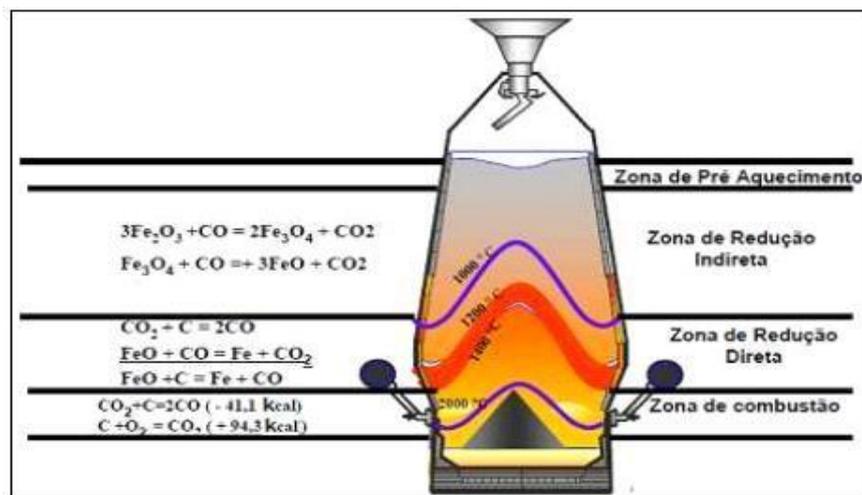


Ou



Um esquema geral das principais reações que ocorrem no alto-forno e a área que estas ocorrem, está representado na Figura 13 com as reações anteriormente descritas:

Figura 13: Reações químicas fundamentais em um alto-forno



Fonte: ARAUJO, (1997)

#### 4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento desse trabalho envolveu, basicamente, pesquisas bibliográficas, investigação de documentos, teses e artigos, além de publicações com ênfase no setor siderúrgico a carvão vegetal no Estado de Minas Gerais e também em estudos a respeito das emissões de gases de efeito estufa, como o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Para critério de comparação serão também utilizados dados do CO<sub>2</sub> Emissions Data Collection, do WorldSteel. Sendo assim, foram utilizadas múltiplas fontes de dados para assegurar significância aos resultados. Logo, este trabalho realizou uma pesquisa qualitativa e que baseou-se em um método de investigação científica que se foca no caráter subjetivo do objeto analisado, estudando as suas particularidades e experiências individuais. O trabalho se iniciou com a definição dos temas a serem abordados:

1. Carvão vegetal: propriedades, carvão vegetal e a siderurgia, a biomassa aplicada à siderurgia;
2. O uso do eucalipto na produção do carvão vegetal: florestas de eucalipto, as plantações de eucalipto e o meio ambiente, aspectos sócio econômicos;
3. Aspectos ambientais da produção do carvão vegetal: mudanças climáticas recentes;
4. Processo siderúrgico utilizando o alto-forno a carvão vegetal: etapas de produção do aço, o processo de produção do ferro gusa em alto-forno, situação da siderurgia à carvão vegetal no Brasil;
5. Produção do aço a carvão vegetal x Produção do aço a carvão mineral quanto a emissão de CO<sub>2</sub>.
6. Fixação de CO<sub>2</sub> na produção de carvão vegetal.
7. Desmatamento e problemas relacionados ao plantio e produção de eucalipto.

Os temas acima formaram a base para a pesquisa e foram tratados nos capítulos deste trabalho. Para a coleta de dados foi feita uma pesquisa em livros e artigos sobre os assuntos previamente definidos. A investigação documental no banco de dados da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e em sítios da internet de empresas siderúrgicas, órgãos do governo, sindicatos, faculdades, entidades internacionais e organizações não governamentais.

Importante destacar que o trabalho da mestre Michelle Xavier De Paula (2021), intitulado “Emprego do carvão vegetal na produção do ferro gusa, como contribuição à redução das emissões de dióxido de carbono: avaliação para o setor siderúrgico do estado de Minas Gerais”, da Universidade Federal de Minas Gerais foi utilizado como base para análise

das emissões/fixação de carbono no setor siderurgico de Minas Gerais. Este referido trabalho pautou-se nas metodologias adotadas pelo IPCC e, portanto, aceitas e reconhecidas mundialmente.

#### 4.1 Emissões de carbono na siderurgia em Minas Gerais: estimativa e análise

O setor energético é responsável por mais de 90% das emissões de CO<sub>2</sub> e 75% do total de emissões de gases de efeito estufa. Estimativas das emissões nacionais e por setor são feitas com base nas quantidades de combustíveis utilizadas e o teor de carbono dos combustíveis (IPCC, 1995). Durante o processo de combustão, a maior parte do carbono é emitida de imediato como CO<sub>2</sub>. Porém, parte do carbono é liberada como monóxido de carbono, metano ou compostos orgânicos voláteis diferentes do metano. A maior parte do carbono emitido na forma dessas classes de CO<sub>2</sub> chega a oxidar-se em CO<sub>2</sub> na atmosfera (IPCC, 2006).

É possível estimar emissões de CO<sub>2</sub> com bastante precisão, com base no total de combustível queimado e o teor de carbono médio de combustíveis (IPCC, 2006). Neste trabalho foi utilizado a proposta do IPCC (2019) para mensuração das emissões atmosféricas de CO<sub>2</sub> utilizando-se o carvão mineral e carvão vegetal na produção de ferro gusa.

A equação geral da metodologia para emissões da produção de gusa por meio do alto-forno e que não é convertida em aço é a seguinte:

$$ECO_{2,non-energy} = IP \cdot EFIP \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

$ECO_{2,non-energy}$  = Emissões de CO<sub>2</sub> da produção de ferro-gusa não convertida em aço

$IP$  = Quantidade produzida de ferro gusa não convertida em aço (em toneladas)

$EFx$  = Fator de emissão, em toneladas de CO<sub>2</sub>/ tonelada produzida

Utiliza-se desse cálculo para mensuração das emissões separadamente, visto que para usinas integradas deve-se considerar a produção do ferro gusa e a conversão deste em aço.

#### 4.2. Fatores de emissão de carbono

Os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> neste trabalho são calculados com base no conteúdo de carbono dos combustíveis e foram utilizados os valores sugeridos pelo IPCC que são valores padrão para fatores de emissão, apresentados na Figura 14.

Figura 14: Fatores de emissão de carbono

Fontes de energia	Fator de emissão (tCO <sub>2</sub> /unidade)
Coque de carvão mineral	1,43
Carvão vegetal de florestas plantadas*	1,35

Fonte: IPCC, 2019.

\*Em geral as emissões neste caso são computadas como zero nos inventários nacionais devido ao coeficiente de fixação do CO<sub>2</sub> na fase de crescimento das plantas.

Para critério de comparação, os valores de fatores de emissão de CO<sub>2</sub> para produção de gusa por coque e carvão vegetal, da CO<sub>2</sub> Emissions Data Collection, da WorldSteel, serão também aqui utilizados. Tais fatores estão apresentados na Figura 15:

Figura 15: Fatores de emissão de carbono (WorldSteel)

Fontes de energia	Fator de emissão (tCO <sub>2</sub> /unidade)
Coque de carvão mineral	3,059
Carvão vegetal*	0,000

Fonte: WorldSteel, 2016.

\*Emissões neste caso são computadas como zero devido ao coeficiente de fixação do CO<sub>2</sub> na fase de crescimento das plantas.

### 4.3. Balanço de CO<sub>2</sub> no ciclo de fabricação do ferro gusa a carvão vegetal

Analisando-se o balanço de CO<sub>2</sub> para a siderurgia a coque e a carvão vegetal verifica-se que utilizando-se do carvão vegetal a emissão de CO<sub>2</sub> e outros gases de efeito estufa é consideravelmente mais baixa, devido ao processo fotossintético realizado no crescimento do eucalipto. No ciclo de fabricação do ferro-gusa a carvão vegetal são gerados CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, e as principais etapas geradoras são a carbonização da madeira e a redução no alto-forno.

