

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA DE QUÍMICA

**Gustavo Oliveira dos Santos**  
**Juliana Pacheco de Sequeira**



ESTUDO LOGÍSTICO DA UTILIZAÇÃO DE CARVÃO  
VEGETAL NO PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO  
DE FERRO

RIO DE JANEIRO

2023

Gustavo Oliveira dos Santos

Juliana Pacheco de Sequeira

ESTUDO LOGÍSTICO DA UTILIZAÇÃO DE CARVÃO VEGETAL NO PROCESSO DE  
PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico

Orientador: Armando Lucas Cherem da Cunha

Rio de Janeiro

2023

Gerar a página da ficha catalográfica em <http://fichacatalografica.sibi.ufrj.br/> e substituir esta página por ela, no documento final.

Se o documento vier a ser impresso, esta página deverá ser impressa no verso da anterior (folha de rosto).

Gustavo Oliveira dos Santos  
Juliana Pacheco de Sequeira

ESTUDO LOGÍSTICO DA UTILIZAÇÃO DE CARVÃO VEGETAL NO PROCESSO DE  
PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico

Aprovado em 20 de dezembro de 2023.

---

Armando Lucas Cherem da Cunha

Rio de Janeiro  
2023

## RESUMO

SANTOS, Gustavo O.; SEQUEIRA, Juliana P. **Estudo Logístico da Utilização de Carvão Vegetal no Processo de Pelotização de Minério de Ferro**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

O processo de pelotização de minério de ferro, que é o modelo de aglomeração do mineral mais comum no Brasil, é responsável pela maior parte das emissões de carbono geradas na cadeia produtiva de geração de aglomerados de ferro, considerando desde a extração até a exportação. Atualmente, o combustível mais comumente utilizado para essa etapa é o carvão mineral, entretanto, estudos indicam que a implementação de um percentual de carvão vegetal proveniente da pirólise da madeira de florestas plantadas de eucalipto no processo produtivo levaria a uma redução das emissões gerais de CO<sub>2</sub> tanto pela captação do gás pela etapa de fotossíntese quanto pela diminuição do trajeto de transporte do insumo utilizado que, no momento atual, é proveniente de importação. Propõe-se assim, um levantamento logístico de viabilidade da implementação dessa mudança de insumo por meio da quantificação da neutralização de gás carbônico associado ao processo de pelotização de minério de ferro e qual seria a produção necessária de carvão vegetal para suprir essa demanda, considerando a utilização de 50%, em massa, do novo combustível sólido. Para a resolução da questão levantada, foram calculados dados de emissão por tonelada de pelotas produzidas por um ano para as etapas de pelotização e transporte de carvão mineral, além da neutralização resultante pelo processo de produção de carvão vegetal a partir de florestas plantadas de eucalipto, também fazendo o cálculo por tonelada de pelotas produzidas por ano, e, por fim foi calculada o saldo da neutralização. Como resultado do saldo de emissões, foi encontrado que a mudança proposta geraria uma redução 54,6% das emissões do processo, igualando a 1.385.000 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano. Além disso, pode-se concluir que seria necessário um aumento de 0,5% área de florestas de eucalipto em território brasileiro para suprir essa demanda, o que equivaleria a 36.956.119 hectares de plantação.

Palavras-chave: Minério de Ferro; Pelotização; Carvão Vegetal; Redução de CO<sub>2</sub>.

## ABSTRACT

SANTOS, Gustavo O.; SEQUEIRA, Juliana P. **Utilização de Carvão Vegetal no Processo de Pelotização de Minério de Ferro.** Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

The iron ore pelletizing process, which is the most common agglomeration model of the mineral, is responsible for the biggest part of carbon emissions generated in the productive chain of iron agglomerates. As of now, the most commonly utilized fuel in this step is coal, however, studies show that the implementation of a percentage of charcoal originated by the pyrolysis of eucalyptus planted forests in the production process would have a reduction in the total emissions of CO<sub>2</sub> by the capture of gas by the photosynthesis as well as the reduction of the transport route of the utilized input that, in the current moment, is imported. It's proposed a logistic evaluation of the implementation of the change of input by the quantification the neutralization of carbon dioxide associated to the iron ore pelletizing process and what would be the necessary production of charcoal to supply this demand, considering a change of 50%, in mass, of the new solid fuel. For this question, were calculated the emissions by ton of produced pellets in one year for the processes of pelletizing and transporting coal, as well as the resultant neutralization generated by the production of charcoal using planted forests of Eucalyptus, which was also calculated by the ton of pellets produced in one year, and, finally, the neutralization balance was calculated considering this change. As the result of the calculated balance, it was found that the proposed change would generate a reduction of 54,6% of the process emissions, which amounts to 1.385.000 tons of CO<sub>2</sub> by year. Furthermore, it can be concluded that a growth of 0,5% of the area of eucalyptus forests in Brazilian territory would be necessary to supply the demand for this change, which would equate to 36.956.119 acres of plantation.

Keywords: Iron Ore. Pelletization. Charcoal. CO<sub>2</sub> Reduction.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Emissões de CO<sub>2</sub> do setor IPPU, por subsetor, de 1990 a 2020.

Figura 2.1 - Diagrama típico de processamento de minério.

Figura 2.2 - Fluxograma do beneficiamento do minério de Ferro de Carajás.

Figura 2.3 - Fluxograma de processo de Pelotização.

Figura 2.4 - Sistema de um Forno de Grelha Móvel

Figura 2.5 - Área ocupada pela silvicultura, por grupos de espécies florestais (mil ha)

Figura 2.6 - Esquema simplificado de uma planta de pirólise

Figura 3.1 - Demarcação de espaçamento de plantio.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Composição típica do antracito utilizado na pelletização,

Tabela 4.1 - Distribuição dos dados nas quatro categorias, para as três séries estudadas.

Tabela 4.2 - Fator de emissão de CO<sub>2</sub> por transporte entre regiões.

Tabela 4.3 - Emissão de CO<sub>2</sub> por rota

Tabela 4.4 - Fator de emissão de CO<sub>2</sub> por combustível sólido queimado

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IPPU	<i>Industrial Process and Production Use</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
GHG	<i>Green House Gas</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
PFC	Perfluorocarbono
CCWG	<i>Clean Cargo Working Group</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$m_{CO_2, pel}$	Emissões de CO <sub>2</sub> da pelletização (ton)
$m_{CO_2, tot}$	Emissões totais de CO <sub>2</sub> (ton)
$\%_{pel}$	Porcentagem referente à pelletização
$E_{CO_2, pel}$	Emissões de CO <sub>2</sub> da produção de pelota (ton de CO <sub>2</sub> por ton de pelota)
$m_{pel}$	Massa de pelotas (ton)
$m_{CO_2}$	Massa de CO <sub>2</sub> (ton)
$n_{containers}$	Número de contêineres
$d$	Distância de transporte (km)
$f_{CO_2}$	Fator de emissão referente ao transporte em uma região (g de CO <sub>2</sub> por km)
$E_{CO_2, trans}$	Emissões do CO <sub>2</sub> transporte de antracito (ton de CO <sub>2</sub> por ton de antracito)
$m_{CS}$	Massa de antracito (ton)
$m_{CO_2, trans}$	Massa de CO <sub>2</sub> emitida no transporte de antracito referente à pelletização (ton)
$V_{eucalipto, ST}$	Volume de eucalipto ocupado em 1 metro estéreo (m <sup>3</sup> )
$V_{ST}$	Volume de eucalipto em metro estéreo (st)
$Fe$	Fator de empilhamento
$V_{madeira}$	Volume de madeira total (m <sup>3</sup> )
$V_{carvão}$	Volume de carvão vegetal total (m <sup>3</sup> )
$x_{mudas}$	Quantidade de mudas que ocupam 1 hectare
$A_{hectare}$	Área de 1 hectare (m <sup>2</sup> )
$A_{muda}$	Área ocupada por 1 muda (m <sup>2</sup> )
$V_{mudas}$	Volume de produção de madeira para 1 muda de eucalipto (m <sup>3</sup> )
$V_{hectare}$	Volume de produção de madeira para 1 hectare (m <sup>3</sup> )
$A_{plantio}$	Área de plantio total (m <sup>2</sup> )
$\%A_{diferença}$	Diferença percentual da área de plantio
$m_{CO_2 Stock}$	Massa de CO <sub>2</sub> capturada(ton)
$m_{CO_2 BAG}$	Captura do gás pela biomassa acima do solo (ton)
$m_{CO_2 Root}$	Captura do gás pela biomassa abaixo do solo (ton)
$E_{CO_2, pirólise}$	Emissões de CO <sub>2</sub> por pirólise da madeira
$E_{CO_2, atual}$	Emissões de CO <sub>2</sub> com somente antracito (ton de CO <sub>2</sub> por ton de pelota)
$E_{CO_2, sub}$	Emissões de CO <sub>2</sub> com carvão vegetal (ton de CO <sub>2</sub> por ton de pelota)

$x_{cv}$	Concentração de carvão vegetal substituída
$f_{q,cv}$	Fator de emissão da queima de carvão vegetal
$f_{q,cv}$	Fator de emissão da queima de antracito
$E_{saldo}$	Saldo total de emissões de CO <sub>2</sub> (ton de CO <sub>2</sub> por ton de pelota)
$\%E_{diferença}$	Diferença percentual nas emissões

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Objetivo .....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. Produção de minério de ferro .....	14
2.2. Pelotização.....	19
2.3. Produção e importação de carvão mineral.....	23
2.4. Produção de carvão vegetal .....	24
3. METODOLOGIA.....	26
3.1. Emissões de minério de ferro .....	26
3.1.1. Aglomeração do minério .....	27
3.1.2. Transporte do carvão mineral .....	28
3.2. Emissões e neutralização de carvão vegetal.....	29
3.2.1. Volume de eucalipto necessário .....	30
3.2.2. Área de plantio necessária .....	30
3.2.3. Captura de emissões pelas monoculturas de eucalipto.....	32
3.2.4. Emissões relacionadas a carbonização do eucalipto.....	33
3.3. Saldo de emissões .....	33
4. RESULTADOS .....	34
4.1. Emissões de minério de ferro .....	34
4.1.1. Aglomeração do minério .....	34
4.1.2. Transporte do carvão mineral .....	34
4.2. Emissões e neutralização de carvão vegetal.....	37
4.2.1. Volume de eucalipto necessário .....	37
4.2.2. Área de plantio necessária .....	37
4.2.3. Captura de emissões pelas monoculturas de eucalipto.....	39
4.2.4. Emissões relacionadas a carbonização do eucalipto.....	39
4.3. Saldo de emissões .....	41
5. CONCLUSÕES .....	42
6. REFERÊNCIAS .....	44

## 1. INTRODUÇÃO

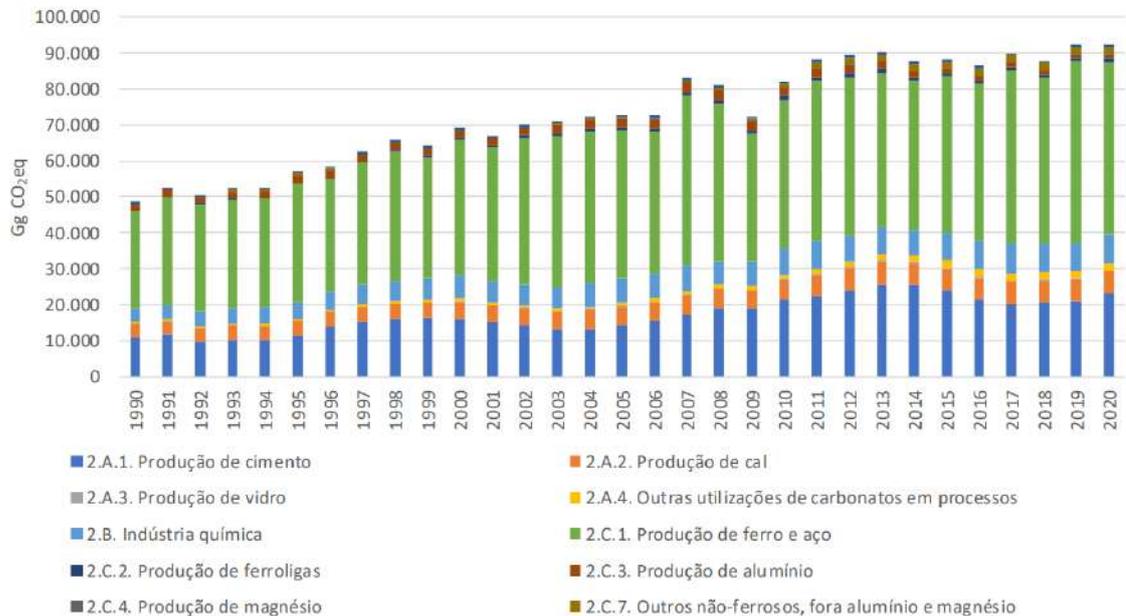
O Brasil é um dos maiores produtores de minério de ferro no mundo, sendo esse comercializado em diferentes tipos de aglomerados. O processamento da maioria dos minérios, incluindo o de ferro, pode ser dividido em etapas, sendo algumas delas: extração; moagem; peneiramento; concentração e aglomeração (CETEM, 2018).

