

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIENCIAS HUMANAS E DAS ARTES  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

BRÁULIO DA SILVA DE OLIVEIRA

**BALANÇO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA NA PRODUÇÃO DE  
CARVÃO VEGETAL NO ESTADO DE MINAS GERAIS**

Viçosa – MG  
NOVEMBRO DE 2017

BRÁULIO DA SILVA DE OLIVEIRA

**BALANÇO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA NA PRODUÇÃO DE  
CARVÃO VEGETAL NO ESTADO DE MINAS GERAIS**

Monografia apresentada ao curso de Geografia da  
Universidade Federal de Viçosa como requisito do  
título de Bacharel em Geografia.

Orientador: Edson Soares Fialho

Coorientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro

VIÇOSA – MG

NOVEMBRO DE 2017

BRÁULIO DA SILVA DE OLIVEIRA

**BALANÇO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA NA PRODUÇÃO DE  
CARVÃO VEGETAL NO ESTADO DE MINAS GERAIS**

Monografia apresentada ao curso de Geografia da Universidade Federal de Viçosa como requisito do título de Bacharel em Geografia

---

Prof. Edson Soares Fialho  
Departamento de Geografia - UFV  
(Orientador)

---

Profa. Angélica de Cássia Oliveira Carneiro  
Departamento de Engenharia Florestal – UFV  
(Coorientador)

---

Prof. André Luiz Lopes de Faria  
Departamento de Geografia - UFV

---

Dra. Juliana Jerásio Bianche (Pós Doutoranda)  
Departamento de Engenharia Florestal - UFV

Viçosa – MG

*“Toque de bola, posição legal, Mineiro bateu, bateu, bateu...”*

*“Ao meu irmão e a toda a minha família, dedico este trabalho”.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus,

Ao meu irmão Bruno, pelo companheirismo, amizade e pelo exemplo de pessoa a quem me inspiro a ser, obrigado por tudo Pelúcia;

Aos meus pais, e a minha irmã Beatriz por todo carinho, dedicação e apoio ao longo da minha vida;

A minha avó Ligia e Tia Dionísia, por todo amor e afeto que sempre demonstraram;

A toda a minha família, por sempre estarem comigo;

A Solange, por ser uma segunda mãe, mostrando caminhos corretos a seguir, e nunca deixando desanimar de nada;

A Cinha, pelo companheirismo e palavras certas e na hora certa, a qual serei sempre grato;

A Edna, pela amizade e companheirismo de sempre, a quem tenho carinho enorme;

Em especial a Professora Cassinha, nem todo espaço aqui daria conta de expressar a minha gratidão por tudo que faz e já fez por mim, a quem serei eternamente grato, obrigado pela orientação, amizade, apoio e por tudo mais;

A Bruna, Isa, Bel, Joyce, Line, Phaola, obrigado pelos ótimos momentos, apoios, por sempre estarem do lado;

A família Lapem (Moiado, Eder, Lucas, Clarissa, Miguel, Mateus, Jessica, Larissa, Leila, Lawrence, Fernanda, Professora Ana Márcia, Chico, Lori, Amélia, Fabry, Carol, Regis, Ramon, Clarinha, Professor Benedito, Emerson, Ed, Mariana, Ju Jardim, Ju Bianche, Ju Ceccato, Babi, Tito, Jaque, Sete, Zaíra, Bruno, Danilo, Artur, Tom, Julia, Marco Tulio,

Simone, Aristeu, Carla, Flavia e tantos outros) e a Família da TGNE (Raphael, Pedro, Paulo, Mara, Mábia, Mari, Leo, Vitor, Bruno, Lud, Gustavo e Tais), obrigado por fazerem os anos de UFV muito mais especiais;

A todos os professores do DGE pelos ensinamentos e dedicação os quais admiro todos, Professor André, Professor Cívale, Professora Isabel, Professor Ulysses, Professora Marilda, Professora Nina, Professora Nilda, Professor J.J e em especial ao Professor Edson, obrigado pela orientação, paciência, ensinamento e força.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Seção transversal de uma instalação de alto-forno, incluindo o equipamento auxiliar principal.....	10
FIGURA 2 - Trabalho em mina de carvão subterrânea.....	12
FIGURA 3 - Produção tradicional de carvão vegetal.....	15
FIGURA 4 - Modelo tradicional de produção de carvão vegetal.....	19
FIGURA 5 – Produção de Ferro-Gusa do Brasil e do Estado de Minas Gerais no ano de 2015.....	21
FIGURA 6 – Produção de Ferro-Gusa no Brasil por estados, referente ao ano de 2015.....	22
FIGURA 8 - Forno “rabo-quente”.....	25
FIGURA 8 - Forno de Encosta.....	26
FIGURA 9 – Forno de Superfície.....	27
FIGURA 10 – Forno Retangular.....	28
FIGURA 11 - Trabalhador realizando o “barrelamento” .....	29
FIGURA 12 - Forno MF1, com sistema de queima de gases.....	37
FIGURA 13 - Sistema Forno/Fornalha utilizado no experimento para queima de gases.....	38
FIGURA 14 - Analisador de gas - Gasboard 9030 Wuhan CUBIC.....	40
FIGURA 15 - Balanço das Emissões na produção de carvão vegetal segundo dados experimentais.....	43
FIGURA 16 - Forno em processo de carbonização utilizando sistema de queima de gases...	46
FIGURA 17 - Balanço dos principais gases do efeito estufa oriundos das rotas produtivas tradicionais e da rota hipotética utilizando queimador de gases durante a carbonização.....	48
FIGURA 18 - Balanço das emissões entre as rotas produtivas tradicionais da siderurgia e a rota com queimador por/t de ferro fusa.....	49

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Relação da emissão mássica dos gases da carbonização por tonelada de madeira, com e sem o uso do sistema de queima de gases.....	42
TABELA 2 - Valores estimados de emissão na produção de carvão vegetal para o estado de Minas Gerais, em cenários com e sem o uso de sistema de queima de gases.....	50
TABELA 3 - Estimativa de uso de queimadores em diferentes parcelas de produção em porcentagem no estado de Minas Gerais, dados de referência SINDIFER (2016).....	51



## LISTA DE SIGLAS

**ABRAF** – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas

**ADHB** – Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil

**BNDS** – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

**CH<sub>4</sub>** - Metano

**CO** – Monóxido de Carbono

**CO<sub>2</sub>** – Dióxido de Carbono

**COC** – Compostos Condensáveis

**COP** – Conferência entre as Partes

**CONAMA** – Conselho Nacional de Meio Ambiente

**CSN** – Companhia Nacional Siderúrgica

**FEAM** - Fundação Estadual do Meio Ambiente

**FUNDACENTRO** - Fundação Jorge Duprat Figueiredo, de Segurança e Medicina do Trabalho

**GEE** – Gás de Efeito Estufa

**GWP** – Global Warning Potential

**IAB** – Instituto Aço Brasil

**IBA** – Instituto Brasileiro de Árvores

**IBS** – Instituto Brasileiro de Silvicultura

**IDHM** – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal

**IEF** – Instituto Estadual de Florestas

**IPCC** - Intergovernmental Panel on Climate Change

**LAPEM** – Laboratório de Painéis e Energia da Madeira

**MCTIC** – Ministério da Indústria, Comércio e Serviços

**MMA** – Ministério do Meio Ambiente

**MME** – Ministério de Minas e Energia

**N<sub>2</sub>O** – Óxido Nitroso

**O<sub>2</sub>** - Oxigênio

**ODS** – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

**PNUD** – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

**SO<sub>2</sub>** – Óxido de Enxofre

**SINDIFER** – Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais

**UFNCCC** - Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>2</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>4</b>
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
3.1 Objetivo Geral.....	5
3.2 Objetivos Específicos.....	5
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
4.1 Sociedade, Natureza, Desenvolvimento e Geografia.....	6
4.2 A Siderurgia Brasileira.....	7
4.3 Processo Siderúrgico.....	9
4.4 Aspectos técnicos e ambientais: Carvão Vegetal x Carvão Mineral.....	11
4.5 Produção de Carvão Vegetal.....	18
4.6 Cenário em Minas Gerais.....	20
4.7 Principais fornos utilizados pelo produtor em Minas Gerais.....	24
4.8 Os riscos ao produtor de uma produção com alta emissão de gases.....	28
4.9 Redução dos impactos da produção de carvão vegetal.....	30
4.10 Queima dos gases da carbonização da madeira.....	32
4.11 Carvão vegetal e o compromisso climático Brasileiro.....	33
4.12 Projeto “Siderurgia Sustentável” .....	35
<b>5. METODOLOGIA.....</b>	<b>36</b>
5.1 Forno.....	36
5.2 Sistema de queima de gases.....	37
5.3 Processo de carbonização e quantificação das emissões.....	38
5.4 Aquisição dos dados de gases das Carbonizações.....	40
5.5 Cálculo da massa dos gases.....	41

<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>42</b>
6.1 Emissão dos gases da carbonização e Balanço das Emissões.....	42
6.2 Funcionalidade do sistema de queima em outros modelos de fornos.....	46
6.3 Cenários de redução para o setor siderúrgico no estado de Minas Gerais.....	47
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>52</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>63</b>