#### 4.3.1. Emissões de CO<sub>2</sub> na carbonização da madeira

Algumas premissas foram consideradas no cálculo de emissão de CO<sub>2</sub> na carbonização da madeira, estas estão apresentadas abaixo:

- I. A massa dos gases provenientes da carbonização da madeira representa 25% da massa da madeira seca. A porcentagem em volume dos principais gases gerados no processo é: (a) CO<sub>2</sub> = 62%; (b) Metano = 2,43%; (c) CO = 34%; (d) Etano = 0,13%; (e) Hidrogênio = 0,63%. (FERREIRA, 2000 apud MALARD, 2009);
- II. Para produzir uma tonelada de ferro-gusa, usa-se 3,288 m<sup>3</sup> ou 1,45 tonelada de eucalipto (3,288 m<sup>3</sup> x 440 kg/m<sup>3</sup> / 1.000) (MALARD, 2009);
- III. 5% da massa da madeira enfiada é queimada para aquecer a carga do forno. Considerando a pequena massa queimada, supõe-se a conversão completa do carbono em CO<sub>2</sub> equivalente (FERREIRA, 2000 *apud* MALARD, 2009). Esses 5%, equivalem a 0,073 t de madeira (0,05 x 1,45). Considerando teor de carbono igual a 43% (SANQUETTA, 2009

*apud* MALARD, 2009), são liberadas 0,031 toneladas de C ( $0,43 \times 0,073$ ), que, convertidas para CO<sub>2</sub> – ou seja, multiplicando por 44/12 (massa do CO<sub>2</sub> é 44 e do carbono 12) –, obtém-se 0,115 toneladas de CO<sub>2</sub>;

IV. Considerando o enforamento de 1,45 t de madeira, usa-se 1,378 t de madeira ( $0,95 \times 1,45$ t). Como 25% da massa correspondem às frações gasosas, obtém-se 0,345 tonelada de gases ( $0,25 \times 1,378$  t de madeira).

Na Tabela 1 estão apresentadas informações sobre as emissões de CO<sub>2</sub> durante o processo de carbonização.

Tabela 1: Emissões de CO<sub>2</sub> durante o processo de carbonização

INSUMO	EMIÇÃO
0,073 t madeira (equivalente a 5% da massa da madeira enforada)	0,115 t CO <sub>2</sub>
1,378 t madeira (equivalente a 95% da massa da madeira enforada)	0,214 t CO <sub>2</sub>
	0,117 t CO
	0,008 t CH <sub>4</sub> <sup>30</sup> = 0,168 t CO <sub>2</sub> eq
	< 0,001 t C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>

Fonte: (MALARD, 2009)

V. Total de CO<sub>2</sub> emitido na carbonização da madeira por tonelada de ferro gusa: 0,497t.

#### 4.3.2. Emissão de CO<sub>2</sub> na rota produtiva utilizando alto-forno

Conforme já mencionado, o fator de emissão é de 1,35t de CO<sub>2</sub> para cada tonelada de ferro-gusa produzida segundo o IPCC (2019). O fator de emissão calculado por Malard (2009) especificamente para a indústria siderúrgica mineira, de acordo com os dados levantados pelo autor, é de 1,9 t de CO<sub>2</sub> para cada tonelada de ferro-gusa produzida.

#### 4.4. Fixação de CO<sub>2</sub> nas florestas de eucalipto

Segundo Malard (2009), para calcular a fixação de CO<sub>2</sub> nas florestas de eucalipto temos:

- Volume de uma árvore no sétimo ano de crescimento: 0,318 m<sup>3</sup>;
- Para produzir uma tonelada de ferro-gusa são utilizados 3,288 m<sup>3</sup> de madeira, ou seja, aproximadamente dez árvores ( $3,288 \text{ m}^3 / 0,318 \text{ m}^3$ );
- Para estimar a massa de CO<sub>2</sub> absorvida pela planta, adotou-se a metodologia usada pelo IPCC (2003), que quantifica o estoque de CO<sub>2</sub> por meio da seguinte equação:

$$\text{CO}_2 = (V * D * \text{FEB}) * (1+R) * \text{FC} * (44/12) \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

V = volume comercial, em m<sup>3</sup>;

D = densidade específica da madeira, em toneladas de matéria seca por m<sup>3</sup> de volume comercial;

FEB = fator de expansão da biomassa, para conversão de volume comercial para biomassa acima do solo;

R = razão parte aérea da árvore (peso seco da parte aérea em kg) / parte radical (peso seco das raízes em kg);

FC = fração de carbono.

- Volume comercial de uma árvore: 0,318 m<sup>3</sup>. (MALARD, 2009)
- Densidade do *Eucalyptus grandis* = 0,44 g/cm<sup>3</sup>. (SANTOS; SANSÍGOLO, 2007 *apud* MALARD, 2009)
- FEB: 1,05. (CORTE *et al.*, 2015)
- R = 0,08. (CORTE *et al.*, 2015)
- FC- Fração carbono na madeira de *Eucalyptus grandis* = 0,43. (SANQUETTA, 2009 *apud* MALARD, 2009)

Dessa forma, é possível estimar o estoque de CO<sub>2</sub> por árvore como sendo:

$$\text{CO}_2 = (0,318 * 0,44 * 1,05) * (1+0,08) * 0,43 * (44/12)$$

$$\text{CO}_2 = 0,2502 \text{ t por árvore}$$

Segundo o estudo de Malard (2009), são necessárias dez árvores de *Eucalyptus grandis* oriundas de floresta plantada para fornecer carvão vegetal suficiente para produzir uma tonelada de ferro-gusa, assim, são fixadas 2,50t de CO<sub>2</sub> (0,2502 t \*10).

#### **4.5. Balanço de CO<sub>2</sub> no ciclo de fabricação do ferro-gusa**

Encontra-se na Figura 16 os resultados verificados para a emissão de CO<sub>2</sub> no ciclo de fabricação do ferro-gusa (abrangendo a carbonização da madeira, produção do gusa no alto-forno e também a fixação de CO<sub>2</sub> nas florestas plantadas de eucalipto), está representado um esquema do balanço emissões para a produção de ferro-gusa a partir do carvão vegetal oriundo de florestas plantadas. Como resultado do balanço foi obtido uma fixação de 0,65 t de CO<sub>2</sub>

Figura 16: Balanço de CO<sub>2</sub> no ciclo de fabricação do ferro-gusa tendo como termorreduzidor o carvão vegetal oriundo de florestas plantadas



Fonte: Malard, (2009)

#### 4.6. Emissões de CO<sub>2</sub> pela produção de gusa por carvão mineral x emissões de CO<sub>2</sub> pela produção de gusa por carvão vegetal no ano de 2020

Conforme previamente mencionado, Minas Gerais é o maior produtor de ferro-gusa do Brasil. A Tabela 2 mostra a série histórica da produção total de ferro gusa em Minas Gerais.