Entretanto, a mineração gera impactos ambientais que devem ser considerados e mitigados. Dentre esses impactos, pode-se exemplificar a emissão de CO<sub>2</sub> gerada pela queima de combustíveis sólidos provenientes de fontes fósseis no processo de aglomeração dos finos do minério de ferro, sendo o mais comum desses a pelletização, na qual o minério de granulometria menor que 0,15 mm é transformado em esferas na faixa de 8 a 18 mm de diâmetro. A história da pelletização de minérios de ferro teve início em 1911, na Suécia, com A.G. Andersson, que inventou esse processo de aglomeração. Industrialmente, a pelletização desenvolveu-se a partir dos anos de 1950, nos Estados Unidos da América (MOURÃO, 2017). O principal fator que contribuiu com o desenvolvimento deste processo, foi a escassez do minério de ferro de alto teor, permitindo a criação de uma nova rota de uso para os finos das plantas de beneficiamento.

De acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações em seu relatório de Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil de 2022 (Figura 1.1), a subcategoria dentro do setor de IPPU, que é o setor industrial que engloba os procedimentos que geram gases do efeito estufa em processos industriais, a produção de ferro e aço é o subsetor que apresentou o maior peso dentro das demais áreas e com crescimento constante no período de 1990 a 2020. Sendo grande parte dessas emissões decorrentes principalmente da queima de carvão sólido tanto nas etapas de aglomeração na indústria de mineração, quanto sua utilização na siderurgia do minério de ferro.

Além disso, existem outras emissões que normalmente não são contabilizadas nos estudos quando somente se considera os processos industriais, sendo estas referentes ao transporte do insumo, que apresentam suas maiores reservas naturais em locais distantes do Brasil. Precisando, assim, ser considerada também as emissões geradas pela queima de combustível líquido utilizado no transporte do carvão mineral.

**Figura 1.1 – Emissões de CO<sub>2</sub> do setor IPPU, por subsetor, de 1990 a 2020.**



Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil, 2022.

Dessa maneira, torna-se importante o estudo de maneiras de reduzir o impacto dessa etapa do processamento. Uma possível solução que vem sendo estudada a viabilidade técnica de aplicação, é a utilização de uma porcentagem de carvão vegetal como combustível sólido no processo de pelletização (Braga et al, 2017 e 2019). Tal substituição apresentaria uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> devido ao período de crescimento da matéria orgânica que é transformada em carvão vegetal ao realizar fotossíntese, consumindo CO<sub>2</sub> e gerando O<sub>2</sub>.

Com base nos relatórios da *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 2021, a produção global de carvão vegetal, proveniente da madeira florestal, atingiu o marco de 54 milhões de toneladas em 2019, sendo o Brasil, o maior produtor mundial, gerando 6,5 milhões de toneladas/ano. Segundo dados da Tavares, 2023, no país, o carvão vegetal equivale a cerca de 8,7% da matriz energética vigente.

Atualmente, o processo de produção de ferro-gusa, utiliza o carvão vegetal como combustível nos altos fornos e como agente químico em procedimentos de oxirredução, reforçando a posição do Brasil como maior produtor de carvão vegetal (ANATER, 2022), tendo à disposição uma extensão de 7 milhões de hectares de florestas plantadas para uso. Porém, devido a produção de carvão vegetal no país ser muito rudimentar, torna-se igualmente relevante abordar os métodos de obtenção deste insumo, de modo a não incentivar à expansão de monoculturas, impactando a biodiversidade local.

### 1.1. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é realizar um levantamento logístico para a utilização de carvão vegetal como parte do combustível sólido utilizado na pelletização do minério de ferro, visando uma diminuição da liberação geral de CO<sub>2</sub>.

Os pontos de pesquisa abrangidos foram:

- Emissões de CO<sub>2</sub> considerando o processo de pelletização e o transporte de carvão mineral;
- Redução de emissões de CO<sub>2</sub> das etapas, considerando as etapas de plantio e pirólise;
- Saldo de emissões fazendo a substituição parcial do carvão vegetal;
- Necessidade de área de plantio e do crescimento da produção atual de carvão vegetal para sustentar essa demanda.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. PRODUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

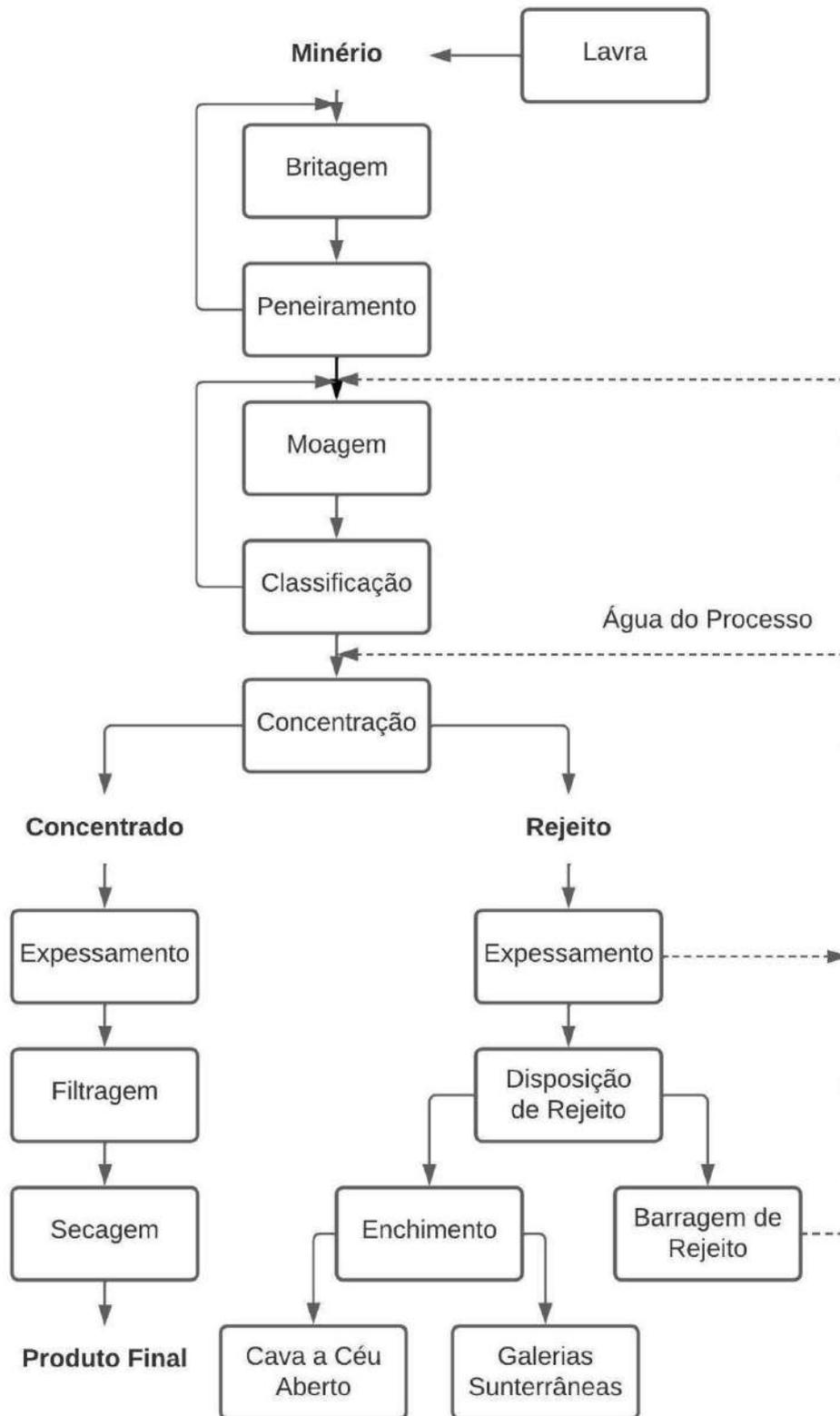
Como pode ser exemplificado no fluxograma abaixo, a operação de extração e beneficiamento para a maioria dos minerais pode ser dividido nas seguintes etapas (CETEM, 2018):

- Britagem e Moagem: A fragmentação no beneficiamento de minérios é um conjunto de técnicas para reduzir sólidos de tamanho específico em fragmentos menores. Isso é feito por ação mecânica externa e, às vezes, interna. O objetivo é liberar minerais valiosos de minerais de ganga em materiais heterogêneos, como rochas, ou reduzir minerais homogêneos para o tamanho necessário. A operação de fragmentação abrange vários estágios, desde a mineração até a preparação para etapas industriais subsequentes. Na mineração, o uso de explosivos faz a quebra inicial do minério em blocos de tamanho adequado para britagem. A britagem fragmenta esses blocos, e diferentes equipamentos podem ser usados em várias repetições para obter o material certo para a moagem. A moagem é responsável pela fragmentação fina e produz um produto adequado para concentração ou outros procedimentos industriais.
- Classificação e Peneiramento: As operações de processamento de minérios que envolvem classificação e peneiramento têm em comum o objetivo de separar um determinado material em duas ou mais frações, com partículas de tamanhos diferentes. No caso do peneiramento, essa separação é realizada com base no tamanho geométrico

das partículas, enquanto na operação de classificação, a separação é feita considerando a velocidade com que os grãos atravessam um meio fluido específico. No processamento mineral, a água é frequentemente o meio fluido utilizado. A classificação a úmido é empregada principalmente para partículas de granulometria muito fina, nas quais o peneiramento não é eficaz.