## RESUMO

O setor siderúrgico é um dos setores estruturantes de qualquer economia, produtos ferrosos estão constantemente presentes no nosso dia a dia. Apesar da sua importância, a siderurgia é considerada uma grande consumidora de recursos naturais, além de grande emissora de gases do efeito estufa, aliada a esses fatos, esta a preocupação mundial com as mudanças climáticas, principalmente no que tange a emissões atmosféricas oriundas de atividades antrópicas. O setor se baseia em duas rotas produtivas, uma caracterizada pelo uso do carvão de origem mineral, e outra a partir do uso do carvão de origem vegetal. Uma das principais diferenças entre os insumos está relacionada ao fato de que o carvão mineral é um insumo não renovável dentro da escala humana, e em contrapartida o carvão vegetal além de ser um insumo renovável traz benefícios adicionais como o estoque de carbono de suas florestas de produção, e ao se propor a redução das emissões dentro das diferentes rotas siderúrgica, a referente ao uso do carvão de origem vegetal apresenta relativas facilidades de se implementar técnicas e tecnologias, frente ao seu concorrente. Dentro dessa rota, temos o processo de carbonização, que em resumo trata-se da degradação térmica de uma biomassa, em geral a madeira, para a conversão da mesma em carvão, sendo esse processo, o de maior emissão. Sistemas de queima dos gases gerados no processo de carbonização estão sendo estudados nos últimos anos, visando diminuir a emissão desse processo, porém são poucos os trabalhos que buscam quantificar o ganho ambiental a partir dessas reduções. A partir dessa realidade, o presente trabalho teve como objetivo realizar o balanço de emissões dos principais gases de efeito estufa liberados pelo processo de carbonização, e avaliar um sistema de queima de gases durante o processo. Posteriormente, o objetivo foi realizar uma estimativa da redução de emissão desses gases para o estado de Minas Gerais, em um cenário hipotético em que toda a produção de carvão vegetal destinado a siderurgia do estado é baseada no uso da tecnologia de queima de gases. Concluiu-se que o sistema de forno-fornalha desenvolvido na UFV se mostrou eficaz no que diz respeito à redução das emissões, reduzindo em mais de 90% as emissões de monóxido de carbono e metano (gás com potencial de aquecimento 21 vezes maior que o dióxido de carbono), o sistema se mostrou como uma alternativa de extrema relevância para que o país alcance as metas de redução de gases do efeito estufa anunciadas durante a última Conferência das Partes (COP) para as próximas décadas.

Palavras-chaves: GEE, Sustentabilidade, Siderurgia, Poluição

## 1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade o homem modifica o meio em que vive, e em muitos casos, essas mudanças vão além do seu modo de organização e produção, tal fenômeno foi intensificado com o advento da Revolução Industrial, que substituiu o modelo baseado no trabalho humano e animal, por máquinas movidas a outras fontes de energia, além de uma intensa exploração dos recursos naturais.

Porém, o crescimento populacional, atrelado à necessidade da sociedade de suprir a sua necessidade cada vez maior de consumo, fez com que o aumento das atividades industriais nas últimas décadas trouxesse significativas mudanças sociais e ambientais, pois, com esse aumento, também vieram os impactos dessas atividades, sejam eles, positivos ou negativos. Aumentou-se o número de atividades poluidoras, muitas delas ligadas à poluição atmosférica, e uma das consequências dessas atividades foi o aumento da quantidade de gases liberados, tendo alguns destes gases à característica de influenciar as condições climáticas em longo prazo. De acordo com o IPCC - Painel Intergovernamental de Mudanças do Clima, a principal causa desse aumento é a queima de combustíveis fósseis utilizados para gerar energia e para a produção de bens de consumo. Esse modelo de produção ocorre em todo o mundo e, frente a essa realidade, calcula-se que a alteração na concentração dos gases oriundos de atividades antrópicas poderá desencadear, nos próximos cem anos, um aumento da temperatura média do planeta, entre 1,4 e 5,8°C (CENAMO, 2005).

Consequências drásticas são esperadas com esse aquecimento, como a propagação de doenças tropicais, migração e extinção da biodiversidade, derretimento das calotas polares e aumento do nível médio dos oceanos, sendo que as duas últimas já podem ser observadas (NISHI *et al.*, 2005).

Dentre os principais acordos propostos criados, destaca-se a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) e seu Protocolo de Quioto, que são os principais marcos jurídicos internacionais para lidar com a mudança do clima. O Protocolo de Quioto é um tratado internacional que tem como objetivo propor compromissos para a redução de gases que poderiam agravar o efeito estufa.

Quando se trata da concentração atmosférica de gases de efeito estufa (GEE), alguns deles merecem destaque, como, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e o metano (CH<sub>4</sub>). Tais gases aumentaram de forma acelerada após a Revolução Industrial e

continuam sob taxas crescentes até hoje. Suas principais fontes antropogênicas estão associadas às mudanças de uso da terra, à queima de combustíveis fósseis e às atividades industriais.

Dentre as atividades industriais ligadas à emissão de gases do efeito estufa está a siderurgia, a qual é considerada poluente e intensiva em consumo de recursos naturais, como minério de ferro, carvão e energia. Dentre os insumos do setor siderúrgico, destaca-se dois produtos essenciais e vitais para o seu funcionamento, sendo eles, o carvão vegetal e o carvão mineral. O carvão mineral, ganha destaque quando se fala de impactos, uma vez que é uma fonte não renovável.

Em contrapartida, a biomassa convertida em carvão vegetal aparece como uma importante alternativa de combustível e fonte de matéria para o abastecimento do setor siderúrgico, sendo uma fonte limpa e renovável, além de se mostrar eficaz o implemento de tecnologias que reduzem as emissões de CH<sub>4</sub> e CO em sua rota de produção. Alia-se a este fato o surgimento de novos sistemas de produção de carvão, como, o sistema forno-fornalha desenvolvido na UFV, que tem como objetivo a queima dos gases oriundos da carbonização, buscando assim, minimizar a emissão desses gases na atmosfera.

O sistema já foi estudado por alguns autores tais como, Cardoso (2012), Oliveira (2012), Franco (2013) e Lana (2014), no entanto, ainda não se tem estudos que visem realizar o balanço das emissões do processo e principalmente o seu impacto em escala estadual. O estudo de qualquer cadeia produtiva é necessário para detectar gargalos e sugerir iniciativas que visem o aumento da eficiência técnica operacional, uma vez que substituir ou propor mudanças nas atividades desenvolvidas é essencial para tomada de decisões e formulação de uma política mais eficiente no âmbito da cadeia de produção (MOTA, 2013).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar o balanço das emissões de gases do efeito estufa durante a carbonização da madeira com e sem o uso do queimador de gás, estimar a emissão do setor siderúrgico no estado de Minas Gerais que utiliza tal insumo, visando avaliar essa rota produtiva do setor, e por fim, comparar com a redução das emissões em um cenário hipotético em que o sistema de queima de gases fosse utilizado na produção do estado.

## **2. JUSTIFICATIVA**

O uso de combustíveis fósseis é contestado, por serem fontes não renováveis e possuírem um potencial de emissão de poluentes elevado e ambientalmente impactante, se fazendo necessário buscar meios que visem a utilização de insumos alternativos, que possuam um fator de impacto menor. Considerando esse cenário, um dos setores de maior emissão de poluentes é o setor siderúrgico.

O setor, para seu processo produtivo, se utiliza de dois insumos diferentes, cada um com suas vantagens e desvantagens, de um lado tem-se o carvão mineral, cujo uso deste insumo está ligado ao processo de mineração que traz consigo as inúmeras desvantagens desse tipo de atividade, mas possui um custo de produção menor. Do outro lado tem-se o uso do carvão vegetal como insumo alternativo. Ao se falar da produção de carvão vegetal, alguns problemas são discutidos com frequência como, uso expansivo de florestas plantadas, condições insalubres em diversas praças de produção, alta emissão de gases. Mas vale salientar que em contrapartida, temos um insumo renovável, além disso, o carvão vegetal é oriundo da biomassa que, para seu crescimento, é necessário absorver dióxido de carbono, principal gás do efeito estufa emitido nas duas rotas, deixando um saldo praticamente nulo de tal gás, no processo.

O trabalho fará o recorte espacial para análise do setor, se atendo ao estado de Minas Gerais. Minas, que se destaca como o maior polo produtivo siderúrgico do Brasil e da América Latina, logo, é o estado que mais se utiliza de uma produção baseada nas duas rotas produtivas, em consequência, desponta como um dos maiores emissores industriais de gases do efeito estufa do setor. O trabalho focou na rota produtiva à base de carvão vegetal e no estudo de um sistema que reduza as emissões do setor na área de maior emissão desta rota, a carbonização. A escolha se deve ao fato de que, além de se tratar de uma rota com insumo renovável, possui elevada participação de pequenos e médios produtores, elevada representatividade socioeconômica no estado de Minas Gerais, além de estar no centro das atenções das políticas climáticas e de redução dos gases do efeito estufa.



### **3. OBJETIVOS**

#### **Objetivos Gerais:**

- Realizar o balanço das emissões de gases do efeito estufa do processo de carbonização da madeira, com e sem um sistema de queima de gases.

#### **Objetivos Específicos:**

- Avaliar a eficácia de um sistema de queima de gases da carbonização quanto à redução de metano no processo de produção de carvão vegetal;
- Estimar a redução das emissões de metano na produção de carvão vegetal no estado de Minas Gerais, utilizando o cenário base tradicional e outro com o uso do sistema de queima de gases da carbonização;

## **4. REVISAO BIBLIOGRAFICA**

### **4.1 Sociedade, Natureza, Desenvolvimento e Geografia**

A humanidade vem passando por uma crise ambiental e sociocultural sem precedentes ao longo de sua história. O antropocentrismo que imagina os homens como “senhores e possuidores da natureza” é a base da ciência cartesiana, aquela que, transformada em tecnologia, a partir da Revolução Industrial, iniciou uma devastação nunca antes registrada no planeta, em nome de um progresso que acumula riquezas, e desacumula a natureza (SAMOHYL, 1982).

Com o passar dos anos a sociedade foi se tornando cada vez mais desenvolvida, produzindo profundas transformações no espaço, e como consequência, a influência humana na dinâmica natural tornou-se cada vez mais íntima.