Tabela 2: Produção total de ferro gusa no Estado de Minas Gerais de 2011 a 2020

ANO	SIDERURGIA A COQUE	SIDERURGIA A CARVÃO VEGETAL EM MG			TOTAL
		USINAS INTEGRADAS	USINAS INDEPENDENTES	TOTAL A CARVÃO VEGETAL	
2011	8.367.456	2.256.500	2.998.000	5.254.500	13.621.956
2012	8.238.710	2.318.790	2.738.437	5.057.129	13.295.839
2013	7.998.656	2.283.244	2.924.957	5.208.201	13.206.857
2014	7.564.308	2.313.692	2.914.132	5.227.824	12.792.132
2015	7.481.840	2.140.623	2.562.327	4.702.950	12.184.790
2016	7.729.708	2.033.592	2.302.368	4.336.160	12.065.868
2017	7.376.886	2.050.214	2.775.393	4.825.607	12.202.493
2018	7.401.700	2.187.500	3.160.010	5.347.510	12.749.210
2019	7.213.580	1.996.420	3.520.142	5.516.562	12.730.142
2020	6.885.740	1.827.660	3.906.655	5.734.315	12.620.055

Fonte: SINDIFER, 2021

Com base no trabalho de Paula, (2021), foi utilizado a metodologia do IPCC que será aqui apresentada para elaboração de comparações, considerando a produção do ano de 2020, das emissões de CO<sub>2</sub> a partir das duas diferentes rotas tecnológicas de produção de ferro gusa no estado de Minas Gerais, a saber: siderurgia a coque e siderurgia a carvão vegetal. Considerando as emissões de CO<sub>2</sub> referentes ao setor, de acordo com a metodologia do IPCC, para a siderurgia a coque no ano de 2020 em Minas Gerais temos:

$$ECO_{2,non-energy} = 6.885.740 t * 3,059 t CO_2/t \quad \text{Equação (3)}$$

$$ECO_{2,non-energy} = 9.846.608t CO_2 = 9,85 Mt CO_2$$

Então, somente no ano de 2020 foram emitidas quase 10 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera apenas pela produção de ferro gusa a coque no Estado de Minas Gerais.

Para a siderurgia a carvão vegetal, também considerando o ano de 2020 temos:

$$ECO_{2,non-energy} = 5.734.315 t * 1,35 t CO_2/t \quad \text{Equação (4)}$$

$$ECO_{2,non-energy} = 7.741.325t CO_2 = 7,74 Mt CO_2$$

Porém considerando a fixação de CO<sub>2</sub> que ocorre durante o crescimento das florestas plantadas de eucalipto, para cada tonelada de ferro gusa produzida são fixadas 0,65t de CO<sub>2</sub>. Assim, temos:

$$5.734.315t * 0,65 t CO_2 = 3,73Mt CO_2$$

Portanto, foram emitidas 4,014 Mt de CO<sub>2</sub> em 2020 pela produção de ferro gusa a carvão vegetal no Estado de Minas Gerais uma vez que 3,73 Mt CO<sub>2</sub> foram fixadas pelas florestas plantadas de eucalipto.

Para as siderúrgicas que utilizam coque proveniente do carvão mineral emitem aproximadamente 5,84 Mt de CO<sub>2</sub> a mais comparando-se as siderúrgicas a carvão vegetal, devido ao processo fotossintético realizado no crescimento do eucalipto que não existe na obtenção do carvão mineral (combustível fóssil).

Utilizando-se os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> e metodologia definidos pela WorldSteel, será aqui apresentado para elaboração de comparações, e considerando a produção do ano de 2020, o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> a partir das duas diferentes rotas tecnológicas de produção de ferro gusa no estado de Minas Gerais, sendo estas: siderurgia a coque e siderurgia a carvão vegetal. Considerando as emissões de CO<sub>2</sub> referentes ao setor, de acordo com os dados da WorldSteel, para a siderurgia a coque no ano de 2020 em Minas Gerais temos:

$$ECO_{2,non-energy} = 6.885.740 t * 3,059 t CO_2/t \quad \text{Equação (5)}$$

$$ECO_{2,non-energy} = 21.063.479t CO_2 = 21,1 Mt CO_2$$

Então, considerando esta metodologia somente no ano de 2020 foram emitidas 21 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera apenas pela produção de ferro gusa a coque no Estado de Minas Gerais.

Para a siderurgia a carvão vegetal, as emissões neste caso são computadas como zero devido ao coeficiente de fixação do CO<sub>2</sub> na fase de crescimento das plantas, conclui-se que as siderúrgicas que utilizam coque proveniente do carvão mineral emitem aproximadamente 21Mt de CO<sub>2</sub> a mais comparando-se as siderúrgicas a carvão vegetal, devido ao processo fotossintético realizado no crescimento do eucalipto.

Para ambos os métodos apresentados pode-se concluir que a opção pela utilização do carvão vegetal, quando feito de maneira sustentável, proporciona um ganho ambiental na produção do ferro-gusa, sendo que para o método da estabelecido pela WorldSteel, verifica-se uma diferença maior entre as emissões da rota de produção via coque e via carvão vegetal. Outra questão verificada na rota de fabricação de ferro gusa a coque, é que esta emite grande quantidade de SO<sub>2</sub>, este quando combinado ao vapor d'água contido na atmosfera, forma a chuva ácida, que causa danos a monumentos e construções e causa danos ambientais em lagos, plantações e florestas (MALARD, 2009).

#### **4.7. Análise dos impactos causados pela supressão de mata nativa para o plantio de**

##### ***Eucalipto***

Os impactos sócio-econômicos e ambientais causados pela silvicultura, são fatores que devem ser levados em conta quanto a produção de carvão vegetal para sua utilização na siderurgia.

São limitações na utilização do cavão vegetal que podem ser consideradas:

- A contribuição para a mitigação das mudanças climáticas devido à utilização do carvão vegetal como termorredutor não é absoluta, pois existem outros GEE's que são emitidos pela queima do carvão e não são absorvidos pela biomassa durante o desenvolvimento da planta;
- Mesmo havendo estímulo para ampliação das áreas de florestas plantadas certificadas e a promoção e fiscalização para seu manejo adequado, trata-se uma espécie exótica passível de causar impactos ambientais negativos para o ecossistema.

Os prejuízos ambientais, por mais que as empresas façam uma propaganda favorável são evidentes, pois nem todas as áreas de cultivo são bem manejadas como as produtoras alegam, principalmente na produção não industrial, e isso gera diversos impactos ambientais negativos, desde na degradação do solo, perda excessiva de água, acarretando um enorme prejuízo na biodiversidade, tanto da fauna quanto da flora.

De acordo com Viana (2004), O efeito das plantações de eucalipto sobre a diversidade biológica depende por exemplo:

- Do tipo de ecossistema natural que ocupava a área plantada (mata nativa ou de reflorestamento);
- Das espécies de eucalipto escolhidas;
- Das técnicas de silvicultura empregadas;

- Do tamanho das áreas plantadas.

Caso haja plantio de eucalipto em área de vegetação natural, são esperados efeitos negativos sobre a fauna e flora: perdas e fragmentação de áreas naturais, redução de fonte de recursos para fauna (por exemplo: a monocultura de eucalipto gera apenas um tipo de recurso de néctar, pólen e flor. Ao contrário do que é encontrado no cerrado nativo que existe uma diversidade de fontes). Os principais causadores destes efeitos negativos são: aumento de áreas de sombra, incremento na competição por água e nutrientes do solo, perturbações no solo e efeitos de substâncias químicas do eucalipto sobre outras formas de vegetação (VIANA, 2004).

Porém caso a silvicultura seja empregada para recuperação de áreas degradadas pela ação humana o efeito final ainda será positivo, visto que o eucalipto promove a fixação de carbono, contribuindo para a redução de gases do efeito estufa. O eucalipto também tem grande utilização para o fim de restauração de áreas degradadas pela razão da sua capacidade de rápido crescimento, em condições de baixa fertilidade do solo, formando florestas catalisadoras de espécies arbóreas nativas (VIANA, 2004).

As plantações de eucalipto possuem um baixo custo de implantação e manutenção e sustentabilidade das florestas restauradas, duas características buscadas para espécies plantadas na restauração de áreas completamente degradadas pelo homem. Do ponto de vista da recuperação ambiental, a silvicultura brasileira apresenta-se bastante promissora nas próximas décadas, já que se vislumbra a intensificação de um cenário de elevada produtividade dos reflorestamentos, em consonância com a conservação e restauração das florestas nativas e, por consequência, dos recursos hídricos e edáficos, bem como da biodiversidade como um todo (VIANA, 2004).