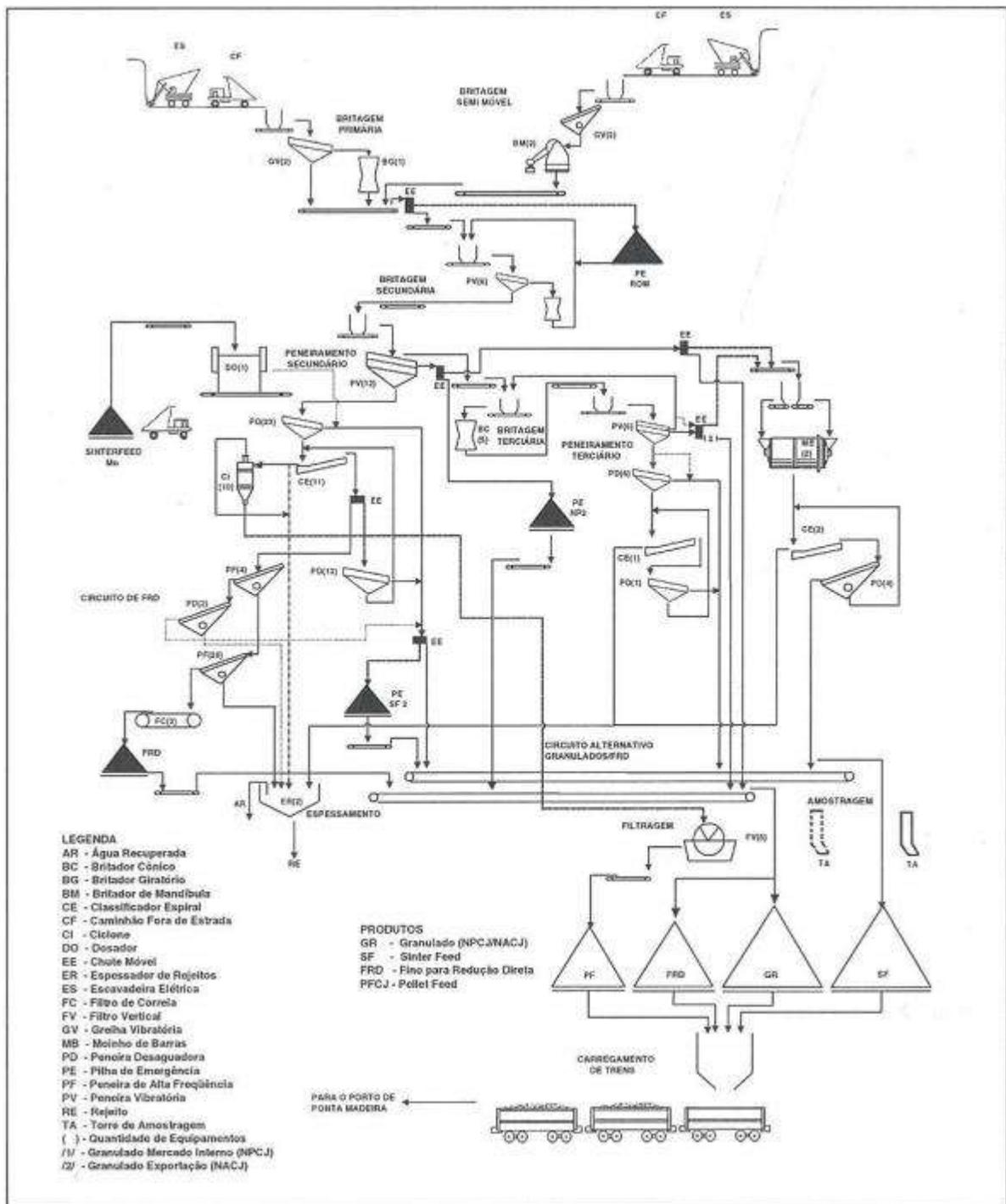
- **Concentração:** Podem ser feitos diferentes procedimentos físicos com o mineral para aumentar o teor de ferro dependendo principalmente das características físicas da amostra, como por exemplo, sua composição e qual a faixa de granulometria peneirada na etapa anterior. Seguem alguns mais comuns.
  - **Concentração gravítica:** Se baseia nos princípios de aceleração diferencial, sedimentação retardada, velocidade diferencial em escoamento laminar, consolidação intersticial e ação de forças cisalhantes para realizar a separação de partículas com composições diferentes por meio de forças gravitacionais ou centrífugas.
  - **Separação por meio denso:** Se baseia na diferença de densidade entre partículas com diferentes teores de diferentes minerais, separando por meio da adição de uma solução líquida de densidade intermediária, criando fases diferentes com porcentagem de ferro diferentes.
  - **Separação magnética e eletrostática:** Se baseia no princípio da suscetibilidade magnética dos diferentes minerais para realizar a separação de partículas por meio da aplicação de um campo magnético.
  - **Flotação:** Se baseia em diversas propriedades químicas superficiais que são utilizadas para realizar a separação por meio do arraste de algumas partículas específicas, podendo ser adicionadas substâncias depressoras e surfactantes, que auxiliam na separação.
- **Agregação:** Os finos são transformados em aglomerados do minério por meio de processos como pelotização, sinterização etc., sendo estas compostas por três principais etapas, sendo essas: espessamento, filtragem e secagem. A pelotização será estudada mais profundamente a seguir.
- **Barragem de Rejeitos:** Os rejeitos provenientes das etapas de concentração de minério têm como possíveis destinos barragens de minério, cavas a céu aberto ou galerias subterrâneas dependendo do mineral e dos processamentos realizados.

**Figura 2.1 – Diagrama típico de processamento de minério.**



Segue o fluxograma da planta de extração e beneficiamento de minério de ferro na operação de Carajás da Vale:

**Figura 2.2 – Fluxograma do beneficiamento do minério de Ferro de Carajás.**



Fonte: Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil; CETEM; 2001.

A Figura 2.2, demonstra as etapas do beneficiamento de minério de ferro realizadas na mina de Carajás, que é a maior mina desse minério no mundo e se localiza no estado do Pará. Como pode ser exemplificado na imagem, o início do procedimento de beneficiamento do minério começa com a sua britagem, que no exemplo é feita em três etapas (CETEM, 2001):

- Britagem primária: Sendo essa dividida em modalidades parcialmente fixa e semimóvel. Em ambas o minério é descarregado em uma grelha vibratória, a diferença é que na britagem fixa o *oversize* da grelha segue para britador giratório e o *undersize* da grelha segue para a descarga do britador, enquanto na britagem semimóvel o produto de um britador de mandíbulas se junta a grelha, sendo transportado por uma correia transportadora.
- Britagem secundária: Etapa seguinte no qual o minério é dividido em peneiras na qual as granulometrias acima de 75 mm passam por três britadores cônicos, com abertura de 60 mm. A fração passante segue para o peneiramento secundário.
- Britagem terciária: Nessa etapa é cominuído o passante do peneiramento secundário, que tem granulometria acima de 25 mm. Para isso são utilizados cinco britadores cônicos com abertura entre 28 e 32 mm.

Na saída dos britadores o mineral passa por diversas instalações de peneiramento e moagem dependendo da granulometria resultante dos procedimentos anteriores. Como pode ser visto na Figura 2.2, o produto da britagem secundária segue por correias de transporte que alimentam peneiras de via úmida, onde o material retido segue para a britagem terciária enquanto o passante segue para um círculo de peneiras vibratórias que separam o *sinter feed*, com granulometria acima de 1,00 mm que segue os classificadores espirais duplos. O *underflow* dos classificadores são partículas com granulometria acima de 0,15 mm, que podem seguir tanto para peneiras desaguadoras ou para o procedimento de redução direta de finos, enquanto o *overflow* do classificador alimenta as baterias de hidrociclones, que por sua vez separam a fração grossa para a produção de *pellet feed* e a fração fina para espessadores de rejeito. Além disso, os produtos da britagem terciária seguem para um conjunto de peneiras classificadoras nas quais o material retido na primeira peneira retorna para a britagem terciária, o retido na segunda peneira segue para o armazenamento de material granulado e o passante dessa segue para seis peneiras desaguadoras.

Quando necessário, ocorre também a moagem do granulado em dois moinhos de barras, com o produto dessa etapa seguindo para dois classificadores espirais duplos que separa a fração

grossa para passar por mais um peneiramento, que, por sua vez, separa o material retido para a produção de *sinter feed* e o passante para os classificadores.

Em seguida, são utilizadas instalações de finos para redução direta que é alimentada pelo *underflow* dos classificadores espirais por meio de um divisor de fluxo e a sua polpa segue para quatro peneiras de alta frequência com tela de 1 mm. O material retido nessas peneiras passa por mais duas peneiras desaguadoras e o passante dessas segue para o espessante de rejeito, enquanto o material passante segue para mais vinte peneiras de alta frequência, que, por sua vez, tem o seu material retido seguindo para três filtros horizontais e o passante segue para o espessador de rejeito. Nos filtros a umidade é reduzida para 10%, de maneira que possibilita o transporte por correias transportadoras para a pilha de rejeito.

A última etapa de beneficiamento na planta é a filtragem do *pellet feed* a partir das correntes de saída do *underflow* dos hidrociclones, alimentados pelo *overflow* dos classificadores espirais. Essa polpa passa por uma agitação em dois tanques agitadores que controlam a densidade da mistura por meio da adição de água quando necessário. Em seguida, o material passa por cinco discos tipo Agidisc tendo como produto uma torta com umidade de 11%, que é transportada, por meio de correias transportadoras, para dois circuitos de estocagem. Existem duas opções de estoque, sendo um deles uma pilha cônica formada pela deposição do minério sendo transportado por uma lança fixa, enquanto a outra opção é feita transportando o minério com o auxílio de uma empilhadeira, formando uma área de depósito plana.

Na planta exemplificada, todas as frações retiradas que não vão para a pelotização do minério de ferro têm como destino barragens onde parâmetros como as vazões de efluentes e água, corpo estrutural da barragem, nível de permeabilidade da parede são monitoras e são feitas análises periódicas na água e solo do local.

## 2.2. PELOTIZAÇÃO

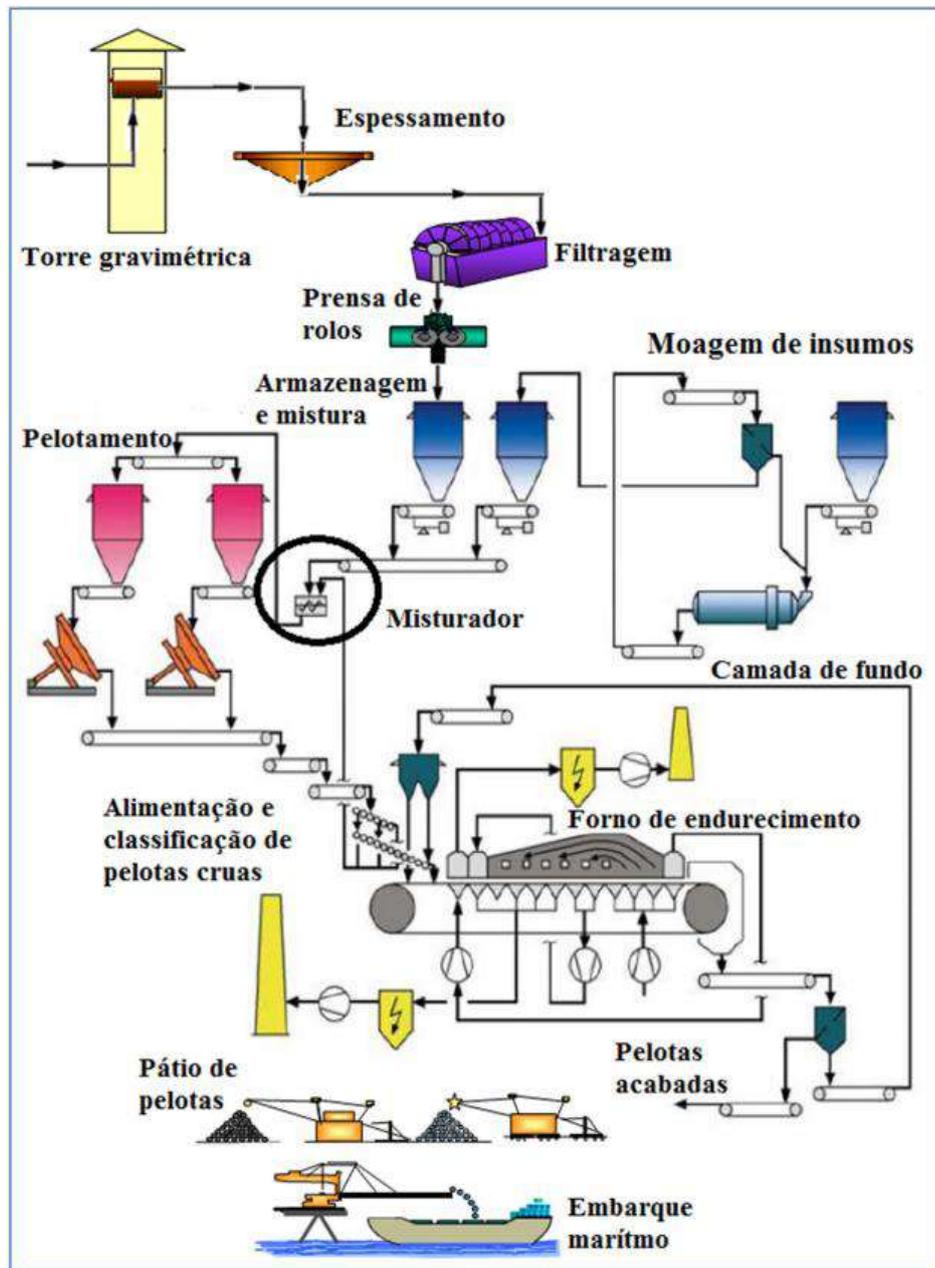
A produção de minério de ferro, durante as etapas de lavra, classificação, manuseio e transporte, gera uma quantidade elevada de partículas finas e ultrafinas, cuja aplicação direta na indústria siderúrgica é impraticável (ALMEIDA, 2014). Visando aproveitar esses resíduos, processos de aglomeração foram desenvolvidos com tempo, de forma a obter materiais de dimensionamento e qualidade, adequados aos alto-fornos da siderurgia.