E é esta relação entre sociedade e natureza que tem sido proposta desde o início da Geografia no âmbito acadêmico (MENDONÇA 2010).

Tem-se em vista que grande parte das publicações científicas da Geografia foi compreendida na perspectiva desta problemática, no entanto, muitas delas dissociavam completamente os elementos sociais dos naturais, principalmente, na fase constituinte desta ciência. Porém, pode-se afirmar que a Geografia dá um salto qualitativo a partir do momento em que compreende em seus estudos, a relação entre a sociedade e natureza (MORAIS, 2012).

De acordo com Andrade (1987), a segunda metade da década de 1970 foi marcada pela preocupação, por parte dos geógrafos, em relação aos impactos da atividade industrial sobre a natureza e a sociedade, impactos estes, ocasionados pela busca de lucro de forma exacerbada, ocasionando a intensificação da exploração dos recursos naturais.

Segundo Mendonça (2010) a Primeira Conferência Mundial do Desenvolvimento e Meio Ambiente realizada em 1972, em Estocolmo, foi a primeira tentativa de se ter em âmbito global a resolução dos problemas ambientais, além de ressaltar os altos níveis de poluição da biosfera.

Já os estudos geográficos concernentes a análise das relações socioambientais teve um grande avanço a partir da ocorrência da Segunda Conferência Mundial do Desenvolvimento e Meio Ambiente ocorrida no Brasil, no ano de 1992.

Em resumo, as reflexões filosóficas acerca da relação sociedade (homem)-natureza do início do século XIX para o início do século XXI tiveram um salto quantitativo e qualitativo amplo. A abertura metodológica promovida, bem como, a mudança do contexto socioeconômico, principalmente, com o advento das revoluções tecnológicas, tem proporcionado novos desafios para o pensamento geográfico em escala global (MORAIS, 2012).

É nessa realidade que o geógrafo, como profissional que busca entender esta relação entre o homem, seu desenvolvimento e a natureza, assume papel de destaque, cabendo também a ele propor soluções que busque uma convivência mais harmônica entre o homem e o meio a qual vive.

## **4.2 A Siderurgia Brasileira**

O setor de siderurgia é um dos principais produtores de bens intermediários para grande parte dos setores da economia, principalmente o industrial. Setores como a construção civil, automotiva, de bens de consumo como a linha branca e de bens de capital são grandes consumidores dos produtos siderúrgicos, representando um dos segmentos estruturantes de qualquer economia (CROSSETI e FERNANDES, 2005).

A indústria siderúrgica no Brasil teve seu início ainda no século XX, sendo de pouca representatividade prática e econômica no cenário nacional, porém, ganhou relevância a partir de 1910, devido à grande quantidade de projetos vinculados à exportação de minério no estado de Minas Gerais. As dificuldades de abastecimento enfrentadas pela economia brasileira pouco depois, durante a Primeira Guerra, acentuaram a percepção da importância do problema, tanto por autoridades governamentais quanto por empresários brasileiros. A questão siderúrgica somente veio a ser resolvida após a criação da Companhia Nacional Siderúrgica (CSN) (BARROS, 2015).

A siderurgia tem como principal produto o ferro gusa e posteriormente o aço, que podem ter alterações na qualidade de acordo com as variações de seus insumos. A matéria-prima utilizada são os minérios de ferro, geralmente em forma de óxidos de ferro, e o carvão vegetal ou mineral. O carvão executa papel duplo na planta siderúrgica, sendo utilizado tanto como combustível, permitindo alcançar a temperatura necessária para a fusão do minério de ferro (aproximadamente 1500°C), como também agindo como redutor do processo, associando-se ao oxigênio liberado durante a fusão do minério e deixando assim, o ferro livre.

Todo esse processo ocorre no Alto-Forno, ou seja, o alto forno possui a função de provocar a separação do ferro, Fe, do seu minério, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (IAB, 2017).

Existem dois tipos de instalações siderúrgicas, as Guseiras, onde é produzido exclusivamente o ferro gusa e as usinas integradas ou semi-integradas, onde, além da produção do ferro gusa, ocorre a produção de aço e demais produtos ferrosos (CAMIOTO e REBELLATO, 2014).

A Fundação Getúlio Vargas avaliava a produção brasileira de gusa em 1940 em 185,5 mil toneladas (Mt), chegando a 4,2 milhões de toneladas (Mt) em 1970, incluso o gusa das usinas integradas (FGV, 1973). Em 1978, a produção de gusa pelos produtores independentes atingia a 1.9 milhão toneladas ou 19% da produção total de gusa no país. (CONSIDER, 1986). Decorridos 30 anos, a evolução da produção de gusa de mercado (GM) atinge em, 2008, 8,3 milhões de toneladas (Mt) ou 25% da produção de gusa total no país, com um faturamento de US\$ 2,5 bilhões, sendo US\$ 1,0 bilhão no mercado interno e US\$ 1,5 bilhão no mercado externo. No ano de 2015, o Brasil produziu 28 milhões de toneladas de ferro-gusa, desse montante, 22 milhões de toneladas foram produzidas pela siderurgia a coque (carvão mineral) e 6 milhões de toneladas pela siderurgia a base de carvão vegetal (SINDIFER, 2015).

As indústrias de gusa, inicialmente, surgiram na região sudeste (MG e ES). Logo depois foi seguido de outro polo, que nasceu a partir da produção do minério de ferro no Estado do Pará, a partir de meados dos anos 80, o que transformou esta região, incluindo o Estado do Maranhão, em função da estrada de ferro e do porto no litoral do Maranhão, num novo polo de produção que colocou o Brasil como o principal país produtor de gusa de mercado (GM) no mundo (MME, 2009).

A produção de aço também é de relevante importância para a economia do Brasil, produzindo em média 31 milhões de toneladas/ano de aço bruto, exportando para mais de 100 países. Contribuiu, em 2010, com saldo de US\$ 337 milhões, o que representa 1,7% do saldo comercial do país. Em 2012, observou um aumento da participação do setor na economia nacional, sendo a mesma responsável por representar 4% do Produto Interno Bruto do Brasil. Além disso, o país ocupa o 11º lugar no ranking mundial de produção de aço, o que o deixa em posição estratégica no cenário mundial (IAB, 2017).

A atividade industrial siderúrgica sempre teve papel importante em todas as economias do mundo e o modelo de consumo atual se baseia intimamente ao uso de seus produtos. Em contrapartida, a mesma é uma grande emissora de poluentes no mundo e, nos

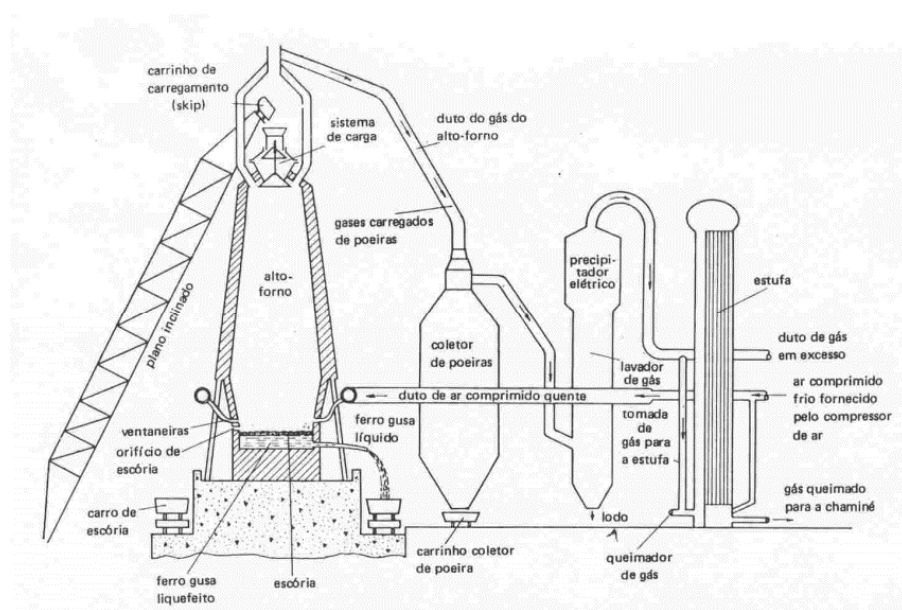
últimos anos, se observa a migração dessas indústrias para os ditos países emergentes, que buscam o crescimento de suas economias frente às grandes potências, como é o caso do Brasil.

Porém, os concorrentes brasileiros no mercado internacional de gusa, utilizam como redutor o coque, combustível não renovável de baixo custo e com elevada capacidade poluidora. Vê-se, nesse ponto, a possibilidade da competitividade de produção entre os setores, medidas como ampliar a produção do “aço verde”, com incentivos à produção florestal, de forma a contribuir para a redução de emissões de gases de efeito estufa, assim como o ferro-gusa proveniente do carvão vegetal sustentável que pode ser considerado um ferro-gusa verde. Esses são os diferenciais que o Brasil deve explorar de maneira mais significativa e podem ser utilizados como uma estratégia de *marketing*, promovendo uma grande transformação de mercado (COSTA, 2012).

### **4.3 Processo Siderúrgico**

O aço e o ferro-gusa são produzidos, basicamente, a partir de minério de ferro, carvão e cal (UNFER, 2011). Antes de serem levados ao alto forno, o minério e o carvão são previamente preparados para melhoria do rendimento e economia do processo. O minério é transformado em pelotas e o carvão é destilado, para obtenção do coque, dele se obtendo ainda subprodutos carboquímicos (IAB, 2017), o carvão vegetal, após ser produzido, chega em caminhões nas usinas.