Verifica-se que mesmo com as empresas se defendendo com vários argumentos a favor do uso deste tipo de monocultura, alegando que agem com responsabilidade social e atuam em harmonia com o meio ambiente contribuindo para a proteção ambiental, é inevitável deixar de lado as críticas negativas, uma vez que fica evidente que a cultura do eucalipto traz prejuízos sociais como gerar poucos empregos e ser um obstáculo no processo de reforma agrária, por demandar grandes áreas de plantio (VIANA, 2004).

Muitas vezes a madeira, matéria-prima utilizada na produção de carvão vegetal, é irregularmente obtida de florestas nativas, o que gera problemas ambientais relevantes. Atualmente, o consumo do carvão vegetal de origem nativa é menor do que o da silvicultura, o que não significa que ele tenha sido extinto. Apesar da produção de carvão vegetal não ser a principal atividade econômica causadora do desmatamento no Brasil, ainda existe um longo percurso a fim de diminuir e extinguir o uso de práticas não sustentáveis em sua cadeia

produtiva (PAULA, 2021).

A implantação do reflorestamento e produção de carvão vegetal provocaram um incremento nas atividades industriais mas, por outro lado, promoveram profundas alterações ambientais e sociais. As áreas rurais são capazes de indicar os impactos sociais, uma vez que os agricultores são os principais envolvidos, não apenas como empregados das carvoarias mas também como pequenos produtores de carvão e como receptores diretos dos impactos ambientais. O reflorestamento e o carvoejamento produziram modificações não apenas na paisagem, mas na vida cotidiana das comunidades impactadas introduzindo novas relações de trabalho nas carvoarias e uma modificação do relacionamento entre o homem e o meio natural (BETHONICO, 2004).

Um ponto positivo da produção de ferro-gusa a partir do carvão vegetal para as empresas é que as emissões de CO<sub>2</sub> na produção do gusa não são computadas nas emissões totais de CO<sub>2</sub> das atividades desenvolvidas no Estado de Minas Gerais, pois segundo a metodologia do IPCC elas devem ser relatadas como zero em inventários nacionais de gases de efeito estufa. A biomassa queimada como fonte de energia deve ser contabilizada e as emissões de CO<sub>2</sub> são incluídas no inventário apenas como um item informativo no setor de energia, pois se considera que o CO<sub>2</sub> será reabsorvido durante o crescimento da planta (MALARD, 2009; IPCC, 2019). Realizando uma avaliação do aumento da área plantada de eucalipto de 2009 a 2019, e a supressão da mata nativa para o plantio de tal espécie, consegue-se prever assim algumas das consequências de tais mudanças na vegetação do estado.

Na Figura 17 está demonstrado o aumento da área plantada de eucalipto nos últimos anos:

Figura 17: Histórico da área plantada com árvores de eucalipto, 2009-2019 (hectares)

Estado State	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018*	2019
Minas Gerais	1.300.000	1.400.000	1.401.787	1.438.971	1.404.429	1.400.232	1.395.032	1.390.032	1.381.652	1.977.410	1.920.329
São Paulo	1.029.670	1.044.813	1.031.677	1.041.695	1.010.444	976.186	976.613	946.124	937.138	1.040.284	1.215.901
Mato Grosso do Sul	290.890	378.195	475.528	587.310	699.128	803.699	826.031	877.795	901.734	1.093.805	1.124.637
Bahia	628.440	631.464	607.440	605.464	623.971	630.808	614.390	612.199	608.781	585.269	588.035
Rio Grande do Sul	271.980	273.042	280.198	284.701	316.446	309.125	308.515	308.178	309.602	426.371	456.001
Espírito Santo	204.570	203.885	197.512	203.349	221.559	228.781	227.222	233.760	234.082	225.520	225.055
Paraná	157.920	161.422	188.153	197.835	200.473	224.089	285.125	294.050	295.520	255.955	266.473
Maranhão	137.360	151.403	165.717	173.324	209.249	211.334	210.496	221.859	228.801	200.612	199.911
Mato Grosso	147.378	150.646	175.592	184.628	187.090	187.090	185.219	185.219	181.515	187.947	188.605
Pará	139.720	148.656	151.378	159.657	159.657	125.110	130.431	133.996	135.843	151.888	154.402
Goiás	115.286	116.439	118.636	115.567	121.375	124.297	127.201	127.201	127.201	127.201	127.201
Tocantins	44.310	47.542	65.502	109.000	111.131	115.564	116.365	116.798	118.443	149.988	146.959
Santa Catarina	100.140	102.399	104.686	106.588	107.345	112.944	116.250	116.240	114.513	219.199	211.962
Amapá	62.880	49.369	50.099	49.506	57.169	60.025	63.026	65.026	67.826	67.826	67.826
Outros* Other*	28.380	41.675	35.807	46.568	43.710	49.369	48.691	45.307	44.558	74.905	73.009
<b>Total</b>	<b>4.658.924</b>	<b>4.900.950</b>	<b>5.049.712</b>	<b>5.304.163</b>	<b>5.473.176</b>	<b>5.558.653</b>	<b>5.630.607</b>	<b>5.673.784</b>	<b>6.872.209</b>	<b>6.784.179</b>	<b>6.966.306</b>

\*Dados revisados em 2020. | \*Data revised in 2020.

Fonte: IBÁ,(2020).

De acordo com a Figura 17, de 2009 a 2019 houve um aumento de 620.329 hectares de área plantada de eucalipto. O que representa um aumento expressivo de 47,71% da área plantada em 10 anos.

Existem muitos impactos negativos relacionados a supressão da mata nativa para o cultivo da silvicultura, são exemplos segundo JESUS (2022):

- Desertificação do clima e de solo: as grandes florestas como as de eucalipto necessitam de uma enorme quantidade de água, cada pé de eucalipto necessita, para crescer satisfatoriamente, levando-se em conta o rendimento econômico, de aproximadamente 30 litros de água por dia, o que acaba gerando um grande déficit hídrico nas regiões onde são cultivados, gerando assim certa desertificação da região. Esse é um grave problema, já que muitas plantações são realizadas às beiras de córregos e nascentes de rios, o que acaba por ressecar o solo;
- Ressecamento do solo e uma maior exposição à erosão: como o eucalipto está sendo plantado visando-se unicamente uma maior viabilidade econômica

possível, depois de alguns anos a plantação é cortada, deixando o solo empobrecido e exposto a erosão, causando enormes impactos ambientais na região onde estava sendo cultivada a floresta. Outro problema é que, para se tentar recuperar áreas tão degradadas como essas, são gastas enormes quantias de dinheiro por parte das autoridades competentes;