A pelotização é definida pela transformação de uma fração fina de granulometria do minério de ferro (*pellet feed*), com granulometria entre 0,150 mm e 0,037 mm (PRAES, 2018), em esferas de diâmetro da ordem de 8,0 a 18,0 mm (PEREIRA, 2016) por meio da adição de aditivos, a ação de discos pelotizadores e a combustão a altas temperaturas.

O processo de pelletização do minério de ferro pode ser dividido em etapas (Figura 2.3), sendo essas definidas por Praes, 2018 como:

- Torre gravimétrica e espessamento: O minério pode chegar como polpa ou seco, no primeiro caso ele é transportado em um mineroduto e segue diretamente para uma Torre Gravimétrica, onde ele é espessado, ou seja, o teor de sólidos em sua descarga é aumentado. No caso dele chegar por meio de ferrovias ele vai estar despolpado e pode ser armazenado, moído e prensado antes de seguir para o espessamento.
- Filtragem: Os sólidos em suspensão são retirados por meio da utilização de meio filtrante poroso que permite a percolação da fase líquida.
- Prensagem de rolo e/ou moagem de bola: Etapa que confere a granulometria necessária, entre 0,150 mm e 0,037 mm, que é a faixa preferencial para o minério seguir para o processo de pelletização. A prensagem de rolo apresenta melhores resultados em relação às características das pelotas tais como maior resistência, menor porosidade e melhor acabamento superficial, além de gastar menos energia.
- Preparação de matérias primas e mistura: Moagem do carvão e calcário e adição desses, juntos ao aditivo aglomerante, que pode ser orgânico ou inorgânico, ao minério de ferro, em seguida a mistura é homogeneizada e pode seguir para o pelletização.
- Pelotização: Etapa em que a mistura é alimentada aos discos pelletizadores para a produção de pelotas cruas, ou seja, ainda não secas. A granulometria e o formato do minério passante nas etapas anteriores têm grande influência na resistência da pelota final, o que é um indicador importante para a sua futura utilização em procedimentos metalúrgicos.
- Forno de endurecimento: É a etapa onde ocorre a retirada da umidade da pelota crua por meio da aplicação de elevadas temperaturas e, também, onde ocorrem as reações características do processo que têm como objetivo produzir pelotas com as especificidades necessárias de resistência e outras propriedades para procedimentos metalúrgicos futuros. Ela ocorre em um forno de grelha móvel.

**Figura 2.3 – Fluxograma de processo de Pelotização.**



Fonte: Substituição Parcial de Finos de Antracito por Carvões Vegetais de Eucalipto na Pelota Crua de Minério de Ferro em Forno de Grelha Móvel; Praes; 2018

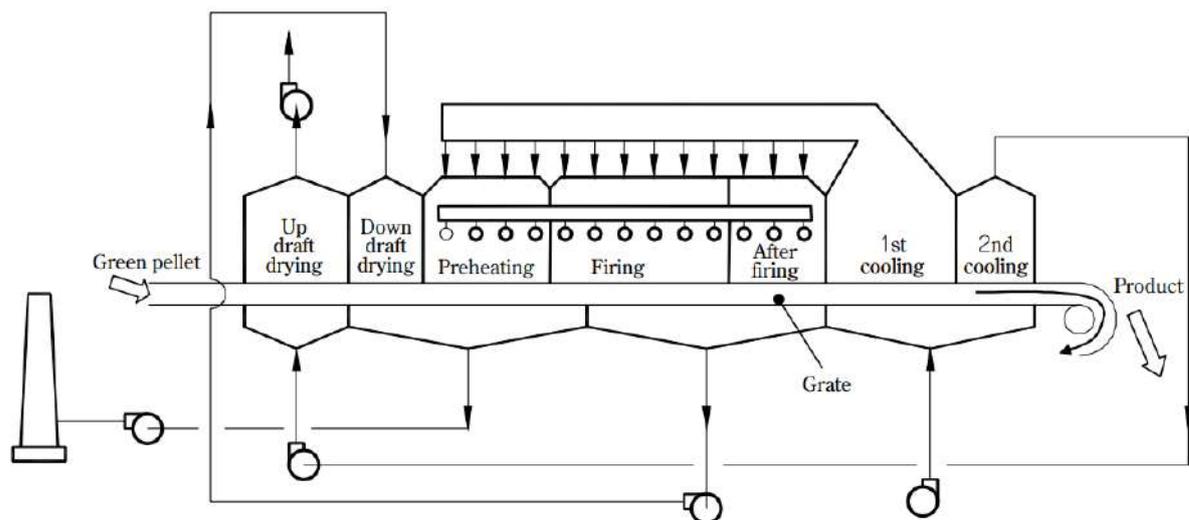
Considerando essa segmentação, entende-se que o insumo do carvão é utilizado somente no processo de pelotização da mistura. Dessa maneira, o foco do estudo realizado será em cima da queima realizada no forno de endurecimento.

Como mencionado anteriormente, para esse processo, é utilizado um forno de grelha móvel (Figura 2.4) que constitui no próprio forno e em vários equipamentos periféricos que

fazem a classificação granulométrica das pelotas cruas que entram, transportando, por meio de esteiras, as pelotas para as diferentes regiões do forno. Nesse sistema são realizadas as etapas:

- Secagem: primeira etapa onde as reações ocorrem em duas fases uma com o fluxo ascendente de gás quente e outra com o fluxo descendente, ocorrem as reações de liberação de água (faixa de temperatura de 300°C a 400°C);
- Pré-queima: ocorre um aquecimento progressivo, onde ocorrem reações de oxidação e escorificação (faixa de temperatura de 500°C a 1200°C);
- Queima: a temperatura é elevada para 1350°C, permitindo reação com calcário e o endurecimento das pelotas;
- Resfriamento, onde a temperatura das pelotas é gradativamente reduzida para evitar trincas (PRAES, 2018).

**Figura 2.4 – Sistema de um Forno de Grelha Móvel**



Fonte: *KOBELCO Pelletizing Process*; Yamaguchi, S. et al; 2010

Visando manter os mesmos padrões de qualidade para as pelotas produzidas, com a adição de carvão vegetal, não é recomendado que seja feita a troca total do combustível sólido, podendo ter pioras nos valores de tamboramento e abrasão com o aumento das dosagens (PRAES, 2018), além de ter maiores acúmulos nas paredes dos equipamentos de pelletização, o que acarreta problemas operacionais. Segundo Braga et al, a concentração recomendada da adição desse insumo é de cerca de 33%. Entretanto, empresas como a Vale S.A. divulgaram que estão realizando pesquisas sobre o tema e que acreditam que seja possível a de 50%.

### 2.3. PRODUÇÃO E IMPORTAÇÃO DE CARVÃO MINERAL

Carvão mineral é a nomenclatura fornecida a rochas sedimentares passíveis de uso como combustível e constituídas de um material heterogêneo originado de compostos orgânicos, protegidos da ação do oxigênio do ar. Quimicamente, o carvão consiste em uma mistura não uniforme de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre entre outros elementos (PEREIRA, 2016).

A matéria orgânica é convertida em combustível sólido por ação de pressão e temperatura, em decorrência de soterramento e atividade orogênica. A carga orgânica, ao longo do tempo geológico, se solidifica, perdendo material volátil e preservando o carbono original, em um processo denominado carbonificação. A exposição de maiores temperaturas e pressão, por tempos mais duradouros, aumenta o grau de carbonificação da rocha sedimentar, assim como a qualidade do carvão (BORBA, 2001).

A série evolutiva da matéria orgânica pela carbonificação pode ser dividida em quatro partes: turfa, linhito, hulha e antracito. Tipicamente, nos processos de pelletização, o antracito é o combustível sólido mais empregado devido ser uma variedade compacta e dura do carvão mineral, contendo pouco betume e sendo composto majoritariamente de carbono (PEREIRA, 2016).

No Brasil, não há produção de antracito de alta qualidade, de forma que é adquirido via importação, devido sua grande disponibilidade no mercado mundial. Esse combustível, ao ser adicionado junto às pelotas cruas, acelera a etapa de queima e aumenta a sua porosidade, beneficiando a redutibilidade das pelotas e seu desempenho nos reatores de redução das siderurgias. Adicionalmente, proporciona ainda, significativa redução do consumo de combustíveis externos, como o óleo combustível ou gás natural do forno.

Para a sua utilização, o antracito precisa de uma rigorosa análise em sua composição, para que a variação de seus parâmetros não influencie negativamente a cinética da combustão e no desempenho da produção de pelotas. Somado a isso, os teores de cinzas e de enxofre devem ser estritamente controlados, pois adicionam elementos e óxidos indesejáveis na pelota, impactando na degradação do meio ambiente (MOURÃO, 2017).

**Tabela 2.1 - Composição típica do antracito utilizado na pelletização**

Carbono fixo (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)	Poder Calorífico (kcal/kg)
69,0	12,0	20,0	1,2	6600

Fonte: Aspectos Conceituais Relativos à Pelotização de Minérios de Ferro; Mourão; 2017

#### 2.4. PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

A madeira tem um papel importante no Brasil como fonte de energia desde o período colonial. As florestas brasileiras cobrem 487 milhões de hectares e correspondem a aproximadamente 12,2% do total de florestas naturais do mundo (OLIVEIRA et al, 2022).

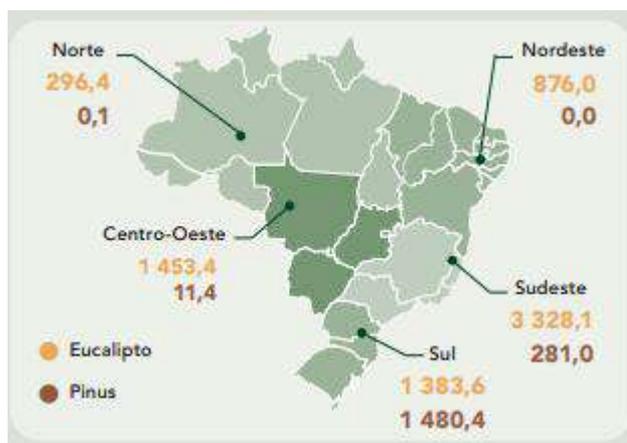
Mesmo com a industrialização e a introdução de combustíveis fósseis, a lenha de origem nativa e plantada, junto do carvão vegetal, continuam sendo uma fonte importante de energia nas residências e no setor produtivo brasileiro, representando 8,7% do total da oferta de energia (EPE, 2022). Nesse contexto o Brasil assume posição importante por ser o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, sendo o setor siderúrgico responsável por cerca de 87,1 % do consumo do país em 2022 (ANATER, 2022).