Segundo Unfer (2011) o processo de fabricação, seguem os seguintes procedimentos na planta industrial (Figura 1):



**Figura 1** - Seção transversal de uma instalação de alto-forno, incluindo o equipamento auxiliar principal. Fonte: Unfer (2011, pag.13)

- O alto forno é inicialmente carregado com o coque ou carvão vegetal e depois aceso. Depois de aproximadamente 24 horas estará quente suficiente para receber camadas sucessivas de Minério ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); Coque (C)/Carvão Vegetal (C); Substância Fundente ( $\text{CaCO}_3$ );
- A carga introduzida pelo topo, ao entrar em contato com a corrente gasosa ascendente sofre uma secagem;
- As temperaturas mais elevadas ocorrem nas proximidades das ventaneiras: da ordem de 1.800 a 2000°C. As principais reações que ocorrem no alto forno são:  $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$  (gerando calor) o  $\text{CO}_2$  produzido nesta etapa, ao entrar em contato com o coque ou carvão vegetal, se desfaz;  $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$  (O CO produzido nesta etapa atua também como agente redutor/ o próprio carbono do carvão age como agente redutor);
- Para cada tonelada de ferro produzida, são usadas cerca de 2 t de minério, 0,5 t de calcário, 1 t de coque e 4 t de ar, e, como subprodutos, cerca de 0,5 t de escória e 6 t de gás (UNFER, 2011).

No processo de redução, o ferro se liquefaz e é chamado de ferro gusa ou ferro de primeira fusão. Impurezas como calcário, sílica etc. formam a escória, que é matéria-prima para a fabricação de cimento (IAB, 2017). O ferro gusa é uma liga ferro-carbono de alto teor de carbono e teores variáveis de silício, manganês, fósforo e enxofre (UNFER, 2011).

A etapa seguinte do processo é o refino, e neste o ferro gusa é levado para a aciaria, ainda em estado líquido, para ser transformado em aço, mediante queima de impurezas e adições. O refino do aço se faz em fornos a oxigênio ou elétricos. Finalmente, a terceira fase clássica do processo de fabricação do aço é a laminação. O aço, em processo de solidificação, é deformado mecanicamente e transformado em produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de transformação, como chapas grossas e finas, bobinas, vergalhões, arames, perfilados, barras, entre outros produtos (IAB, 2017).

#### **4.4 Aspectos técnicos e ambientais: Carvão Vegetal x Carvão Mineral**

O setor siderúrgico, em função da natureza de suas operações, demanda grande quantidade de matérias-primas e insumos. O consumo de materiais oriundos do setor extrativista torna o esforço pelo uso racional desses insumos ainda mais importante. Algumas empresas usam carvão vegetal, produzido a partir de florestas plantadas de eucalipto, em lugar do carvão mineral. Substitui-se, assim, material proveniente de fonte não renovável por fonte renovável, proporcionando, além disso, significativa redução na emissão de gases de efeito estufa (IBS, 2007).

No entanto, quando se compara economicamente os dois processos de produção, via carvão vegetal e via carvão mineral, a utilização do carvão mineral, de modo geral, é mais viável, pois o custo de implantação de uma siderúrgica a carvão vegetal é mais oneroso, devido ao investimento na silvicultura, floresta plantada, que tem como finalidade suprir o carbono necessário na produção do ferro gusa (MOTA, 2013).

Assim, tanto o carvão de origem vegetal quanto o de origem mineral são de interesse e há de se destacar que tanto para obtenção de um, quanto do outro, existem impactos. Os impactos no ambiente, principalmente os ligados às emissões atmosféricas, acontecem nas várias fases do processo, desde o transporte, manuseio e preparação da matéria-prima, passando por sua transformação em produtos finais, até a destinação que se dá aos diversos resíduos que resultam dessas várias etapas de produção (IBS, 2007). Devido às pressões dos órgãos ambientais, que buscam diminuir o máximo possível às atividades de potenciais impactos, utilizar uma fonte de baixo potencial poluidor, é um diferencial.

O carvão mineral pode ser descrito como um combustível fóssil sólido formado a partir da matéria orgânica de vegetais depositados em bacias sedimentares. Por ação de pressão e temperatura em ambiente sem contato com o ar, em decorrência de soterramento e

atividade orogênica, os restos vegetais ao longo do tempo geológico se solidificam, perdem oxigênio e hidrogênio e se enriquecem em carbono, em um processo denominado carbonificação. Quanto mais intensas a pressão e a temperatura a que a camada de matéria vegetal for submetida, e quanto mais tempo durar o processo, mais alto será o grau de carbonificação atingido, ou rank, e maior a qualidade do carvão (ARAUJO, 1997).

O carvão mineral constitui dois terços dos recursos energéticos não-renováveis nacionais, sendo suas reservas vinte vezes maiores do que as do petróleo e setenta e cinco vezes superiores às do gás natural (Campos *et. al* 2003).

A maior parte da oferta de carvão mineral é extraída através da mineração subterrânea (Figura 2), embora também existam as minas a céu aberto.



**FIGURA 2** – Trabalho em mina de carvão subterrânea. (Foto: Agencia Vale)

Existem dois métodos lavra subterrânea: câmara e pilares (room-and-pillar); e frente larga (longwall mining). No primeiro método, os depósitos de carvão são recuperados de maneira a formar galerias, onde os pilares são formados pelo próprio mineral que sustentam a cobertura da mina e controlam o fluxo de ar. As câmaras normalmente têm de 5 a 10 metros de largura e os pilares, 30 metros de extensão. O mineral extraído é carregado através de esteiras para a superfície. Na medida em que a mineração avança em direção ao limite do depósito, inicia-se a retirada da mina (retreat mining). Este processo consiste na mineração do carvão que forma os pilares, de forma a permitir que a cobertura tombe. Ao final deste processo, a mina é abandonada (MME, 2010).



O método da frente larga (longwall mining) envolve a extração total do carvão de uma seção da cobertura ou da frente (larga) utilizando cortadeiras mecânicas. Antes de iniciar a lavra, é necessário um planejamento cuidadoso para assegurar que a aplicação do referido método seja realmente adequada à geologia da mina. A frente do depósito do mineral (longwall) varia de 100 a 350 metros e a cobertura é sustentada por macacos hidráulicos. Uma vez que o carvão é totalmente extraído da área, permite-se que o teto da mina tombe, e então a seção é abandonada. O longwall é muito intensivo em capital, porém, é o método de maior produtividade no mundo (MME, 2010).

A etapa extrativista mineral é mais onerosa e requer desmatamentos de grandes áreas. Geralmente nas minas a céu aberto são criados grandes morros esculpidos em forma de escadas – para facilitar a extração e o transporte –, mas há com isso, significativo impacto local (VITAL; PINTO, 2011).

Mesmo que a resolução 001/86 do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente), diga que além do plano de lavra, a empresa também deve prestar a reabilitação da área a ser mineirada os diferentes processos de lavra utilizados pelas empresas mineradoras, aliados às dificuldades na fiscalização, conduzem na prática a deficiências no processo de construção, resultando normalmente na contaminação das camadas superficiais do solo construído com os resíduos do carvão (Campos *et. al* 2003).

Com os resíduos encontra-se a pirita ( $\text{FeS}_2$ ) que, em contato com o ar e a água, oxida-se formando  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Os altos níveis de acidificação resultantes da oxidação da pirita podem provocar dissolução de minerais aluminossilicatados, elevar a concentração de metais, como Al, Fe, Mn, Cu, Ni e Zn, a níveis tóxicos (BANRHISEL *et al.*, 1982), acelerar as perdas de Ca e Mg, por lixiviação na forma de sais sulfato (PITCHEL *et al.*, 1994) e pode ainda determinar a deficiência de P, N, Mo e B, prejudicando o programa de revegetação das áreas exploradas (PUGH *et al.*, 1981; NORDSTROM, 1982; PITCHEL *et al.*, 1994). Nas minas de extração subterrâneas um fator de relevância, são as chances de desmoronamentos e deslizamentos, colocando em risco a vida dos trabalhadores, outro fato agravante está ligado ao ambiente de trabalho, uma vez que a oferta de oxigênio se reduz à medida que a mina avança, logo caso ocorra acidentes, a retirada dos trabalhadores das minas soterradas vira uma luta contra o relógio.

A emissão de poluentes também assume papel de destaque, pois as principais fontes de emissão do setor correspondem aos processos de: mineração, estocagem e transporte dos materiais (minério e carvão), o tráfego de veículos, o preparo do carvão na coqueria

(carregamento, coqueificação, desenformamento e produção de vapor), a sintetização, alto-forno (sopro e aquecimento do ar), aciaria, lingotamento e central termoelétrica (PAULA, 2010).

Na produção de ferro-gusa, de um lado, são gerados principalmente, gás metano ( $\text{CH}_4$ ), CO e  $\text{CO}_2$ , seja ao longo de todas as rotas de produção, pré-usina ou nas reações químicas no alto-forno. Na produção de gusa a carvão mineral, há emissão de outros diversos poluentes como óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), material particulado e diferentes hidrocarbonetos orgânicos, como o benzeno (MILANEZ e PORTO, 2008).

Do outro lado, tem-se o carvão vegetal como insumo à siderurgia brasileira, sendo essa a única no mundo e, por utilizar principalmente carvão originário de florestas plantadas, contribui decisivamente para a manutenção do equilíbrio ambiental e também constitui importante fator de inclusão social, gerando emprego e renda em todas as camadas da população (SINDIFER, 2012). No Brasil, existem mais de 120 indústrias que utilizam carvão vegetal no processo de produção de ferro-gusa, de ferro-ligas e de aço (IBA, 2017).

O carvão vegetal pode ser definido com um sólido rico em carbono, que é obtido através da queima de biomassa, durante o processo de carbonização. Segundo Pinheiro *et al.* (2006), a carbonização é um processo em que a madeira é submetida a altas temperaturas, em ambiente fechado, com pequena quantidade ou exclusão total de ar, durante o processo são liberados gases, vapores de água e líquidos orgânicos, permanecendo como resíduos, principalmente o alcatrão e o carvão vegetal (Figura 3).