- Diminuição da biodiversidade: as florestas de eucalipto são cultivadas priorizando somente um retorno econômico. Assim sendo, não são cultivadas juntamente outras espécies de vegetais, o que diminui a diversidade vegetal da região de floresta, já que a mesma também impede que gramíneas e pequenos arbustos cresçam e se desenvolvam, embora quando estejam pequenas, as árvores do eucalipto, não forneçam um bloqueio radiação solar como quando estão grandes. Outro problema é a falta da diversidade da fauna, já que os únicos animais que conseguem sobreviver nesses tipos de florestas são formigas e caturritas (aves predadoras de lavouras que usam as árvores de eucalipto como abrigo, mas não se alimentam delas);
- Especialização da atividade produtiva: esse problema se deve ao fato de o cultivo de grandes áreas de eucalipto serem dedicadas somente à monocultura e altamente especializada, gerando um grande desemprego em algumas regiões, que chegam até mesmo a perderem suas características culturais;
- Transformação da paisagem: algumas áreas de plantação de eucalipto atingem regiões de ecossistemas em risco, o que acaba transformando a paisagem do local, perdendo estas características peculiares transformando a paisagem natural das regiões de cultivo;
- Pode gerar a ruptura de duas tradições produtivas: a pecuária, realizada principalmente nos latifúndios, e a produção da agricultura de subsistência ou agricultura familiar, realizada nos interstícios das grandes propriedades;
- Torna-se um modelo de concentração da terra, de capital e da renda, visto que a silvicultura normalmente é empregada em grandes extensões de terra;
- O plantio de culturas anuais em consórcio, com o eucalipto, apregoado pelas empresas, só é possível nos dois primeiros anos, pois nos anos subseqüentes a competição por luz, água e nutrientes, inviabiliza as culturas anuais.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A preocupação com os problemas ambientais e o aquecimento global fez com que o mundo voltasse sua atenção para a utilização racional dos recursos naturais e estratégias fossem propostas para proteger o sistema climático da interferência antrópica perigosa. A siderurgia como um dos grandes pilares da indústria do Estado de Minas Gerais, também entra nesse cenário de busca para ações mais racionais e sustentáveis para a produção do aço. Como exemplo dessas estratégias, pode-se citar uma busca para o aumento do rendimento gravimétrico dos fornos. A média de rendimento dos fornos convencionais para produção artesanal é de 28% a 33%, já para os fornos industriais o rendimento é de 30% a 35% dependendo das técnicas empregadas. Ou seja, durante o processo de produção, de toda a madeira inserida para queima, em média apenas 30% é convertida em carvão vegetal, o restante da biomassa é emitido para atmosfera, aumentando a concentração de gases poluentes, já que grande parte da produção é realizada sem o tratamento dos gases emitidos.

A siderurgia mineira é destaque nacional pelo volume produzido e pela tradição da indústria no estado. Minas Gerais é líder mundial na produção e consumo de carvão vegetal oriundo de florestas plantadas. O consumo do carvão vegetal pelo setor siderúrgico é considerado positivo no âmbito ambiental, pois a utilização do mesmo reduz o consumo do carvão mineral, combustível fóssil. As emissões de CO<sub>2</sub> quando o carvão vegetal é utilizado são compensadas pela sua fixação nas florestas plantadas, tornando-o um combustível menos poluente.

O alto consumo do carvão vegetal pelo setor siderúrgico pode ser visto como positivo do ponto de vista ambiental, pois este energético desloca parte do consumo de carvão mineral e suas emissões de CO<sub>2</sub> são compensadas pela sua fixação nas florestas plantadas, tornando-o um combustível menos poluente.

De acordo com a metodologia do IPCC, a siderurgia mineira a coque emitiu, em 2020, aproximadamente 5,84 Mt de CO<sub>2</sub> a mais que a siderurgia a carvão vegetal, considerando uma produção de ferro gusa a coque e a carvão vegetal de 6,8 milhões e 5,7 milhões de toneladas, respectivamente, naquele ano. Já para a metodologia do WorldSteel a emissão de CO<sub>2</sub> na produção de ferro gusa utilizando-se de carvão mineral foi maior em 21 Mt. Trata-se de um valor substancialmente superior considerando que a produção de ferro-gusa a carvão vegetal em Minas Gerais é bem expressiva em comparação aos números nacionais, sendo estreita a diferença na produção de ferro-gusa entre as duas rotas tecnológicas. A expressiva diferença entre emissões de CO<sub>2</sub> na rota utilizando coque e carvão vegetal é devido ao processo fotossintético realizado no crescimento do eucalipto que não existe na obtenção do carvão

mineral (combustível fóssil), sendo assim a opção pela utilização do carvão vegetal, quando feito de maneira sustentável, proporciona um ganho ambiental na produção do ferro-gusa;

Assim, o controle e monitoramento para promover a preservação das matas nativas e o respeito às Áreas de Proteção Permanente, propiciarão o sequestro de quantidades adicionais de carbono ocasionando em uma maior contribuição para a proteção do sistema climático. A substituição de um combustível altamente emissor de Gases do Efeito Estufa por outro menos poluente é um dos procedimentos de Produção Mais Limpa, uma vez que propõe a alteração da matéria-prima com o objetivo de reduzir os impactos ambientais ocasionados pelo processo industrial. A alteração do combustível com o objetivo de minimizar os impactos ambientais decorrentes da atividade industrial é registrada pela ONU como um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, vinculado ao Protocolo de Quioto (BOICO, 2013).

Pode-se citar que no âmbito tecnológico, grande parte da produção de carvão não apresentou evolução nos últimos séculos, por razões diversas, como a pouca organização do setor, pouco investimento em pesquisas e suporte técnico por parte do governo. Ainda é possível citar como fatores a localização geográfica descentralizada do carvão vegetal, baixo grau de conhecimento técnico e de profissionalização, e o transporte do produto muitas vezes é realizado em veículos não específicos para este fim (SABLOWSKI, 2008). No cenário ambiental, a produção de carvão vegetal está intrínseca ao desmatamento, monocultura, geração de resíduos sólidos e a poluição atmosférica.

Cabe salientar que o objetivo deste trabalho não é sugerir ou incentivar a utilização de somente uma fonte de energia pela siderurgia, uma vez que isto poderia comprometer, dentre outros aspectos, a segurança energética do setor. Todavia, é importante ressaltar a importância da utilização de fontes energéticas alternativas, principalmente as renováveis, devido aos benefícios ambientais proporcionados por elas. Além disso, seria reduzida a dependência externa do Brasil em relação ao carvão, uma vez que o carvão de consumo industrial é totalmente importado, pela qualidade do carvão mineral brasileiro.

## 6. CONCLUSÃO

A partir dos dados investigados e do levantamento de análises de emissão de CO<sub>2</sub>, conforme apresentado no presente trabalho foi possível emitir algumas conclusões, que são descritas a seguir.

- Os resultados deste trabalho confirmaram que a utilização do carvão vegetal na redução do minério de ferro contribui para a mitigação da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, em razão da fixação de CO<sub>2</sub> que ocorre durante o desenvolvimento da floresta, proporcionando significativo ganho ambiental em termos de emissões desse gás de efeito estufa. A significativa diferença entre emissões de CO<sub>2</sub> na rota utilizando coque e carvão vegetal é devido ao processo fotossintético, responsável pela fixação de CO<sub>2</sub>, que ocorre no crescimento do eucalipto, sendo assim, pode-se dizer que a opção pela utilização do carvão vegetal, quando feito de maneira sustentável, proporciona um ganho ambiental na produção do ferro-gusa. Portanto, a utilização do carvão vegetal como estratégia para uma economia de baixo carbono para a indústria siderúrgica mostra-se uma opção atrativa, desde que não gere mais prejuízos ambientais e sociais (conforme aspectos que foram destacados ao longo deste trabalho), que são, atualmente, alguns dos maiores desafios do setor;
- O eucalipto tem grande utilização para o fim de restauração de áreas degradadas pela razão da sua capacidade de rápido crescimento, em condições de baixa fertilidade do solo, formando florestas catalisadoras de espécies arbóreas nativas, além disso as plantações de eucalipto possuem um baixo custo de implantação e manutenção e sustentabilidade das florestas restauradas, duas características buscadas para espécies plantadas na restauração de áreas completamente degradadas pelo homem;
- Caso a silvicultura seja empregada para recuperação de áreas degradadas pela ação humana o efeito final ainda será positivo, visto que o eucalipto promove a fixação de carbono, contribuindo para a redução de gases do efeito estufa;
- Portanto podemos concluir que para fins de restauração de áreas degradadas a utilização da silvicultura se torna bem vantajosa, visto que o plantio de eucalipto consegue regenerar o solo em alguns anos, além das vantagens já citadas.
- Porém no caso da devastação de mata nativa para plantio da monocultura de eucalipto, os impactos sócio-econômicos e ambientais são fatores que devem ser levados em conta quanto a produção de carvão vegetal para sua utilização na siderurgia. Como exemplo: desertificação do clima e de solo, ressecamento do solo e uma maior exposição à erosão,

diminuição da biodiversidade, especialização da atividade produtiva e transformação da paisagem; dificulta o plantio de culturas anuais em consórcio, com o eucalipto, sendo esta possível nos dois primeiros anos, pois nos anos subsequentes a competição por luz, água e nutrientes, inviabiliza as culturas anuais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. **Anuário Estatístico da ABRAF, 2007** - Ano base 2006. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/>> Acesso em: 10 nov. 2018.