A obtenção do carvão vegetal ocorre por meio do processo de pirólise da biomassa, em ambientes com ausência ou presença controlada de oxigênio. No Brasil, a matéria orgânica majoritariamente utilizada é o eucalipto, em fornos de alvenaria através de procedimentos dispersos, pouco mecanizados e altamente dependentes do trabalho humano. A pirólise ocorre por meio da decomposição termoquímica da celulose em produtos variados como: metano, hidrogênio, dióxido de carbono, monóxido de carbono, vapor da água, fenol, ácido acético e benzeno (Praes, 2018).

De acordo com o Embrapa, 2019, o gênero de planta *Eucalyptus* tem a sua origem na Austrália, Tasmânia e outras ilhas da Oceania, existindo cerca de 730 espécies reconhecidas, porém, apenas 20 são utilizadas para fins comerciais. Dentre elas, a espécie mais plantada no Brasil é a *Eucalyptus grandis*.

As áreas de plantios florestais com eucalipto no Brasil estão distribuídas em todo território nacional (Figura 2.5), somando um total 7,3 milhões de hectares, equivalente a 77,3% das áreas cultivadas com florestas plantadas para fins comerciais. Entre as regiões do país, a região Sudeste (45,4%) apresenta maior quantidade de áreas de eucalipto plantadas, seguida pelas regiões, Centro-Oeste (19,8%), Sul (18,9%), Nordeste (11,9%) e Norte (4,0%) (IBGE, 2022).

**Figura 2.5 – Área ocupada pela silvicultura, por grupos de espécies florestais (mil ha)**



Fonte: Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura. IBGE; 2022

De forma geral, espécies de eucalipto têm sido preferencialmente utilizadas como fonte econômica devido ao seu rápido crescimento, em média de 40 m<sup>3</sup> por hectare em ciclos de corte de 7 a 8 anos e capacidade de adaptação às diversas regiões ecológicas (EMBRAPA, 2019).

Atualmente, o carvão vegetal é produzido por meio de tecnologias primitivas, com baixo controle operacional e baixa eficiência do processo. Além disso, o emprego dos fornos mais comumente usados liberam milhares de toneladas de componentes químicos em emissões de gases e bio-óleo. Neste procedimento de carbonização, os rendimentos gravimétricos podem variar de 30% a 40% (DUBOC et al, 2007).

A produção de carvão vegetal pode adotar sistemas contínuos ou descontínuos. Os sistemas descontínuos são os mais comuns, nos quais o calor necessário para a pirólise é geralmente gerado pela queima de uma porção da própria matéria-prima e seus subprodutos. Embora os sistemas contínuos sejam mais eficientes, sua aplicação é limitada devido aos custos elevados e à sofisticação tecnológica exigida. Em termos gerais, os fornos utilizados na produção de carvão vegetal podem ser classificados em três categorias: primitivos, convencionais e metálicos.

Os fornos primitivos, embora de construção simples e baixo custo, apresentam desvantagens como baixo rendimento, dependência intensiva de mão de obra e dificuldade no monitoramento da carbonização. Geralmente adotados por famílias de baixa renda, esses fornos são destinados ao consumo próprio, substituindo a lenha.

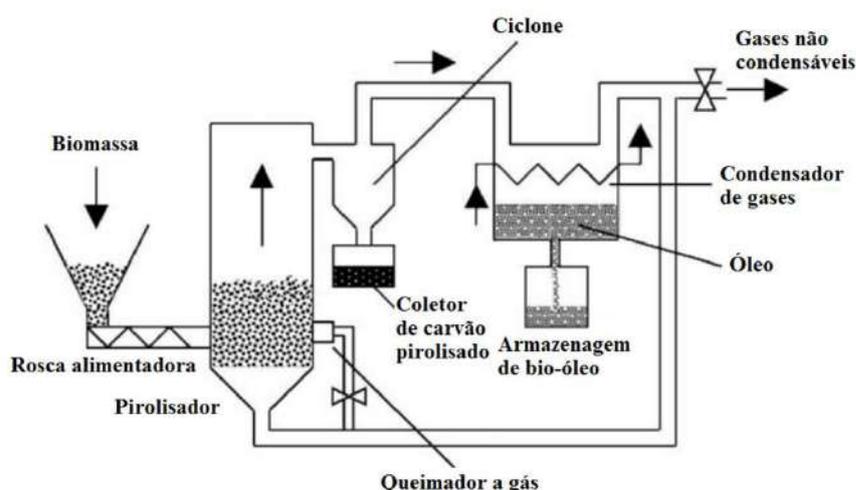
Os fornos convencionais, construídos em alvenaria, são amplamente utilizados no país devido à facilidade de construção e baixo investimento necessário. Incluem modelos cilíndricos e retangulares, sendo comumente empregados em contextos industriais. Sua capacidade de

transformação de madeira varia de 7 m<sup>3</sup> (rabo-quente) a 70 m<sup>3</sup> (circulares), com ciclos de carbonização entre sete e doze dias, respectivamente.

O forno retangular, preferido por grandes produtores de carvão vegetal no Brasil, é construído com tijolos especiais e estruturas em aço. Destaca-se pelo descarregamento e abastecimento automáticos, podendo carbonizar volumes equivalentes a 700 estéreis de madeira por batelada. Seu ciclo total de produção varia de 13 a 18 dias, proporcionando um rendimento gravimétrico de 32% a 35%. Esses fornos são concentrados principalmente na região sudeste do Brasil, onde há maior produção de carvão vegetal a partir de florestas plantadas.

Por fim, os fornos metálicos podem ser do tipo batelada (portáteis), caracterizados por grandes perdas térmicas e baixa eficiência, ou do tipo retorta, que possuem elevada capacidade e eficiência, sendo empregados em larga escala na indústria (ANATER, 2022).

**Figura 2.6 – Esquema simplificado de uma planta de pirólise**



Fonte: Substituição Parcial de Finos de Antracito por Carvões Vegetais de Eucalipto na Pelota Crua de Minério de Ferro em Forno de Grelha Móvel; Praes; 2018.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. EMISSÕES DE MINÉRIO DE FERRO

Em 1998, a iniciativa GHG Protocol foi desenvolvida, como uma forma de padronizar a quantificação de emissões compatíveis com a norma ISO 14.064. Sua metodologia se resume no registo e publicação de Inventários de Emissões de Gases do Efeito Estufa, permitindo a

análise das difusões de GEEs para negócios e operações, e o desenvolvimento de projetos para mitigação destes.

O primeiro passo para calcular as emissões de CO<sub>2</sub> e demais gases do efeito estufa, é categorizar as fontes de dentro dos limites dos procedimentos. As emissões de GEE normalmente ocorrem nas seguintes categorias de fontes:

- Combustão estacionária: combustão de combustíveis em equipamentos estacionários como caldeiras, fornos, queimadores, turbinas, aquecedores, incineradores, motores, *flares*, etc.
- Combustão móvel: combustão de combustíveis em dispositivos de transporte como automóveis, caminhões, ônibus, trens, aviões, barcos, navios, barcaças, embarcações etc.
- Emissões de processo: emissões de processos físicos ou químicos, como CO<sub>2</sub> da etapa de calcinação na fabricação de cimento, CO<sub>2</sub> do craqueamento catalítico no processamento petroquímico, emissões de PFC da fundição de alumínio etc.
- Emissões fugitivas: liberações intencionais e não intencionais, como vazamentos de equipamentos em juntas, vedações, embalagens, gaxetas, bem como emissões fugitivas de pilhas de carvão, tratamento de águas residuais, poços, torres de resfriamento, instalações de processamento de gás etc.

Para a análise neste trabalho, em que está sendo examinada a emissão de CO<sub>2</sub> que o combustível sólido provoca no processo de pelletização, serão focadas as emissões atreladas a combustão estacionária, emissões de processo e combustão móvel de antracito. Estas emissões serão calculadas com base nas quantidades adquiridas do combustível.

Obtendo-se as emissões de GEE para cada tipo de fonte aplicável ao procedimento, determina-se a emissão total para cada tipo de gás de efeito estufa. Emissão essa que pode ser comparada com a emissão de outras fontes de combustíveis, para o mesmo procedimento, como o carvão vegetal.

### 3.1.1. AGLOMERAÇÃO DO MINÉRIO

Para calcular a emissão de CO<sub>2</sub> gerados no processo de aglomeração de minério de ferro por pelletização, pode ser utilizado os dados Relato Integrado e o Relatório de Produção e Vendas de 2022 disponibilizado pela Vale S.A. utilizando as seguintes equações de proporcionalidade com os dados de emissão total de CO<sub>2</sub> da empresa, porcentagem relativa ao processo de pelletização e a massa total de pelotas produzidas no ano de 2022:

$$m_{CO_2, pel} = m_{CO_2, tot} * \%_{pel} \quad (3.1)$$

$$E_{CO_2, pel} = \frac{m_{CO_2, pel}}{m_{pel}} \quad (3.2)$$

### 3.1.2. TRANSPORTE DO CARVÃO MINERAL

Os gases emitidos pelo transporte de carvão podem variar muito dependendo do local de transporte, das especificidades do meio de transporte (principalmente o tipo de transporte e o porte de carga) e das características do combustível utilizado.

A metodologia desenvolvida pela Clean Cargo Working Group em parceria com a BRS para o cálculo de emissões atmosféricas provenientes da importação de antracito, quando utilizada de maneira simplificada, uma vez que não é disponível as informações dos navios utilizados consistem em:

- Mapear as rotas;
- Identificar o número de contêineres em cada rota;
- Identificar a distância referente a cada rota (adicionando uma margem de 15%);
- Multiplicar o fator emissões médias da rota pelo número de containers;
- Adicionar as emissões de CO<sub>2</sub> equivalentes.

Dessa maneira, para mapear as rotas e o cálculo do trajeto do transporte foi feita uma estimativa a partir dos dados de quantidade de importação de carvão mineral por país no Comex Stat para o ano de 2022 e da distância média entre os principais portos nesses países e para o porto de Santos, que é um dos maiores portos no Brasil e é um dos mais pertos da região com a maiores reservas e, portanto, produção de minério de ferro, em Minas Gerais.

Essa metodologia permite que um contêiner tenha um volume estimado de 10 toneladas e os dados de fator de emissão são disponibilizados no relatório de 2020 Global Container Shipping Trade Lane Emissions Factors dos desenvolvedores do método.

O fator de emissões é tabelado a partir de um cálculo anual que a organização CCWG faz a partir da coleta de dados como os tipos de navios e combustíveis utilizados para os trajetos entre diferentes regiões.

A partir disso, os dados de emissões de todo o carvão mineral transportado em um ano podem ser realizados por meio da multiplicação dos fatores, como demonstrado abaixo:

$$m_{CO_2} = n_{containers} * 1,15 * d * f_{CO_2} \quad (3.3)$$

Dessa maneira, pode-se fazer a análise por toneladas de antracito transportado para o Brasil pelo cálculo:

$$E_{CO_2,trans} = \frac{m_{CO_2,trans}}{m_{CS}} \quad (3.4)$$

Entretanto, essa massa de carvão importada não é toda utilizada no processo de pelotização do minério de ferro. Assim, para quantificar anualmente as emissões de CO<sub>2</sub>, foi utilizada a metodologia de Mourão, 2017, que faz um balanço de massa para todas os componentes e aditivos das reações desse procedimento e utiliza a ferramenta do Microsoft Excel para chegar em um resultado de 14,62 toneladas de combustível sólido por tonelada de pelota útil gerada. Assim, encontra-se a emissão do transporte pela produção de pelotas:

$$m_{cs,pel} = m_{tot,pel} * \frac{m_{cs}}{m_{pel}} \quad (3.5)$$

$$E_{CO_2,trans} = \frac{m_{CO_2,trans}}{m_{CS}} * \frac{m_{cs}}{m_{pel}} \quad (3.6)$$

Utilizando como dado de produção de pelotas de ferro brasileira de 2021, divulgada pelo Mineral Data, que é uma plataforma do CETEM em parceria com a Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral do Ministério de Minas e Energia, é possível calcular a produção de antracito utilizado para o ano de 2021, informação que é importante para os cálculos dos tópicos seguintes. A equação utilizada para esse cálculo é:

$$m_{cs} = E_{CO_2,trans} * m_{pel} \quad (3.7)$$

### 3.2. EMISSÕES E NEUTRALIZAÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

A obtenção de biomassa para a produção de carvão vegetal pode ser proveniente de diversas fontes. De acordo com a publicação da Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura, 2022 (IBGE, 2022), 25,6% da produção da silvicultura foi destinada à produção deste combustível, sendo 98,8% proveniente de plantios de eucalipto.