**FIGURA 3** – Produção tradicional de carvão vegetal. (Foto: Celio dos Santos, 2016; São Mateus - ES).

Em 2002 a produção de carvão vegetal utilizou aproximadamente 50% de madeira de origem nativa, no ano de 2015, o percentual de madeira utilizada originada de florestas plantadas, foi de 87,1%, enquanto os 12,9% restantes vieram da extração vegetal (IBGE, 2015), esse dado revela a tendência à diminuição do uso de madeira nativa para a produção de carvão vegetal, conseqüentemente diminuindo a pressão sobre os remanescentes florestais nativos.

No Brasil, a principal espécie utilizada para a produção de florestas plantadas é o eucalipto. O eucalipto é uma das melhores opções para a produção de carvão vegetal, devido à rusticidade, produtividade e às características da madeira. Os reflorestamentos de eucalipto, bem planejados e manejados, produzem árvores de tronco reto, bastante uniformes e madeira com massa específica adequada para a obtenção de carvão de boa qualidade (PINHEIRO *et al.* 2006). Algumas espécies do gênero *Eucalyptus* destacam-se para a produção de carvão vegetal. No Estado de Minas Gerais as espécies mais cultivadas para esse fim são o *Eucalyptus camaldulensis*, o *E. urophylla*, o *E. grandis*, o *E. saligna*, e o *E. citriodora* (FILHO e SANTOS, 2013).

Quando as plantações são destinadas à produção de carvão vegetal, o corte da madeira é realizado entre 5 e 7 anos. A espécie possui facilidade de brotação, sendo que logo após o corte, dão origem a uma nova floresta. Em média são realizados três cortes em cada floresta e, após o terceiro corte, é plantada uma nova muda (RAAD, 2006).

Quando realizado nos moldes tradicionais, a produção de carvão vegetal apresenta alguns impactos ambientais, como, emissão descontrolada de gases condensáveis e não

condensáveis, os locais de trabalho se tornam insalubres uma vez que as praças de produção ficam repletas de fumaça e particulados dos fornos, além do problema do uso de madeira nativa, realidade essa última que vem se alterando nos últimos anos.

O setor siderúrgico é bastante sensível às iniciativas que visam à redução da emissão de gases causadores do efeito estufa. O processo produtivo das empresas do setor tem variadas etapas que são grandes fontes de emissão desses gases (IBS, 2007).

Na rota siderúrgica em que se usa como base o carvão vegetal como principal insumo, em um forno de conversão madeira/carvão, com um rendimento médio de produção de 25%, temos, durante a carbonização, uma emissão total de, aproximadamente, 62% de CO<sub>2</sub>; 34% de CO; 2,34% de CH<sub>4</sub>, além de outros compostos em menor quantidade (FERREIRA, 2000).

Quanto à produção propriamente do ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal, Mallard (2009) afirma que o gás de alto-forno é composto de aproximadamente 20% de CO<sub>2</sub>, 20% de CO, 1% de CH<sub>4</sub>, 3% de H<sub>2</sub> e o restante de nitrogênio. Em termos gerais, são emitidos, para cada tonelada de ferro-gusa produzido, 1872 Kg de CO<sub>2</sub>, valor esse que está acima do proposto pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), que adota um fator de emissão de 1,35 toneladas de CO<sub>2</sub> para cada tonelada de ferro-gusa produzida (COSTA, 2012).

Porém, como todos os vegetais em processo de crescimento, as árvores retiram gás carbônico da atmosfera ao mesmo tempo em que nela liberam oxigênio. Pelas suas dimensões, pela ampla superfície foliar e pelo longo ciclo de colheita, as florestas plantadas fazem isso com particular eficiência. Num sistema de rendimento sustentável, para cada hectare em processo de colheita, existem pelo menos seis em processo de crescimento, purificando o ar e amenizando as variações climáticas (SINDIFER, 2012).

Segundo o MMA (2014), o uso do carvão vegetal na produção de 100 toneladas de aço ou ferro gera os seguintes indicadores:

- Redução de 190 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente em relação à siderurgia mundial;
- 90 empregos gerados no campo e nas zonas urbanas (atividades de plantio, colheita de madeira e produção de carvão e produtos siderúrgicos);
- Produção florestal de cerca de 140 hectares de floresta plantada, o que representa investimento de R\$ 700 milhões;
- Proteção de, no mínimo, 28 hectares de floresta nativa (áreas de reserva legal).

Ao levar essa variável em consideração, apesar de termos a emissão de CO<sub>2</sub> no processo de carbonização e ao longo de toda a rota produtiva siderúrgica a base de carvão

vegetal, a floresta de produção executa papel importante e relevante, ao realizar a absorção desse gás.

O abatimento do carbono lançado na atmosfera na forma de CO<sub>2</sub> é reconhecido pelas nações que participam das reuniões internacionais relativas ao clima, se tornando uma importante alternativa frente ao uso de combustíveis fósseis não renováveis, isso claro, desde que manejados corretamente e utilizados de forma consciente (FERREIRA, 2000).

Mas, vale lembrar que embora ocorra a absorção de CO<sub>2</sub>, ainda se tem a emissão de outros gases poluentes que não são absorvidos pela floresta, como o CH<sub>4</sub> e o CO, havendo a necessidade de propor outros meios para reduzir a emissão desses gases.

O Brasil se destaca quando o tema é propor políticas e incentivos que busquem reduzir as emissões de poluentes em sua matriz energética e industrial, pois em dezembro de 2015, assinou o Acordo de Paris, que une esforços das nações para adotar uma economia de baixo carbono até o fim deste século. O Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025, e apresentou o indicativo de redução de 43%, até 2030 (MMA, 2017) e é nesse contexto, que utilizar fontes renováveis em sua matriz é fator fundamental para que a meta seja cumprida.

A escolha pela siderúrgica, em relação ao uso do insumo, se baseia em diversos fatores, no fator econômico, se comparando os custos médios de uma unidade que produz o carvão vegetal a partir de florestas plantadas e uma unidade que produz o ferro-gusa em coqueria própria, os custos de produção do ferro-gusa a carvão vegetal seriam 46,5% mais caros do que os de gusa a carvão mineral (MME, 2010).

Do ponto de vista ambiental, o grande diferencial entre os dois insumos está ligado à questão da sustentabilidade do uso dos mesmos, enquanto o carvão vegetal se apresenta como uma alternativa renovável, o carvão mineral, como todo combustível fóssil, é formado em um processo que leva milhões de anos. Sendo assim, é uma matéria não renovável dentro da escala humana.

Em tempos em que o efeito estufa e aquecimento global assumem papéis de protagonistas e a atenção do mundo é voltada para eles, à siderurgia a carvão vegetal deveria receber apoio e incentivos das autoridades brasileiras em todos os níveis e também das comunidades ambientalistas nacionais e internacionais.

Assim, o presente trabalho irá discutir a partir deste ponto, a rota produtiva siderúrgica a base de carvão vegetal, uma vez que dentre as duas rotas siderúrgicas é a que se utiliza de um insumo renovável, o foco será dado principalmente no que diz respeito às emissões

atmosféricas do setor durante o processo de obtenção do carvão vegetal e formas de mitigação dos impactos no processo, em relação ao recorte espacial, se focará no estado de Minas Gerais, devido a sua relevante representatividade no setor e no uso de tal insumo.

#### **4.5 Produção de Carvão Vegetal**

Do carvão produzido no país, estima-se que 80% são oriundos de pequenos e médios produtores. Esses produtores em geral optam por fornos de baixa capacidade volumétrica, devido ao elevado custo com maquinário e ao maior investimento inicial para a construção de fornos de maiores dimensões (OLIVEIRA, 2012), além disso, o controle da emissão de gases nesse modelo de produção tradicional, em geral é inexistente.

Ao discutir as emissões na produção de carvão vegetal, deve-se primeiro entender o processo de obtenção do mesmo.

De acordo com Pimenta (2004), independentemente dos equipamentos utilizados para a obtenção do carvão vegetal, faz-se necessário o controle dos parâmetros da carbonização, tais como, o tempo, a temperatura final de carbonização e a taxa de aquecimento. O controle de tais parâmetros influencia diretamente a qualidade do processo e, principalmente, do produto final.

Segundo Cardoso (2012) ao analisar o processo de produção do carvão vegetal, pode-se subdividir o processo em quatro etapas:

1ª Etapa – (Até 110°C) Nesta fase ocorre a secagem, ocorrendo majoritariamente a liberação da umidade da madeira.

2ª Etapa – (110° a 250°C) Ocorre o processo de torrefação da madeira, sendo que a partir de 180°C tem início a liberação da água de constituição pela decomposição da celulose e hemicelulose e pouco peso é perdido até 250°C.

3ª Etapa – (250° a 350°C) Neste ponto ocorre a carbonização propriamente dita, com a intensificação da decomposição da celulose e hemicelulose ocorre expressiva perda de peso, formando-se gás, óleo e água.

4ª Etapa – (Acima de 350°C) Por fim, temos a fixação do carbono, ocorre redução gradual na liberação dos voláteis, principalmente gases combustíveis. Em termos gerais, nesta etapa o carvão possui cerca de 75% de carbono fixo e se considera que a carbonização está praticamente pronta.

No modelo de produção tradicional (Figura 4), o progresso da carbonização é avaliado pela coloração dos gases liberados através dos orifícios, e o controle ocorre pelo fechamento progressivo das entradas de ar. O processo completo tem duração de sete dias, sendo três dias para carbonizar, três para resfriar e um dia para descarga e carregamento do forno (OLIVEIRA, 2012).