ABRAF. **Anuário Estatístico da ABRAF, 2020** - Ano base 2019. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/>> Acesso em: 30 dez. 2021.

AMODEI, Juliana Bernardo. **Avaliação do processo de carbonização da empresa Saint Gobain LTDA**. 2008. 28 folhas. Monografia (Monografia apresentada ao curso de Engenharia Florestal) – UFRRJ, 2008.

AMORIM, Emiliana Bastos de. **Gases de efeito estufa produzidos pela combustão de biomassa**. 2012. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/handle/11449/106403>>. Acesso em 25 nov. 2018.

Associação Mineira de Silvicultura – AMS (disponível em <http://silv Minas.com.br/>, acessado em 27/12/2021). \_\_\_\_\_ JUNIOR, M. S. **Tecnologia florestal para o carvão, 2013**.

Anderson dos Santos Morais<sup>1</sup> Oliveira, Tiago Luis; Assis, Paulo Santos; Daniel, Alessandra Chagas; Porto, Marco Aurélio Dumont; Leal, Thales Eduardo; Artilha, Renan Cezar; Silva, Lucas Gibram Leite e. **Quantificação e qualificação de produtos gerados no processo ondatec de produção de carvão vegetal por micro-ondas**, p. 107-115. In: *36º Energy Balances / 30º Industrial Gas*, Rio de Janeiro, 2015. ISSN: 2594-3626 , DOI 10.5151/6666-6666-26639.

ARAÚJO, L. A. (1997) **Manual de siderurgia**. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997, v.1., Cap. 8:Alto-Forno. p. 195-258. Araujo, L. A.; *Manual de Siderurgia, Produção*. São Paulo: Ed. 1997. V. 1, 512p.

ASSIS, Claudinéia Olímpia de. **Sistema alternativo para carbonização de madeira**. 2007. 59 folhas. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Florestal) – UFLA, 2007.

ASSIS, P. S. **Injeção de materiais pulverizados em altos-fornos**. Curso de Pós-graduação em Metalúrgica e Materiais, p.4-15, UFF, Volta Redonda – RJ, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES FLORESTAS PLANTADAS. (2013). **Anuário estatístico da ABRAF 2017: ano base 2016**. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/>> Acesso em: 10 nov. 2018.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS. **AMS Informa**. Ano II. Edição 4. Julho 2007. Disponível em: <[www.sivil Minas.com.br](http://www.sivil Minas.com.br/)> . Acesso em: 3 nov. 2018.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS. **Silvicultura desenvolvimento social, econômico e ambiental com plantios florestais**. Encarte. 2004.

Balanco Energético Nacional, 2020 – Ano base 2019, EPE - Empresa de Pesquisa Energética Ministério de Minas e Energia – MME

- BARBIERI, C. C. T. **Estudos de misturas de carvões e biomassa visando a combustão em alto-forno**, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- BARBOSA, J. M. S.; POPPI, N. R.; SILVA, M. S. **Polycyclic aromatic hydrocarbons from wood pyrolysis in charcoal production furnaces**. *Environmental Research*. V. 101, p. 304-311, 2006.
- BARCELLOS, Daniel Câmara. **Forno Container para Produção de Carvão Vegetal: Desempenho, Perfil Térmico e Controle da Poluição**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, 2002. Disponível em: <<http://www.saxfornosequeimadores.com.br/fornos-retangulares>> Acesso 18/01/2022.
- BETHONICO, M. B. M. **II Seminário Internacional sobre Desenvolvimento Regional**, 2., 2004, Santa Cruz do Sul. Impactos sócio-ambientais da produção de carvão vegetal no norte de minas gerais: o caso de Montezuma. Santa Cruz do Sul: Ufrgs, 2004. 27 p. Disponível em: <https://www.unisc.br/site/sidr/2004/sustentabilidade/15.pdf>. Acesso em: 02/01/2021.
- BOICO, V. F. **A redução das emissões de Gases do Efeito Estufa nas indústrias de ferro-gusa e aço e química por meio da alteração da matriz energética**. 2013. Monografia (Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- BRAGA, R. N. B. **Aspectos tecnológicos referentes a injeção de materiais pulverizados em altos-fornos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Divisão de Redução de Matérias-Primas Siderúrgicas. Belo Horizonte, MG, p.17-43, 1999.
- BRAGA, R.N.B. *et al.* **Carvão Vegetal, Produção, Propriedades e Aplicações na Siderurgia**. Livro publicado pela ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1992, 320p.
- BRITO, J. O. **Desafios e perspectivas da produção e comercialização do carvão vegetal**. 2010. In: Fórum Nacional Sobre Carvão Vegetal, 2. Anais...., Sete Lagoas, 2010. Disponível em: . Acesso em 01 jan. 2022.
- BUREAU of Meteorology - BOM. **The Greenhouse Effect and Climate Change. Australian Government**, 2003. 74 p. Disponível em: <[www.bom.gov.au/info/GreenhouseEffectAndClimateChange.pdf](http://www.bom.gov.au/info/GreenhouseEffectAndClimateChange.pdf)> Acesso em: 10 nov. 2018
- CAF – Grupo Arcelor. **Manual do Produtor Florestal** – Programa Produtor Florestal. 2007.
- CAMPOS, V. F. **Tecnologia da fabricação de ferro-gusa em alto-forno**. Curso UFMG/Fundação Cristiano Ottoni, Belo horizonte, MG, Maio, 1984.
- CANÇADO, J. E. D.; BRAGA, A. L. F. ; PEREIRA, L. A. A.; ARBEX, M. A. ; SALDIVA, P.H. N. ; SANTOS, U. P. **Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica**. *Jornal*.
- CARNEIRO, A.C.O. *et. al.* **Estudo da viabilidade técnica e econômica da produção de**

**carvão vegetal em fornos circulares com baixa emissão de poluentes.** Viçosa: CEPEA/ESALQ, 2012. Disponível em: <[https://abccapacitacao.files.wordpress.com/2012/11/silvicultura\\_estudo-de-viabilidade-economica-abc\\_31out2012.pdf](https://abccapacitacao.files.wordpress.com/2012/11/silvicultura_estudo-de-viabilidade-economica-abc_31out2012.pdf)>. Acesso em: 24 nov. 2018.

CARVALHO, João Luis Nunes; AVANZI, Junior Cesar; SILVA, Marx Leandro Naves; MELLO, Carlos Rogerio de; CERRI, Carlos Eduardo Pellegrino. **Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 277-289, 2010. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000200001> > DOI: 10.1590/S0100-06832010000200001.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade.** BNDES Setorial, v. 41, p. 181-236, 2015.

CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Carvão vegetal: Aspectos técnicos, sociais, ambientais e econômicos.** Nota técnica da disciplina ENE5726: Biomassa como fonte de energia – conversão e utilização. São Paulo: IEE/USP, 2008.

CENDON, S. P.; PEREIRA, L. A. A.; BRAGA, A. L. F.; CONCEIÇÃO, G. M. S.; CURYCOUTO, L., *et al.* **Florestas plantadas para energia: aspectos técnicos, sócioeconômicos e ambientais.** UFV, Departamento de Engenharia Florestal, 2001.

Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC). **Manual de construção e operação de fornos de carbonização.** Belo Horizonte, 1982.

CGEE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (BRASIL). **Modernização da Produção de Carvão Vegetal no Brasil: Subsídios para a revisão do Plano Siderurgia.** Brasília: CGEE, 2015.

COLOMBO, S. F.; PIMENTA, A. S. e HATAKEYAMA, K. **Produção de carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais: um modelo sustentável.** In: Simpósio de Engenharia de Produção- SIMPEP, v.13. São Paulo, 2006. Disponível em: <[http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais\\_13/artigos/1208.pdf](http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/1208.pdf)>. Acesso 15/12/2021.

DE MORAES, Fabiana Fonseca. **Alto-Forno Sustentável: O mercado de carbono no Brasil com ênfase na produção de gusa a partir de carvão vegetal de florestas plantadas de eucalipto .** 2008.164 p. Dissertação (Pós graduação em Engenharia química)- UFMG, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-96CFB4>>. Acesso em: 3/12/2021.

DE MOURA, A. P. M.; CAMPOS, J. E.; MAGALHÃES, S. R. **Melhoria da qualidade de serviço na produção de carvão no setor de carbonização: um estudo de caso.** Revista da Universidade Vale do Rio Verde, v. 8, n. 1, p. 19-26, 2010.

DE NEVERS, Noel. **Air pollution control engineering.** 2. ed. Boston: McGraw-Hill, 2000. 586 p.

De Oliveira, Rogério Lima Mota. **Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal.** 2009.129 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFU, 2009.

DEPARTAMENTO DE PESQUISAS E ESTUDOS ECONÔMICOS – DEPEC. **Siderurgia**. Junho 2017. Disponível em [https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset\\_siderurgia.pdf](https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_siderurgia.pdf). Acesso: em 13 nov. 2018.

DERISIO, J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 2. ed. São Paulo: Signus Editora, 2000.

DIAS, E. C.; ASSUNÇÃO, A. A.; GUERRA, C. B.; PRAIS, H. A. C. **Processo de trabalho e saúde dos trabalhadores na produção artesanal de carvão vegetal em Minas Gerais, Brasil**. Cad. Saúde Pública. V. 18, p. 269-277, 2002.

ELDRIDGE, K.; DAVIDSON, J.; HARWOOD, C.; VAN WYK, G. **Eucalypt domestication and breeding**. Oxford: Clarendon Press, 1993.

FEREZ, A. P. C. **Efeito de práticas silviculturais sobre as taxas iniciais de seqüestro de carbono em plantios de restauração da Mata Atlântica**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - ESALQ/ Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

FERREIRA, E. N., CASTRO, J. A., SILVA, A. J. **Análise da injeção conjunta de carvão vegetal pulverizado e carvão mineral nacional com base em balanços gerais e Modelo CFD**. In: 40 Seminário de Redução de Minério de Ferro & Tecnologia mineral, 2010, Belo Horizonte. 40 Seminário de Redução de Minério de Ferro & Tecnologia mineral, 2010. v. 1. p. 231-240.

FERREIRA, O. C. **Emissão de Gases de Efeito Estufa na Produção e no Uso do Carvão Vegetal na Siderurgia**. Revista Economia & Energia. Maio e junho de 2000, N° 20, 19p.

GODOI, A. F. L.; RAVINDRA, K.; GODOI, R. H. M.; ANDRADE, S. J.; SANTIAGOSILVA, M.; VAN VAECK, L.; VAN GRIEKEN, R. **Fast chromatographic determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in aerosol samples from sugar cane burning**. Journal of Chromatography A. V. 1027, p. 49-53, 2004.

IBÁ - **Indústria brasileira de árvores**; Relatório anual 2020. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>>. Acesso em: 26 dez. 2021.

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia. Anuário estatístico de 2017. Disponível em: <[www.ibs.org.br/siderurgia\\_usos\\_producao.asp](http://www.ibs.org.br/siderurgia_usos_producao.asp)>. Acesso em: 3 de Novembro de 2018. INSTITUTO AÇO BRASIL - IABr. Preliminar Estatístico, n. 22, Dez. 2016.

INSTITUTO AÇO BRASIL - IAB. **Estatísticas da Siderurgia 2017**. Disponível em: Acesso em: 30 de Dez de 2020. 2017.

INSTITUTO AÇO BRASIL - IAB. **Estatísticas da Siderurgia 2019**. Disponível em: Acesso em: 30 de Dez de 2020. 2019.

INSTITUTO AÇO BRASIL - IAB. **Estatísticas da Siderurgia 2020**. Disponível em: Acesso em: 30 de Dez de 2020. 2020.

IPCC. **Climate Change 1990: The IPCC 1990 and 1992**. Relatório. Cambridge University

Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 196p, 1992. Disponível em: < [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc\\_90\\_92\\_assessments\\_far\\_full\\_report\\_sp.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc_90_92_assessments_far_full_report_sp.pdf)> Acesso em 30 de dezembro de 2021.

IPCC, 1995. **Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Relatório.** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 588p, 1995. Disponível em: < [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_sar\\_wg\\_I\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_sar_wg_I_full_report.pdf) > Acesso em 02 de novembro de 2021.

IPCC, 2001. **Climate Change 2001: Synthesis Report. Relatório.** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 409, 2001. Disponível em: < [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR\\_TAR\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_TAR_full_report.pdf) > Acesso em 02 de novembro de 2021.

IPCC, 2007: **Mudanças Climáticas 2007: Relatório de Síntese.** Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [Equipe de Redação Central, Pachauri, RK e Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Genebra, Suíça, 104 pp. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4\\_syr.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr.pdf). Acesso em 02 de novembro de 2021.

IPCC, 2014: **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. Disponível em < [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf)> Acesso em 02 de novembro de 2021.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, 2013.

IPCC. **PAINEL GOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA** (IPCC, sigla em inglês). Disponível em: < <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/>> Último acesso em: 30 de novembro de 2021.

JESUS, Amintas de. **Conheça os efeitos negativos do cultivo do eucalipto.** 2022. Disponível em: <http://sigaanoticia.com.br/conheca-os-efeitos-negativos-do-cultivo-do-eucalipto/>. Acesso em: 23 dez. 2022.

JACOMINO, V. M. F.; DE CASTRO, L. F. A; RIBEIRO, E. D. L.; LEÃO, M. M. D.; DE SOUZA, C. M.; GOMES, A. M.; ALMEIDA, M. L. B.; LOPES, L. E. F. **Controle Ambiental das Indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal.** Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302p.

KORTHAS, B.; PETERS, M.; SCHMÖLE, P. **Back to the Future: Ideas for New Blast furnace concepts (future of the blast furnace process - visions to reduce CO2 emissions).**