Nos plantios, as espécies florestais são cultivadas em ecossistemas semelhantes a florestas, como forma de obter madeira. Estes sistemas podem contribuir para a mitigação das alterações climáticas globais, uma vez que o carbono é armazenado em todas as partes da espécie plantada, sendo seu poderio de armazenamento aumentado com o seu crescimento.

### 3.2.1. VOLUME DE EUCALIPTO NECESSÁRIO

Com base em um comunicado técnico publicado pelo Embrapa (LIMA et al, 2012) o índice de conversão médio de lenha para carvão vegetal é equivalente a 2,4. Ou seja, para cada 2,4 metro estéreo de eucalipto da espécie *E. benthamii*, é possível obter 1 metro de carvão vegetal (mdc).

O metro estéreo é uma unidade de medida usada para medir o volume da lenha empilhada. Através de fatores de conversão, denominado de fator de empilhamento ou fator de cubicação, é possível transformar o metro estéreo em metro cúbico. Para o estudo, devido se tratar de toras de eucalipto com casca, se utilizou um fator de 0,7 (ENVALMA, 2014).

$$V_{eucalipto,ST} = V_{ST} * Fe \quad (3.8)$$

O metro de carvão vegetal (mdc), por sua vez, é uma unidade de medida referente a quantidade de carvão necessária para preencher um recipiente de 1 m<sup>3</sup>. Com base na Resolução Conjunta SEMAC/SEFAZ nº 1 de 20/06/2008, 1 mdc equivale a 1,2 m<sup>3</sup> de carvão vegetal.

Através da equação (3.8), e do índice de conversão de tora de eucalipto para carvão vegetal, podemos relacionar o volume de carvão vegetal com o volume de madeira necessária para produzir o combustível. Dessa forma pode-se encontrar o volume de madeira total necessária para atender a demanda do mercado.

$$V_{madeira} = \frac{V_{eucalipto} * V_{carvão}}{1,2} \quad (3.9)$$

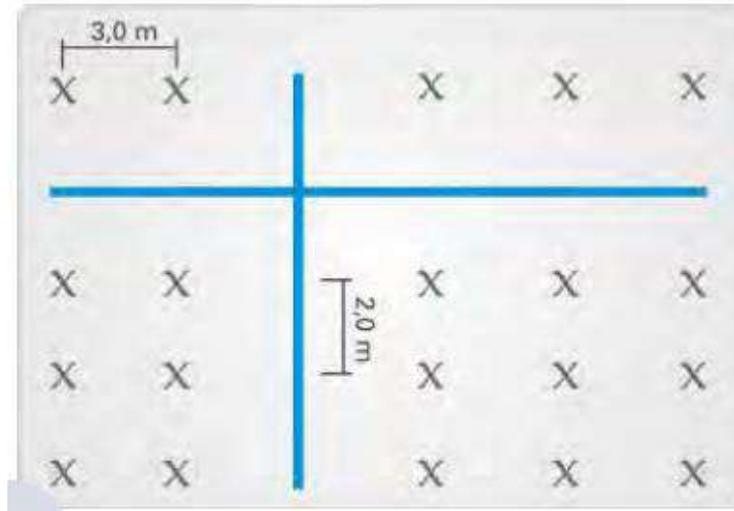
### 3.2.2. ÁREA DE PLANTIO NECESSÁRIA

Com base na publicação do Embrapa, 2014, a respeito do cultivo de eucalipto em propriedades rurais, uma das principais técnicas de implantação desta árvore é o espaçamento, ou densidade de plantio. Onde o distanciamento entre as mudas influencia no crescimento da floresta, qualidade da madeira produzida, idade do corte e custos de produção.

Comumente as mudas de eucalipto são plantadas em espaçamentos no intervalo de 4 m<sup>2</sup> a 9 m<sup>2</sup> por planta. Para plantações extensivas, o espaçamento de 3 m x 2 m é o modelo mais

adotado (Figura 3.1). Quanto menor o espaço, menor será o diâmetro da árvore e consequentemente, menor seu valor agregado.

**Figura 3.1 - Demarcação de espaçamento de plantio**



Fonte: Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação e produção de renda; Embrapa; 2014.

Definindo o espaçamento ocupado por cada muda de eucalipto é determinada a área ocupada de uma única muda. Como 1 hectare é uma unidade de medida de área equivalente a 10.000 m<sup>2</sup>, pode-se calcular a quantidade de mudas necessárias para ocupar um hectare de plantio.

$$x_{mudas} = \frac{A \text{ hectare}}{A \text{ muda}} \quad (3.10)$$

Segundo o comunicado técnico do Embrapa (RODIGHERI et al, 2007), a produtividade anual de 1 hectare de eucalipto, com o espaçamento de 3 m x 2 m, é capaz de produzir 40 m<sup>3</sup> de madeira. Como, pela equação (3.10), pode-se determinar a quantidade de mudas em 1 hectare, é possível então encontrar uma média de volume de madeira produzida por muda através da seguinte equação:

$$V_{mudas} = \frac{V \text{ hectare}}{x \text{ mudas}} \quad (3.11)$$

Dessa forma, tendo o volume necessário de madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal, pode-se relacionar com o volume médio de madeira produzida por 1 muda. E,

com isso, determinar a quantidade de mudas e a área de plantio que precisa ser implantada para atender a demanda do mercado brasileiro.

$$A_{plantio} = \frac{\left(\frac{V_{madeira}}{V_{mudas}}\right)}{x_{mudas}} \quad (3.12)$$

A partir da área calculada, pode-se determinar a influência que este incremento resultaria sobre a produção atual de hectares de florestas de eucalipto, através da seguinte equação:

$$\%A_{diferença} = \frac{(A_{plantio} + A_{atual}) - A_{atual}}{A_{atual}} * 100 \quad (3.13)$$

### 3.2.3 CAPTURA DE EMISSÕES PELAS MONOCULTURAS DE EUCALIPTO

Segundo estudo de Morales et al, 2023, foi feita uma avaliação do estoque de carbono ao longo do tempo para monoculturas de Eucalyptus (*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*, clone H13), com suas mudas cultivadas em espaços de 3,5 m x 3 m, onde as diferenças no estoque de carbono foram medidas em toneladas métricas por hectare. Devido ao eucalipto precisar ter entre 6 e 8 anos para a produção de carvão vegetal, foram projetados e testados diferentes cenários ao longo do seu tempo de cultivo.

Em um desses cenários, todas as árvores de eucalipto plantadas foram utilizadas para a produção de energia, na forma de carvão. Esta avaliação calculou os estoques de carbono que 1 hectare teria através da seguinte equação:

$$m_{CO2\ Stock} = m_{CO2\ BAG} + m_{CO2\ Root} \quad (3.14)$$

Sendo  $m_{CO2\ BAG}$  a captura do gás pela biomassa acima do solo e  $m_{CO2\ Root}$  a captura do gás pela biomassa abaixo do solo.

### 3.2.4 EMISSÕES RELACIONADAS A CARBONIZAÇÃO DO EUCALIPTO

Com base na publicação da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) em 2017, a produção insustentável de carvão vegetal provoca emissões líquidas de gases de efeito estufa e afeta os recursos naturais. A produção e o consumo de carvão

vegetal podem ter impactos negativos na saúde respiratória das pessoas, mas também proporciona meios de subsistência e segurança energética.

Em operações muito ineficientes, as emissões na produção de carvão vegetal, devido à degradação florestal e ao desmatamento, podem chegar a 9 kg CO<sub>2</sub> e por kg de carvão vegetal produzido.

A produção sustentável de madeira, por sua vez, evita quase totalmente as emissões líquidas de GEE e, portanto, pode reduzir substancialmente as emissões globais na cadeia de valor do carvão vegetal. Para isso, estão disponíveis múltiplas opções, tais como gestão florestal sustentável, agrossilvicultura e silvicultura urbana, e a utilização otimizada dos resíduos de biomassa e dos fluxos de resíduos.

Segundo Vital e Pinto, 2009 cada tonelada de madeira utilizada na produção de carvão, emite 160 kg de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Desta forma, pode-se determinar através da massa de madeira destinada a virar combustível, a emissão envolvida na pirólise do material e, comparar com o sequestro realizado pela floresta plantada. Para se obter o valor da massa da madeira, foi utilizado a densidade média do eucalipto equivalente a 828,1 kg/m<sup>3</sup> (ICRAF DATABASE, 2022).

$$E_{CO_2,pirólise} = 160 \frac{kg}{ton} * V_{madeira} * 0,8281 \frac{ton}{m^3} \quad (3.15)$$

### 3.3. SALDO DE EMISSÕES

Para calcular o saldo total de emissões de gás carbônico foi feita uma relação entre as emissões definidas durante o estudo, fazendo primeiro a relação entre as emissões totais da pelletização como é feito atualmente e em seguida fazendo a diferença com o valor estimado com essa mudança sendo aplicada em grande escala, além de considerar os diferentes fatores de emissões para os combustíveis sólidos utilizados, sendo esses dados coletados do Relatório de Referência de Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais e por Uso de Solventes, divulgado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia:

$$E_{CO_2,atual} = E_{CO_2,pel} + E_{CO_2,trans} \quad (3.16)$$

$$E_{CO_2,sub} = (x_{cv} * (f_{q,cv} * E_{CO_2,pel} + E_{CO_2,pirólise})) \quad (3.17)$$

$$+((1 - x_{cv}) * (f_{q,a} * E_{CO_2,pel} + E_{CO_2,trans}))$$

$$E_{saldo} = E_{CO_2,atual} - E_{CO_2,sub} \quad (3.18)$$

A maior concentração de carvão vegetal adicionada na mistura foi atingida pela Vale S.A., sendo essa de 50%. Então esse valor é o que foi considerado nos cálculos realizados. A partir disso pode ser calculado a diferença percentual por meio da fórmula:

$$\%E_{diferença} = \frac{E_{CO_2,atual} - E_{CO_2,sub}}{E_{CO_2,atual}} * 100 \quad (3.19)$$

## 4. RESULTADOS

### 4.1. EMISSÕES DE MINÉRIO DE FERRO

#### 4.1.1. AGLOMERAÇÃO DO MINÉRIO

Aplicando os dados dos documentos: Relato Integrado e o Relatório de Produção e Vendas de 2022, disponibilizados pela Vale S.A nas equações (3.1) e (3.2), encontram-se os resultados para as emissões de CO<sub>2</sub> referentes à massa de pelotas produzidas. Como demonstrado a seguir:

$$m_{CO_2,pel} = 8,9 * 10^6 ton * 14,1\% = 1,255 * 10^6 ton$$

$$E_{CO_2,pel} = \frac{1,255 * 10^6 ton de CO_2}{32 * 10^6 ton de pel} = 3,92 * 10^{-2} \frac{ton de CO_2}{ton de pel}$$

#### 4.1.2. TRANSPORTE DO CARVÃO MINERAL

A partir dos dados encontrados nas pesquisas realizadas nas bases de dados do Comex Stat e do site sea-distances.org, foi possível montar a tabela a seguir para sua utilização em cálculos futuros.