**FIGURA 4** – Modelo tradicional de produção de carvão vegetal.  
(Foto: Beto Chagas, 2015)

De acordo com Brito (1990), os produtos gerados na carbonização da madeira, além do carvão vegetal, podem ser caracterizados em água e produtos orgânicos, incluindo o ácido acético, metanol, compostos aromáticos, derivados fenólicos, aldeídos e breu ou piche; e em gases não condensáveis, dentre os quais se destacam o metano ( $\text{CH}_4$ ), o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), o hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e os hidrocarbonetos.

Pode-se dizer que a emissão de gases não condensáveis pode ser dividida em duas partes durante o processo. A primeira ocorrendo entre 275 e 425°C, sendo essa caracterizada pela ocorrência dos maiores picos de emissão de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  e  $\text{CO}_2$ . A segunda ocorre nas temperaturas acima de 450°C, apresentando baixas concentrações de óxidos de carbono,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$  (GONZÁLEZ *et al.*, 2003).

O rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal produzido também dependerão das características da madeira utilizada como matéria-prima e do modo de condução da carbonização, mediante o controle da temperatura, da taxa de aquecimento, do

tempo de exposição da madeira ao calor e da tecnologia empregada na conversão, ou seja, o tipo de forno (OLIVEIRA, 2012).

#### **4.6 Cenário em Minas Gerais**

A cadeia produtiva ligada ao setor siderúrgico concentra-se em estados com grandes reservas de minério de ferro e área de floresta plantada. As principais reservas de minério de ferro estão localizadas nos Estados de Minas Gerais, Pará, Mato Grosso do Sul e São Paulo (MME, 2009).

A área total de árvores plantadas no Brasil totalizou 7,8 milhões de hectares em 2015, crescimento de 0,8% em relação ao ano de 2014. Os plantios de eucalipto ocupam 5,6 milhões de hectares da área de árvores plantadas do País e estão localizados, principalmente, em Minas Gerais (24%), em São Paulo (17%) e no Mato Grosso do Sul (15%). Nos últimos cinco anos, o crescimento da área de eucalipto foi de 2,8% a.a. O Mato Grosso do Sul se destaca com o plantio de 450 mil hectares nos últimos cinco anos (IBA, 2016).

O Estado de Minas Gerais atraiu a atividade siderúrgica por ser rico em dois insumos básicos para a produção do ferro gusa – o carvão vegetal e o minério de ferro, transformando-se no maior produtor do Brasil (FEAM, 2010), o estado possui atualmente o maior parque siderúrgico da América Latina a base de Carvão Vegetal.

A história do carvão vegetal está associada a uma visão de supressão de florestas. Esforços, apostando em uma siderurgia cuja fonte de carbono é oriunda de plantações de florestas e não de matas nativas com alto valor ecológico, foram sendo realizados por parte de industriais mineiros para romper esse espectro projetado pelo passado (MORELLO, 2009).

Minas Gerais se destaca em iniciativas que visam à sustentabilidade do setor de forma a não suprimir os remanescentes florestais. A Lei Florestal – Lei 18.365/2009 alterou a legislação florestal no Estado e fixou de maneira inédita no país a redução progressiva do consumo legal de produtos ou subprodutos originados da vegetação nativa, em especial o carvão vegetal. A lei estabelece que o consumo de produtos e subprodutos florestais de matas nativas não deverá ser maior do que 5%, a partir de 2018. A legislação anterior permitia que as indústrias suprissem toda a sua demanda por matéria-prima com produtos florestais de mata nativa, desde que houvesse reposição florestal.

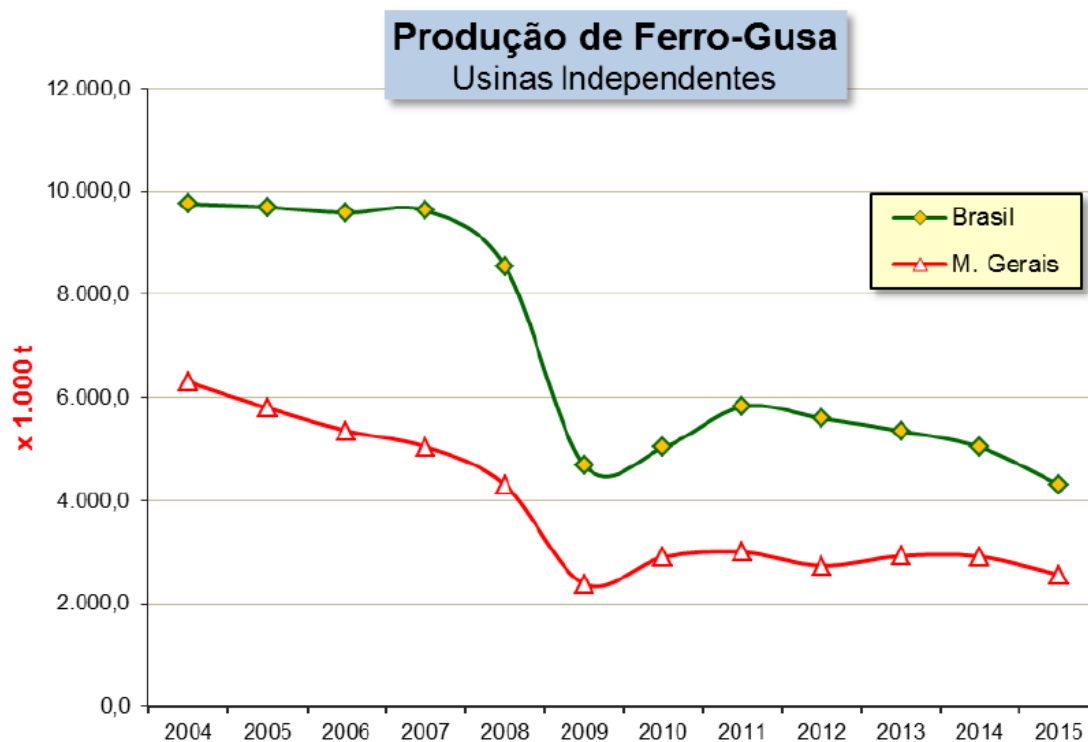
Em 2012, o consumo de carvão vegetal de origem de florestas plantadas pelos grandes consumidores do estado de Minas Gerais chegou próximo à autossuficiência, além disso, se



observou uma redução de aproximadamente 61% no consumo de florestas nativas em relação aos últimos quatro anos (IEF, 2012).

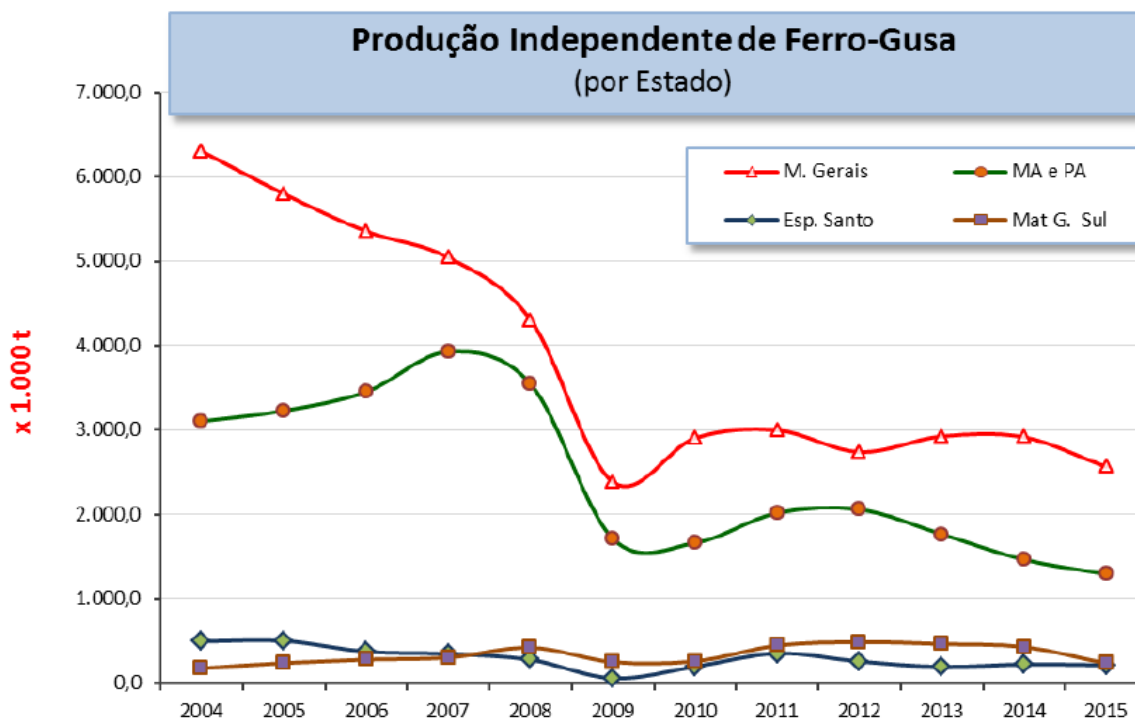
O setor de base florestal corresponde a 7% do PIB do estado. No ano de 2015, somente a produção de ferro-gusa pelas siderurgias independentes arrecadaram em impostos (ICMS, PIS, CONFINS, IPI) um total de R\$ 239.159,8, com uma produção de 2 milhões de toneladas (SINDIFER, 2016). Essa conta está se referindo somente à produção de ferro-gusa das indústrias independentes, não contabilizando a arrecadação das integradas.

O estado ainda representou mais de 50% da produção nacional de ferro-gusa no mesmo ano, 2,5 milhões de toneladas (MG) contra 4,3 milhões de toneladas (BR), como pode ser observado na Figura 5 (SINDIFER, 2015).