- ThyssenKrupp Stahl, Germany. Mo1 – 1st Plenary Session. 2004.
- KWIETNIEWSKI, Carlos Eduardo Fortis. Produção de ferro e aço. Notas de aula. Materiais mecânicos. UNISINOS, São Leopoldo/RS, 2007.
- LOPES, Rosimeire Batista; MIOLA, Deise Tatiane Bueno. **SEQUESTRO DE CARBONO EM DIFERENTES FITOFISIONOMIAS DO CERRADO**. Synthesis Revista Digital Fapam, Pará de Minas, v. 2, p. 127-143, 01 nov. 2010.
- LÚCIO. A. **Utilização da Biomassa na Indústria Siderúrgica**. 2006. Disponível em: < <http://www.sindicarv.com.br/arquivos/anexos/13.pdf> > Acesso 17/01/2022.
- MALLARD, A. A. M. (2009). **Avaliação ambiental do setor de siderurgia não integrada a carvão vegetal do Estado de Minas Gerais**. Ouro Preto: Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental / Universidade Federal de Ouro Preto (Universidade Federal de Ouro Preto).
- MARTINS, L. C.; PEREIRA, L. A. A.; LIN, C. A.; PRIOLI, G.; LUIZ, O. C.; SALDIVA, P. H. N.; BRAGA, A. L. F. **The effects of air pollution on cardiovascular diseases: lag structures**. Revista de Saúde Pública. V. 40, p. 677-683, 2006.
- MASUDA, Hiroshi. Carvão e Coque aplicados à metalurgia. Associação Brasileira de metais, v. 1, 1980.
- OLIVEIRA, A. C. et al. **Viabilidade econômica da produção de carvão vegetal em dois sistemas produtivos**. Floresta, Curitiba, PR, v. 44, n. 1, p. 143 – 152, jan./mar. 2014. Disponível em: . Acesso em: 21 dez. 2021.
- OLIVEIRA, A. C. **Sistema Forno-Fornalha para Produção de Carvão Vegetal**. 2012. 74 f. Dissertação (Pós-Graduação em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012. Disponível em: . Acesso em: 21 dez. 2021.
- OLIVEIRA, R. L. M. **Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal**. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009. Disponível em: . Acesso em: 17 dez. 2021.
- OLIVEIRA, J. B., GOMES, P. A., ALMEIDA, M. R. **Carvão vegetal – Destilação, carvoejamento, propriedades e controle de qualidade**, In: Penedo, W.R. CETEC Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - Publicação técnica, Belo Horizonte 1982, 173p.
- OLIVEIRA, J.V. - **Análise econômica do carvão vegetal**. In: SEMINÁRIO SOBRE CARVÃO VEGETAL, 1, 1977. Belo Horizonte, IBS/ABM/BDMG, 1977.
- ONU - Organização das Nações Unidas. **Concentração de gases de efeito estufa atinge recorde**. 2021. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2021/10/1767782>. Acesso em: 02 jan. 2022.
- PAINEL INTERGOVERNAMENTAL PARA AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS - IPCC, 2006. Clima 2007, a base científica. Resumo técnico do Informe do Grupo de Trabalho I, IPCC, Switzerland, 2006. 38p.
- PATUSCO, J. A. M. *et al.* **Balanco Energético Nacional (BEN)**. Ministério de Minas e

Energia, 2006, 192p.

PAULA, Michelle Xavier de. **Emprego do carvão vegetal na produção do ferro gusa, como contribuição à redução das emissões de dióxido de carbono: avaliação para o setor siderúrgico do estado de minas gerais.** 2021. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares, Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

PINHEIRO, P. C. C., Seminário “**Encuentro Regional sobre biocombustibles y Energias Renovables**”, Udelar, Montevideú, Uruguai, 2009.

PINHEIRO, Paulo Cesar da Costa. **PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL POR MICRO-ONDAS. V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Salvador, v. 1, n. 1, p. 1-9, ago. 2008. Disponível em: <https://docplayer.com.br/72920443-Producao-de-carvao-vegetal-por-micro-ondas.html>. Acesso em: 17 jan. 2022.

PINTO, N.D. **Análise comparativa entre o reflorestamento e outras alternativas de mitigação de gases de efeito estufa no estado do Rio de Janeiro.** Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

QUINTÃO, C. **Setor do aço vive sua pior crise, afirma presidente do IABr.** Valor Econômico. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/empresas/5054868/setor-do-aco-vive-sua-pior-crise-afirma-presidente-do-iabr>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

RIZZO, E. M. S. **Processo de fabricação de ferro-gusa em alto-forno.** Associação Brasileira Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2009.

SANQUETTA, C.R. **Elaboração de projetos de MDL e o mercado de carbono.** Apostila do curso oferecido pelo Instituto Eco2clima, Belo Horizonte, 2009.

SANTOS, S.R.; SANSÍGOLO, C.A. **Influência da densidade básica da madeira de clones de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla na qualidade da polpa branqueada.** Ciência Florestal, 2007. v. 17, N. 1, p. 53-63.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO P. F. ; MENDES, L. M. ; CARVALHO, A. M. M. L. **Análise Termogravimétrica em Clones de Eucalipto como Subsídio para a Produção de Carvão Vegetal.** Cerne, v. 18, n. 1, p. 143-151. Lavras, 2012.

SCARPINELLA, G. D' A. **Reflorestamento no Brasil e o protocolo de Kyoto.** 2002. 182f. Dissertação(Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SENA, Marcelo Monteiro Fonseca *et al.* **Potencialidades do extrato pirolenhoso: práticas de caracterização.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 18, p. 41-44, 2014. Disponível em:<<https://periodicos.ufsm.br/index.php/reget/article/view/13808>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

SINDICATO das Indústrias de Ferro Gusa - **SINDIFER** - Disponível em: <[www.sindifer.com.br](http://www.sindifer.com.br)> . Acesso em: 10 nov. 2018.

SILVA, Wellington Avelar de Souza e, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2017. **Avaliação da influência da densidade do carvão vegetal nos custos de transporte.** Orientador: Carlos Cardoso Machado. Coorientadora: Raiane Ribeiro Machado Gomes.

SOCIEDADE de Investigações florestais – SIF. **Jornal SIF: Edição Especial.** UFV. Disponível em: <[www.sif.org.br](http://www.sif.org.br)>. Acesso em: 10 nov. 2018.

UHLIG, Alexandre; GOLDEMBERG, José; COELHO, Suani Teixeira. **O uso do carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas.** Revista Brasileira de Energia, v.14, n.2, 2008, p.67-85.

TACCINI, M. M. **Estudo das metodologias da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, referentes à emissões de gases de efeito estufa na produção de carvão vegetal.** 2010. 87 f. Dissertação de Mestrado em Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2010.

VIANA, Fernando Luiz E. **INDÚSTRIA SIDERÚRGICA.** Caderno setorial ETENE, Ceara, n. 13, p. 2-14, ago. 2017. Disponível em: <[https://www.bnb.gov.br/documents/80223/2320766/caderno\\_setorial\\_siderurgica\\_14\\_2017\\_we\\_b%282%29.pdf/c964a87e-02a9-baf7-4554-298c9a5c9176](https://www.bnb.gov.br/documents/80223/2320766/caderno_setorial_siderurgica_14_2017_we_b%282%29.pdf/c964a87e-02a9-baf7-4554-298c9a5c9176)>. Acesso em: 10 nov. 2018.

Viana, M.B. 2004. **O eucalipto e os efeitos ambientais do seu plantio em escala.** Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados. Disponível em: <[http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/dcamara/1162/eucalipto\\_efeitos\\_boratto.pdf](http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/dcamara/1162/eucalipto_efeitos_boratto.pdf)>. Acesso em: 10 nov. 2018.

VITAL, Marcos Henrique Figueiredo; PINTO, Marco Aurélio Cabral. **Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 30, p. 237-297, 2009. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3006.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3006.pdf)>. Acesso em: 25 nov. 2018.

WORLDSTEEL ASSOCIATION. **Global Steel Industry: outlook, challenges and opportunities.** Disponível em: <[https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:d9e6a3df-ff19-47ff-9e8f-8c136429fc4/International+Steel+Industry+and+Sector+Relations+Conference+Istanbul\\_170420.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:d9e6a3df-ff19-47ff-9e8f-8c136429fc4/International+Steel+Industry+and+Sector+Relations+Conference+Istanbul_170420.pdf)>. Acesso em: 21/12/2021.

WORD STEEL ASSOCIATION. **Metodologia de cálculo de emissões de CO<sub>2</sub>,** 2016 Disponível em: . Acesso em: 19 nov. 2021.

WORLDSTEEL ASSOCIATION. **Steel Statistical Yearbook 2016.** Disponível em: <[www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook-.html](http://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook-.html)>. Acesso em: 21/12/2021.