**Tabela 4.1 - Distribuição dos dados nas quatro categorias, para as três séries estudadas.**

Países	Carga (ton)	Distância (Km)	Portos
Rússia	924.207,09	12356,544	St Petersburgo - Santos
Austrália	530.536,00	15.977,20	Hedland - Santos
África do Sul	342.589,13	6.998,71	Richard's Bay - Santos
Peru	201.950,80	8.815,52	Callao - Santos
Estados Unidos	39.041,00	10.204,52	Houston - Santos
China	80.482,80	21.179,47	Dalian - Santos
Eslováquia	2.232,70	11.336,09	Bratislava - Santos
Suécia	0,105	10.878,648	Gothenburg - Santos

Fonte: Comexstat e sea-distances.org, acessados em setembro de 2023

Além disso, também foram utilizados os seguintes dados apresentados na tabela abaixo de fator de emissão de CO<sub>2</sub> disponibilizados pela organização CCWG para as regiões de transporte analisadas:

**Tabela 4.2 - Fator de emissão de CO<sub>2</sub> por transporte entre regiões.**

Rota	Fator de Emissão
Ásia - América do Sul	63,1
Europa - América do Sul	68,8
África - América do Sul	122,4
Oceania - América do Sul	103,5
América do Norte - América do Sul	82,5
América Central - América do Sul	103,9

Fonte: 2020 Global Container Shipping Trade Lane Emissions Factors, Clean Cargo.

Dessa maneira, a emissão para cada trajeto foi calculada a partir da equação (3.3), possibilitando montar a tabela a seguir:

**Tabela 4.3 - Emissão de CO<sub>2</sub> por rota.**

Países	n <sub>containers</sub>	1,15*d (km)	10 <sup>6</sup> *f <sub>CO<sub>2</sub></sub>	m <sub>CO<sub>2</sub></sub> (ton)
Rússia	92.420,71	14.210,03	63,1	828.692,70
Austrália	53.053,60	18.373,79	103,5	1.008.913,26
África do Sul	34.258,91	8.048,51	122,4	337.497,62
Peru	20.195,08	10.137,85	103,9	212.719,30
Estados Unidos	3.904,10	11.735,20	82,5	37.797,69
China	8.048,28	24.356,39	63,1	123.693,08
Eslováquia	223,27	13.036,51	82,5	2.401,30
Suécia	0,105	12.510,45	68,8	0,09
<b>Total</b>				<b>2.551.715,04</b>

Fonte: Elaboração própria.

Tendo esse resultado, foi possível fazer a análise por toneladas de emissão de CO<sub>2</sub> emitido por antracito transportado para o Brasil pela equação (3.4). E, por fim, com a equação (3.6) e os dados do estudo de Mourão, 2017 na equação (3.5) foi possível fazer a relação de CO<sub>2</sub> emitido por tonelada de pelota produzida:

$$E_{CO_2,trans} = \frac{2.551.715,04 \text{ ton}}{2.121.039,62 \text{ ton}} * \frac{m_{CS}}{m_{pel}} = 1,20 \frac{\text{ton de } CO_2}{\text{ton de } CS}$$

$$m_{CS,pel} = m_{tot,pel} * \frac{0,01462 \text{ ton } CS}{1 \text{ ton de } pel}$$

$$E_{CO_2,trans} = 1,20 \frac{\text{ton de } CO_2}{\text{ton de } CS} * \frac{0,01462 \text{ ton } CS}{1 \text{ ton de } pel} = 1,75 * 10^{-2} \frac{\text{ton de } CO_2}{\text{ton de } pel}$$

Utilizando os dados de produção de pelotas de ferro brasileira de 2021, divulgada pelo Mineral Data e aplicando na equação (3.7):

$$m_{CS} = 1,75 * 10^{-2} \frac{\text{ton de } CO_2}{\text{ton de } pel} * 44.649.025,64 \text{ ton de } pel = 781.357,95 \text{ ton de } CS$$

## 4.2. EMISSÕES E NEUTRALIZAÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

### 4.2.1. VOLUME DE EUCALIPTO NECESSÁRIO

Por meio do conhecimento da massa total de antracito necessária para atender a demanda de pelotização de ferro ( $m_{cs,pel}$ ), pode-se determinar a massa de carvão vegetal que seria necessária caso fosse feita uma substituição de 50% do combustível sólido comumente empregado (VALE S.A., 2023), levando em consideração uma substituição de 1:1.

$$m_{cv} = 0,5 * m_{cs,pel} = 0,5 * 781.357,95 \text{ ton de CS}$$

$$m_{cv} = 390.678,975 \text{ ton de carvão vegetal}$$

Através do conhecimento da densidade média de carvão vegetal, proveniente de biomassa de eucalipto, é possível encontrar o volume que este combustível ocupa. Para assim, através das equações (3.8) e (3.9) determinar o volume de madeira de eucalipto que seria necessário para atender esta substituição.

$$V_{Carvão} = \frac{1000 * 390.678,975 \text{ ton}}{370 \text{ kg/m}^3} = 1.055.889,122 \text{ m}^3 \text{ de carvão vegetal}$$

$$V_{eucalipto,ST} = 2,4 \text{ st} * 0,7 = 1,68 \text{ m}^3$$

$$V_{madeira} = \frac{1,68 \text{ m}^3 * 1.055.889,122 \text{ m}^3}{1,2 \text{ m}^3} = 1.478.244,77 \text{ m}^3 \text{ de eucalipto}$$

Com isso, tem-se que para atender a demanda de substituição dos combustíveis, seria necessário um volume de eucalipto equivalente a 1.478.244,77 m<sup>3</sup>.

### 4.2.2. ÁREA DE PLANTIO NECESSÁRIA

A fim de determinar a área ocupada por monoculturas de eucalipto para que seja produzido o volume de toras de madeira necessárias, é preciso primeiro, obter a média de produção de 1 árvore de eucalipto para um ano. Através da relação indicada pelo Embrapa, pode-se utilizar as equações (3.10) e (3.11) para esta finalidade.

$$x_{mudas} = \frac{10.000 \text{ m}^2}{(3 * 2) \text{ m}^2} = 1.666,7 \text{ mudas por hectare}$$

$$V_{mudas} = \frac{40 \text{ m}^3}{1.666,7 \text{ mudas}} = 0,024 \text{ m}^3 \text{ de madeira por ano}$$

Devido a necessidade de esperar um período de 7 anos para destinar as árvores de eucalipto para a produção de carvão vegetal, tem-se que o volume de madeira gerado por muda neste período, é próximo de  $0,168 \text{ m}^3$ . Dessa forma, por meio da equação (3.12), é possível determinar a área necessária para produzir o volume de madeira destinado a carbonização.

$$A_{\text{plantio}} = \frac{\left(\frac{1.478.244,77 \text{ m}^3}{0,168 \text{ m}^3/\text{muda}}\right)}{1666,7 \text{ muda/hectare}} = 5.279,446 \text{ hectares}$$

Por fim, como o período de espera de 7 anos resultaria em um longo tempo de improdutividade entre os pontos de colheita, é preciso estender a área de plantio de forma a garantir anualmente uma média de produção equivalente à demanda do mercado.

Dessa forma, para atender anualmente a quantidade fixa de volume de madeira para uma substituição parcial de antracito, por carvão vegetal, levando em consideração a produção de pelotas de 2022, seria preciso de 7 vezes a área determinada pela equação anterior. Sendo assim, uma área equivalente a  $36.956,119$  hectares, ou  $369.561.192,6 \text{ m}^2$ .

Em 2022 a área destinada para produção de carvão vegetal foi equivalente a 25,6% de 9,5 milhões de hectares. Dentre a participação das espécies de cultivo do país, o gênero *Eucalyptus* representou 98,8% desta produção (IBGE, 2022). Com isso, pode ser avaliado o impacto que a substituição de combustíveis causaria sobre a extensão de cultivo florestal atual total de eucalipto e a extensão destinada somente à produção de carvão vegetal através da equação (3.13).

$$\%A_{\text{diferença}} = \frac{(7.300.000 + 36.956,119) - 7.300.000 \text{ hectares}}{7.300.000 \text{ hectares}} * 100 = 0,5062\%$$

$$A_{\text{carvão atual}} = 9.500.000 \text{ hectares} * 0,256 = 2.432.000 * 0,988 = 2.402.816 \text{ hectares}$$

$$\%A_{\text{diferença}} = \frac{(2.402.816 + 36.956,119) - 2.402.816 \text{ hectares}}{2.402.816 \text{ hectares}} * 100 = 1,538\%$$

A partir dos cálculos, nota-se que a expansão das florestas cultivadas de eucalipto para atender a demanda de carvão vegetal, visando uma substituição parcial na pelletização, resultaria em um incremento de 0,5% da área de plantio total deste gênero de planta e, de um aumento em 1,54% para a repartição destinada a ser carbonizada em carvão vegetal.

#### 4.2.3. CAPTURA DE EMISSÕES PELAS MONOCULTURAS DE EUCALIPTO

A partir dos dados do estudo realizado por Morales, 2023, a monocultura de eucalipto apresentou uma média de 34,7 kg de carbono capturado por árvore, considerando a biomassa acima e abaixo do solo, sendo equivalente a 63.75 toneladas de CO<sub>2</sub> por hectare por ano no período de 8 anos analisado neste estudo.

$$m_{CO_2 Stock} = m_{CO_2 BAG} + m_{CO_2 Root} = 63,75 \frac{ton}{ha * ano}$$

Com base no valor encontrado, podemos relacionar este sequestro de CO<sub>2</sub> em função da massa de pelotas produzidas. Para isso, determina-se a média de carvão vegetal produzido por hectare, após o período de crescimento de 7 anos das mudas, de modo a poder associar a quantidade de toneladas produzidas em 1 hectare. Dessa forma, pode-se calcular a captura que será obtida pela monocultura de eucalipto, em função da tonelada de pelota produzida.

$$\frac{m_{cv}}{A_{plantio}} = \frac{461.049,215 ton}{5279,446 hectares} = 74 \frac{ton de carvão vegetal}{hectare}$$

$$A_{pel} = \frac{74}{m_{cs,pel}} = \frac{74 ton de CV/ha}{0,01462 ton de CS/ton de pel} = 5.061,56 \frac{ton de pel}{hectare}$$

$$m_{CO_2 Stock,pel} = \frac{m_{CO_2 Stock}}{A_{pel}} = \frac{63,75 ton CO_2/ha}{5.061,56 ton de pel/ha} = 1,26 * 10^{-2} \frac{ton de CO_2}{ton de pel}$$

#### 4.2.4 EMISSÕES RELACIONADAS A CARBONIZAÇÃO DO EUCALIPTO

Para calcular a emissão de CO<sub>2</sub> relacionada com a produção de carvão vegetal, devemos relacionar o volume da madeira demandada pelo processo de pelletização, junto com a densidade média do eucalipto para a fim de encontrar a massa total do material a ser

carbonizado. Dessa forma, podemos relacionar com a emissão indicada por Vital e Pinto, 2009, como representado através da equação (3.15)

$$E_{CO_2,pirólise} = 160 \frac{kg}{ton} * 1.478.244,77 m^3 * 0,8281 \frac{ton}{m^3}$$

$$E_{CO_2,pirólise} = 195.861.519,1 kg de CO_2$$

Portanto, temos que para a substituição de 50% de antracito para carvão vegetal, resultaria em uma necessidade de emissão de 195.861.519,1 kg de CO<sub>2</sub> para a produção do combustível. Assim como para a captura de CO<sub>2</sub>, pode-se relacionar a emissão deste gás no processo de pirólise com a massa de pelota produzida.