**Figura 5** – Produção de Ferro-Gusa do Brasil e do Estado de Minas Gerais no ano de 2015 (SINDIFER, 2015).

Pode-se observar um decréscimo da produção ocasionada pela crise econômica, tanto do setor quanto na economia do país nos últimos anos, porém, mesmo nesse contexto, o estado ainda é o principal representante da produção nacional deste ramo do setor. Quando se analisa a produção por estados (Figura 6), a importância da produção mineira fica ainda mais evidente.



**Figura 6** – Produção de Ferro-Gusa no Brasil por estados, referente ao ano de 2015 (SINDIFER, 2015)

Como mencionado à produção nacional de ferro-gusa está diretamente ligada às áreas de maiores produções de minério e de florestas plantadas, se baseando majoritariamente nestes cinco estados Minas Gerais, Espírito Santo, Mato Grosso do Sul, Maranhão e Pará (sendo esses dois últimos representados pelo polo de Carajás) (SINDIFER, 2015).

Observa-se o quanto o estado de Minas Gerais assume papel principal na produção de ferro-gusa pelas usinas independentes. Em termos percentuais, no ano de 2015 tem-se, Minas Gerais (59,5%); Espírito Santo (30%), Mato Grosso do Sul (5,5%) e Maranhão e Pará (5%); em termos de produção temos Minas Gerais (2,5 milhões de toneladas); Espírito Santo (1,2 milhões de toneladas); Mato Grosso do Sul (237 mil toneladas) e Maranhão e Pará (215 mil toneladas) (SINDIFER, 2015).

A queda mostrada nos dois gráficos, principalmente a partir de 2007 está ligada a crise mundial, o mercado de carvão vegetal e a economia mundial são interligados. A crise mundial de 2008 mudou o cenário do grande crescimento, nos anos de 2005 a 2008. A economia mundial e consequentemente a brasileira entrou em um período de desaceleração (ABRAF, 2012). A instabilidade da economia mundial atinge a siderurgia e diretamente o mercado do

carvão vegetal. A crise de 2008 atingiu a siderurgia, principalmente no momento em que afetou as indústrias de construção civil e automobilística. Esse setor industrial demonstrou forte queda nas vendas aos consumidores finais nos meses de recessão. Outro aspecto, ligado ao mercado externo é que cerca de 30% das vendas são para os produtores de aço e 60% do ferro-gusa produzido são dirigidos à exportação (IAB, 2017).

A crise mundial ocorrida em 2011, também afetou a cadeia produtiva do carvão vegetal. Nesse ano, ocorreu a desativação de unidades de produção de ferro-gusa no Polo de Carajás, formado pelas siderúrgicas independentes localizadas nos estados do Pará e do Maranhão, e também no polo de Minas Gerais (ABRAF, 2012).

Mesmo com as constantes crises econômicas mundiais e a sua influência no setor siderúrgico, um dado de relevante interesse da análise do setor é o de geração de empregos. Segundo levantamento do anuário da SINDIFER referente ao ano de 2015, o setor siderúrgico de ferro-gusa é responsável por uma parcela significativa de empregos diretos e indiretos no estado. Na rota de produção a base de carvão vegetal, a cadeia empregou aproximadamente 76.645 trabalhadores, esse dado tomando como base toda a rota de produção, indo desde os plantios florestais, produção do carvão vegetal até os trabalhos diretos das usinas. Vale lembrar que Minas Gerais têm 44% da sua produção utilizando carvão vegetal (SINDIFER, 2015).

Em relação à produção mineira de carvão vegetal e a sociedade, no ano de 2015, Minas além da produção de 4,3 milhões de toneladas ferro gusa a carvão vegetal, das 20 maiores cidades produtoras desse insumo, 18 delas se encontram em território mineiro (SINDIFER, 2015).

O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) envolve os índices de longevidade, educação e renda, que variam entre 0 (pior) e 1 (melhor). O IDHM brasileiro segue as mesmas três dimensões do IDH Global - longevidade, educação e renda, mas vai além: adequa a metodologia global ao contexto brasileiro e à disponibilidade de indicadores nacionais. Embora meçam os mesmos fenômenos, os indicadores levados em conta no IDHM são mais adequados para avaliar o desenvolvimento dos municípios brasileiros. Assim, o IDHM - incluindo seus três componentes, IDHM Longevidade, IDHM Educação e IDHM Renda - conta um pouco da história dos municípios em três importantes dimensões do desenvolvimento humano durante duas décadas da história brasileira (PNUD, 2017).

No último levantamento de IDHM, ocorrido em 2010, os municípios produtores de Gusa em Minas Gerais se destacam no que se refere ao IDHM: em Sete Lagoas o IDHM de

0,760; em Divinópolis de 0.764; Betim de 0.749; Bom Despacho 0,750; Itaúna 0,758; Conselheiro Lafaiete 0,798; Itabira 0,756; Matozinho 0,731; Pará de Minas 0,725 todos acima 0,7, que registra uma avaliação positiva para os municípios produtores, visto que estão acima do IDHM médio nacional que é de 0,727 (ADHB, 2017).

Apesar do alto IDHM nos municípios produtores de carvão vegetal e gusa, que revela uma relação positiva quanto ao aspecto social local, no que tange a questão ambiental, cabe mencionar que a liberação de gases na fase da pirólise figura um dos principais fatores de discussão quanto à perda de sustentabilidade da cadeia produtiva (MORELLO, 2009), se fazendo necessário cada vez mais dar atenção ao processo de carbonização, para que essa etapa já estigmatizada seja vista como referencia de processo ambientalmente limpo e socialmente correto.

Segundo Brito (2010), 60% dos fornos utilizados são do tipo “rabo-quente”; 10% são fornos de superfície; 20% da produção ocorrem em fornos retangulares e os 10% restantes são realizadas por outras tecnologias.

As formas e os tamanhos distintos fazem com que o processo seja irregular, de baixo rendimento e dependente diretamente da experiência do operador, devido à inexistência de instrumentos para medição das variáveis do processo (OLIVEIRA, 2012).

#### **4.7 Principais fornos utilizados pelo produtor em Minas Gerais**

Por ser uma fonte de renda simples, abundante, acessível e barata, a produção de carvão vegetal é bastante utilizada nos meios rurais, tanto para uso doméstico, quanto para uso comercial. Historicamente a maioria das indústrias e produtores nas mais distintas escalas, não adotam novas tendências à inovação e adoção de tecnologias aperfeiçoadas nas atividades de carbonização, prevalecendo processos produtivos primitivos, com baixa eficiência energética e operacional (TACCINI, 2011).

Segundo Oliveira (2012), no estado de Minas Gerais, os principais tipos de fornos utilizados são:

**Forno “rabo-quente”** (Figura 7): O modelo mais simples de forno de alvenaria e mais difundido entre os pequenos produtores. De acordo com Mendes *et al.* (1982), sua construção é recomendada para áreas planas e ao longo de toda a extensão de sua parede são deixados orifícios para a entrada de ar e saída dos gases gerados. Esses fornos são de baixo custo e fácil manuseio, podendo um único trabalhador operar de sete a dez fornos, realizando as atividades de carregamento, controle da carbonização, descarga, deposição na praça e limpeza da área (MINETTE, 2007).



**FIGURA 7** – Forno “rabo-quente” (Foto: Fundação Gaia, 2001)

O forno “rabo-quente” apresenta baixo rendimento gravimétrico, variando de 20 a 28%, devido ao excesso de queima da madeira e de suas características rudimentares (MENDES *et al.*, 1982).

**Forno de encosta** (Figura 8): bastante utilizado nas regiões de topografia acidentada, com diâmetro variando de 3 a 4 m e altura entre 2,5 a 2,8 m, podendo ter de uma a três chaminés. Para sua construção aproveita-se o desnível natural do terreno, apoiando a cúpula sobre a borda do terreno, que assume a função de parede do forno, reduzindo a quantidade de material utilizado na construção. Para condução da carbonização, as entradas de ar são posicionadas na cúpula (MENDES *et al.*, 1982).

O controle da carbonização no forno de encosta baseia-se na quantidade e coloração dos gases emitidos pelas chaminés. A frente de carbonização desenvolve-se de maneira desuniforme. Assim, é possível que o aspecto dos gases em cada uma das chaminés não seja semelhante. O ciclo de carbonização tem duração de cinco a nove dias (MENDES *et al.*, 1982).



**FIGURA 8** – Forno de Encosta (Foto: Autoria Própria, 2017; Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – Viçosa/MG)

**Forno de superfície** (Figura 9): A operação nesses fornos é mais simples, pois os gases são expelidos somente pela chaminé e o acompanhamento do processo de carbonização pode ser avaliado pela temperatura externa e inspeção visual das aberturas para entrada de oxigênio. O forno de superfície apresenta rendimento gravimétrico variável de 28 a 34%. (Mendes *et al.*, 1982).

De acordo com Carneiro *et al.* (2013), diversas alterações no forno de superfície foram realizadas com o intuito de melhorar o processo de produção de carvão vegetal, modificando o posicionamento e número de entradas de ar, a dimensão e posição da chaminé e a adaptação de câmara de combustão externa ao forno.



**FIGURA 9** – Forno de Superfície (Autoria Própria, 2017; Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – Viçosa/MG)

**Forno Retangular (Figura 10):** Visando aumentar a produtividade e obter um produto com maior qualidade, os grandes produtores de carvão vegetal investiram na construção de fornos com grande capacidade volumétrica (OLIVEIRA, 2012);

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal desses fornos varia de 30 a 35%. Porém são fornos onerosos, geralmente utilizados em grandes empresas. Para viabilizar economicamente a construção dos fornos retangulares, eles devem ser instalados em uma mesma unidade de produção de carvão vegetal, com produção mensal de pelo menos 500 metros cúbicos de carvão (mdc) (BRITO, 2010).