Para isso, é determinada a massa de madeira necessária para produzir 1 tonelada de carvão vegetal, ao qual pode ser relacionada com a quantidade de combustível sólido necessário para produzir 1 tonelada de pelotas de ferro. Por fim, utilizando a emissão mencionada por Vital e Pinto, 2009, é calculada a emissão da pirólise da madeira em função da tonelada de pelota produzida.

$$m_{madeira} = \frac{1,68 m^3 madeira}{1,2 m^3 carvão vegetal} * 0,8281 ton = 1,15934 ton de madeira$$

$$m_{madeira,cv} = \frac{1,15934 ton * 1 ton de carvão vegetal}{0,370 ton de carvão vegetal} = 3,133351351 \frac{ton de madeira}{ton de carvão vegetal}$$

$$m_{madeira,pel} = \frac{3,133351351 ton de madeira}{ton de carvão vegetal} * \frac{0,01462 ton de CS}{1 ton de pel} = 0,04580959676 \frac{ton de madeira}{ton de pelota}$$

$$E_{CO_2,pirólise} = 160 \frac{kg}{ton} * 0,04580959676 \frac{ton de madeira}{ton de pelota} = 7,329535481 \frac{kg de CO_2}{ton de pelota}$$

$$E_{CO_2,pirólise} = 0,7329535481 * 10^{-2} \frac{ton de CO_2}{ton de pelota}$$

### 4.3. SALDO DE EMISSÕES

Para fazer o cálculo das emissões foi utilizado os seguintes dados do Relatório de Referência de Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais e por Uso de Solventes, divulgado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia apresentados na tabela abaixo:

**Tabela 4.4 - Fator de emissão de CO<sub>2</sub> por combustível sólido queimado**

Combustível sólido	$f_q$
Carvão vegetal	29,9
Antracito	26,8

Fonte: Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais e por Uso de Solventes, Ministério de Ciência e Tecnologia, 2006

Aplicando essas informações tabeladas junto com os resultados de emissões calculados nas equações (3.16) para o estado atual e (3.17) e, por fim, foi calculado o saldo por meio da equação (3.18):

$$E_{CO_2,atual} = 3,92 * 10^{-2} + 1,75 * 10^{-2} = 5,67 * 10^{-2} \frac{\text{ton de } CO_2}{\text{ton de pel}}$$

$$E_{CO_2,sub} = (0,5 * (\frac{2,9,9}{29,9 + 26,8} * 3,92 * 10^{-2} + 0,733 * 10^{-2} - 1,26 * 10^{-2})) + ((1 - 0,5) * (\frac{26,8}{29,9 + 26,8} * 3,92 * 10^{-2} + 1,75 * 10^{-2})) = 2,57 * 10^{-2} \frac{\text{ton de } CO_2}{\text{ton de pel}}$$

$$E_{saldo} = 5,67 * 10^{-2} - 2,57 * 10^{-2} = 3,10 * 10^{-2} \frac{\text{ton de } CO_2}{\text{ton de pel}}$$

A partir dos resultados calculados, é possível calcular a diferença percentual utilizando a fórmula (3.19):

$$\%E_{diferença} = \frac{5,67 * 10^{-2} - 2,57 * 10^{-2}}{5,67 * 10^{-2}} * 100 = 54,67\%$$

$$E_{\text{saldo}} * m_{\text{pel}} = 3,10 * 10^{-2} \frac{\text{ton de CO}_2}{\text{ton de pel}} * 44.649.025,64 \text{ ton de pel} = 1.384.119,79 \text{ ton de CO}_2$$

A partir dos cálculos, pode-se concluir que a substituição de 50% do combustível sólido empregado na pelletização por carvão vegetal, resulta em uma diminuição de aproximadamente 54,67%, o que equivale a 1.384.119,79 ton de CO<sub>2</sub>.

## 5. CONCLUSÕES

A partir do que foi analisado, percebe-se que a utilização do carvão vegetal no processo de pelletização é uma alternativa interessante para a redução total e neutralização de emissões de gases do efeito estufa por meio da captura de gás carbônico que decorre durante os anos de crescimento do eucalipto. No Brasil, a substituição de 50% do combustível sólido utilizado teria uma redução de 54,67% nas emissões, o que corresponde a aproximadamente 1.385.000 toneladas de CO<sub>2</sub> liberados por ano relacionadas à pelletização. Isso indica uma mudança significativa nas emissões atuais, trazendo uma grande redução para o procedimento.

Entretanto, enquanto o Brasil é o maior produtor de carvão vegetal do mundo (FAO, 2021), para atender somente a demanda atual da mineração brasileira, seria necessário expandir em 0,5% a área florestal de eucalipto. Esse incremento resultaria em um total de 36.956,119 hectares, equivalente a 1,54% da região de florestas cultivadas voltadas para a produção somente de carvão vegetal.

Embora esse crescimento, aparente ser pequeno, não leva em consideração outros setores que também estão investindo na produção deste combustível como um possível substituto de fontes fósseis. Há divisões comerciais que apresentam um consumo muito maior deste material e que pode ser expandido com os anos seguintes.

Dessa maneira, pode-se concluir que para possibilitar a troca no nível proposto na pesquisa, seria interessante o desenvolvimento de novas tecnologias de produção de carvão vegetal, visando aumentar a produção sem necessitar da utilização expansiva de área de plantio, uma vez que o crescimento desse geralmente é sinônimo de desmatamento de áreas florestais nativas. Diversas pesquisas estão sendo feitas sobre a obtenção do combustível através de diferentes biomassas para mitigar esses efeitos, como por exemplo é a pesquisa da utilização de rejeitos de biomassa de cana de açúcar como insumo para a produção de combustível sólido, que é um rejeito que se encontra em abundância no Brasil.

Somado a temática de biomassa, um outro ponto que merece destaque e requer avanços para viabilizar melhores resultados na substituição de combustíveis fósseis por renováveis na pelletização é o processo de pirólise empregado no país. Atualmente, a carbonização da biomassa empregada resulta em conversão de até 40% em fonte energética sólida com emissões de poluentes na atmosfera (DUBOC et al, 2007).

Embora o saldo de emissões seja zerado por meio da captura de carbono atrelada ao crescimento das mudas de eucalipto, este lançamento promove o acúmulo do gás na atmosfera e favorece os impactos do aquecimento global. Além de, emitir outros poluentes que são danosos a atmosfera e a biodiversidade que vive ao redor das plantas de produção.

## 6. REFERÊNCIAS

- CETEM. **Tratamento de Minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ. 2018;
- MOURÃO, J. **Aspectos Conceituais Relativos à Pelotização de Minério de Ferro**. Vitória, ES. 2017;
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. 6. ed. 2022;
- BRAGA, D.; CRISUCUOLO, L.; CARVALHO, J. **E-Pellet - Carvão Vegetal como Alternativa Energética para Pelotização**. 47º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 5o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro. São Paulo, SP, 2017;
- BRAGA, D.; OLIVEIRA, R.; SAMPAIO, A. **Carvão Vegetal como Combustível Principal em Pelotização Grate-Klin**. 49º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 5o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro. São Paulo, SP, 2019;
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Statistical Yearbook. World food and agriculture*. Roma. 2021;
- TAVARES, L. **Matriz Elétrica Brasileira e as Tendências Futuras**. Recima 21 - Revista Científica Multidisciplinar, v. 4, n. 5, 2023;
- ANATER, M. **Desempenho Ambiental e Energético da Produção de Carvão Vegetal para Uso Doméstico no Brasil**. Tese (Doutorado em Ciências). Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia Ambiente da Universidade de São Paulo, SP. 2022;
- CETEM. **Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil**. Rio de Janeiro, RJ. 2001;
- ALMEIDA, R. **Processo Auto-sustentável de Sinterização de Pelotas de Minério de Ferro: Influência da Estrutura do Leito e da Porcentagem de Matéria Carbonosa na Mistura**. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória;
- PRAES, G. **Substituição Parcial de Finos de Antracito por Carvões Vegetais de Eucalipto na Pelota Crua de Minério de Ferro em Forno de Grelha Móvel**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, MG. 2018;
- PEREIRA, P. **Influência do Antracito Adicionado à Mistura de Pelotização Sobre as Características Físicas das Pelotas Queimadas**. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica,

- Materiais e de Minas). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, MG. 2016;
- YAMAGUCHI, S.; ET AL. *KOBELCO Pelletizing Process*. 2010
- VALE S.A. **Relato integrado**. Vale 2022. 2023;
- BORBA, R. **Carvão Mineral**. Agência Nacional de Mineração. Balanço Mineral Brasileiro. 2001;
- OLIVEIRA, A. S. ET AL. **Florestas**. IBAMA. 2022
- EPE. **Relatório Síntese 2022**. Empresa de Pesquisa Energética. 2022
- EMBRAPA. **Perguntas e Respostas**. Eucalipto. Embrapa. dez. 2019. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/florestas/transferecia-de-tecnologia/eucalipto/perguntas-e-respostas>>. Acesso em: 09 de dez. de 2023.
- IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2022**. IBGE. 2022
- DUBOC, E; COSTA, C; VELOSO, R; OLIVEIRA, L; PALUDO, A. **Panorama Atual da Produção de Carvão Vegetal no Brasil e no Cerrado**. Embrapa. 2007
- GREENHOUSE GAS PROTOCOL. The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard*. 2015.1;
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14064**: Norma Brasileira de Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro, RJ. 2007;
- VALE S.A. **Relatório de Prodeção e Vendas 2022**. 2023;
- CLEAN CARGO GROUP; BSR. *Clean Cargo Working Group Carbon Emissions Accounting Methodology: The Clean Cargo Working Group Standard Methodology for Credible and Comparable CO2 Emissions Calculations and Benchmarking in the Ocean Container Shipping Sector*. 2015;
- CLEAN CARGO GROUP; BSR. *How to Calculate and Manage CO2 Emissions from Ocean Transport: A Clean Cargo Working Group (CCWG) Guide*. 2015;
- CLEAN CARGO GROUP; BSR. *2020 Global Container Shipping Trade Lane Emissions Factors*. 2021;
- CETEM; SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL. **Ferro - Produção de Pelotas (t)**. Mineral Data. 2021;
- LIMA, E.; SILVA, H.; TUSSOLINI, E. **Potencial Técnico do *Eucalyptus benthamii* para produção de carvão em fornos convencionais**. EMBRAPA. Colombo, PR. 2012;
- ENVALMA. **Estimação de Volume Estéreo de Madeira**. Nota técnica nº3. ENVALMA. Balsa Nova, PR. 2014.

- BRASIL. SEMAC/SEFAZ. **Resolução nº 1, de 20 de Junho de 2008**. Estabelece fatores de conversão entre unidades de medida para efeito de cobrança da Taxa de Transporte e Movimentação de Produtos e Subprodutos Florestais (TMF) e dá outras providências.
- EMBRAPA. **Transferência de Tecnologia Florestal: Cultivo em Propriedades Rurais: Diversificação e Renda**. Brasília, DF. 2014;
- RODIGHERI, H.; SILVA, H.; TUSSOLINI, E. **Indicadores de Custos, Produtividade e Renda de Plantios de Eucaliptos para Energia na Região de Guarapuava, PR**. EMBRAPA. Colombo, PR. 2012;
- MORALES, M. ET AL. *Eucalyptus Carbon Stock Research in an Integrated Livestock-Forestry System in Brazil*. *Sustainability*. MDPI. 2023;
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *The Charcoal Transition. Greening the Charcoal Value Chain to Mitigate Climate Change and Improve Local Livelihoods*. Roma. 2021;
- VITAL, M; PINTO, M. **Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 30. 2009
- ICRAF Database - Wood Density. Disponível em: <<http://db.worldagroforestry.org/wd/species/Eucalyptus>>. Acesso em: 12 de dez. de 2023
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais e por Uso de Solventes**. 6 ed. 2021.