**Figura 10** – Forno Retangular em unidade de produção. (Foto: Construtora Prefac, 2013)

Para melhorar o processo de carbonização, além da adoção de mecanismos de controle da temperatura do forno, diversos sistemas estão sendo desenvolvidos para reduzir seu tempo de resfriamento e conseqüentemente elevar a produtividade dos fornos, permitindo maior número de carbonizações para um mesmo período.

A produção de carvão vegetal esteve sempre associada com pobreza, falta de tecnologia, até mesmo com crimes ambientais e sociais, porém, atualmente essa visão vem sendo modificada pela adoção de novas tecnologias, cada vez mais sustentáveis, do ponto de vista econômico, social e ambiental (CARDOSO, 2010).

#### **4.8 Os riscos ao produtor de uma produção com alta emissão de gases**

Existem vários riscos à saúde que ocorrem nesses modelos arcaicos de produção: exigência de grande esforço físico, exposição à radiação solar excessiva, o calor emitido pelos fornos, mas o principal risco é a exposição aos efluentes atmosféricos liberados na carbonização. Segundo dados da Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho (FUNDACENTRO, 1996), aquelas pessoas que estão em contato permanente com a fumaça oriunda da combustão da madeira e com o pó de carvão (Figura 11), têm 10 vezes mais chances de desenvolverem câncer de pulmão, de rins, de pele e olhos, pela presença do alcatrão e silicose.





**Figura 11** – Trabalhador realizando o “barrelamento” (fechamento de rachaduras com selante, geralmente se usa barro como material) em fornos de modelos tradicionais de produção, no sistema tradicional, o trabalhador fica em constante contato com a fumaça e demais efluentes atmosféricos (Foto: CDINEWS)

A exposição ao calor e à fumaça é constante. Segundo o Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO, 2008), a média de vida dos trabalhadores nas carvoarias tradicionais é de 54 anos para o sexo masculino e de 59 para o sexo feminino, sendo que doenças cardiovasculares foram as principais causas dos óbitos.

Segundo a Fundacentro (2007), as fumaças são aerodispersóides resultantes da combustão incompleta de materiais orgânicos e constituídas por partículas com diâmetro inferior a 1 micrômetro. Portanto, a acepção de fumaça é complexa, mas pode ser compreendida como uma mistura de sólidos em suspensão, vapores e gases, identificados quando um material sofre o processo de pirólise ou combustão. No processo de carbonização da madeira são produzidos subprodutos da pirólise e da combustão incompleta, como o ácido pirolenhoso, gases de combustão, Alcatrão, Metanol, Ácido Acético, Acetona, Acetato de Metila, Piche, Dióxido de Carbono, Monóxido de Carbono, Metano, que escapam dos fornos através dos orifícios (Guerra, 1995). Além disso, podem provocar lesões das vias aéreas e intoxicação. Segundo a Fundacentro (1996), dentre as principais doenças ocorridas nas praças de carvão, causadas por agentes químicos, destacam-se a: pneumomoniose, que é uma doença pulmonar causada pela acumulação de pó de carvão nos pulmões.

Os trabalhadores também ficam sujeitos à doença pulmonar obstrutiva crônica. Quase todos os casos das doenças ocorrem pelo efeito nocivo da fumaça nos pulmões, por vários anos, o que determina uma inflamação da mucosa dos brônquios (tubos que espalham o ar

dentro dos pulmões). A liberação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos durante a queima da biomassa pode provocar alterações orgânicas e a indução do aparecimento de câncer no pulmão, além de problemas mais rotineiros, como irritação na pele e nos olhos, irritação nas mucosas e problemas no trato respiratório (FUNDACENTRO, 1996).

Dito isso, fica ainda mais evidente a necessidade de tecnologias que mitiguem os impactos não somente ambientais, mas também na saúde dos trabalhadores envolvidos, e uma das soluções mais práticas é apresentada a seguir.

#### **4.9 Redução dos impactos da produção de carvão vegetal**

A atividade carvoeira, durante muitos anos, foi alvo de inúmeras críticas devido ao seu modelo de produção poluidor. Aliam-se a esse problema, casos de desmatamento ilegal e de condições insalubres de trabalho. Frente a essa realidade, os produtores envolvidos se viram pressionados a buscarem formas mais ambientalmente e socialmente corretas de produção, minimizando, assim, os impactos causados por essa atividade que é um dos pilares principais de uma das indústrias estratégica na economia.

Além dos gases condensáveis, existe a possibilidade de se reaproveitar parte destes para obtenção do licor pirolenhoso que contém o ácido pirolenhoso e o alcatrão insolúvel (LANA, 2014).

O licor pirolenhoso é composto pelo ácido pirolenhoso, uma solução aquosa de ácidos acético e fórmico, metanol e alcatrão solúvel, além de constituintes menores. O alcatrão é a fração negra, insolúvel, oleosa e pesada do condensado com uma composição rica em condensados fenólicos (PINHEIRO, 2006). O alcatrão tem utilização na indústria química e alimentícia e frações de seus compostos vêm sendo utilizadas como aditivos (flavorizantes) em alimentos produzidos industrialmente (LANA, 2014).

Os compostos condensáveis (COC) ainda podem ser utilizados como bio-estimulante em culturas como soja, café e na fruticultura, sendo 40% mais barato do que os métodos convencionais. Também podendo ser utilizados na produção de óleos que garantem aromas simuladores de defumação, pois essa técnica elimina produtos cancerígenos comuns na defumação natural, sem perda de sabor, a uma velocidade de produção compatível com os sistemas tradicionais. Uma outra aplicação é a produção de "Biobiche", utilizado como liga de massa refratária em fornos de indústrias siderúrgicas (BIOCARBO, 2004).

Assim, a recuperação e a correta utilização desses gases condensáveis gerados pela carbonização da madeira, não só poderá minimizar o impacto ambiental causado pela liberação acidental ou irregular no meio ambiente como também gerar novas alternativas de emprego (DONATO, 2017).

No que tange à prevenção dessas emissões, pode-se considerar uma série de ações a serem tomadas, como modificações tecnológicas; mudança ou redução da qualidade dos insumos utilizados, como também a busca pelo aumento da eficiência.

No modelo convencional de produção, em média, 26% da madeira é convertida em carvão, os outros 74% da massa da madeira é liberada em forma de gases (CGEE, 2015). De acordo com a Sindifer (2015), no mesmo ano, no Brasil, foi produzida cerca de 5,7 milhões de toneladas de ferro-gusa a base de carvão vegetal. Utilizando os dados de Unfer (2011) tem-se um uso estimado de 2,85 milhões de toneladas de carvão vegetal consumidos no setor, partindo do pressuposto que essa produção de carvão vegetal não envolvem técnicas de redução das emissões (realidade de grande parte do setor atualmente), concluiu-se que, somente no mesmo ano, foram liberados na atmosfera 1,99 milhões de toneladas em forma de gases no processo de carbonização.

Dentro desse cenário, o aproveitamento ou queima desses gases se torna de vital importância para um modelo produtivo sustentável, mitigando assim os impactos no meio ambiente. O controle de emissões do setor, por sua vez, não pode ter como base métodos sofisticados e elevada tecnologia, pois teria alto custo de instalação e posterior manutenção do sistema, o que vai na contramão do sistema produtivo, que é caracterizado pela simplicidade e principalmente pela rusticidade dos fornos. Dentro dessa realidade, sistemas de redução de gases de baixos custos estão sendo desenvolvidos.

Uma possibilidade seria a recuperação dos gases e sua posterior incineração em um queimador, produzindo calor, que poderia ser usado para a secagem da madeira para a própria produção. Uma madeira aceitável para carbonização em geral deve estar em uma faixa de 30% de umidade. Para alcançar esse valor sem investir em grandes tecnologias, o produtor, após o corte, deixa a madeira secando ao ar livre, pode-se levar até 120 dias para que ela alcance os valores de umidade desejados. Com a utilização e condução do calor oriundo da queima dos gases da carbonização, pode-se reduzir o tempo de secagem da madeira para alguns dias, o que acarretaria em um aumento considerável da produção.

Além disso, o calor pode ser usado em outras diversas funções como: secagem de grãos, aquecimento de aviários e, até mesmo, ao considerar o valor disposto a ser investido

pelo produtor, pode ser convertido em energia elétrica. O desenvolvimento de uma fornalha adequada para queima dos gases da carbonização provenientes de fornos de alvenaria é um passo importante para uma nova perspectiva na produção de carvão vegetal, mitigando impactos negativos e aperfeiçoando a produção e a qualidade do carvão vegetal (COELHO, 2013).

#### **4.10 Queima dos gases da carbonização da madeira**

Vários subprodutos podem ser obtidos da carbonização da madeira via condensação de gases, ou ainda, é possível promover a queima integral das emissões e com isso reduzir ou eliminar a liberação de compostos poluentes para a atmosfera (PIMENTA; BARCELLOS, 2004).

Os gases da carbonização são substâncias combustíveis ricas em carbono e hidrogênio que, sob condições adequadas de temperatura e pressão, são capazes de, na presença de oxigênio, sofrer reações químicas, ocorrendo liberação de energia sob a forma de luz e calor, em uma queima completa, as emissões seriam constituídas apenas de CO<sub>2</sub> e vapor de água (CARDOSO, 2010).

De acordo com Pennise (2001), a utilização de fornalhas para combustão dos gases diminui consideravelmente o aspecto visual e o efeito tóxico da emissão, cuja inalação pode desencadear doenças respiratórias e carcinomas, o que contribui positivamente para as condições de trabalho nas proximidades. As temperaturas no interior da fornalha variam de 1.000 a 1.200°C na sua fase mais ativa, temperaturas essas, capazes de destruir termicamente todos os componentes tóxicos e cancerígenos presentes na fumaça da carbonização, transformando-os em gases quentes e limpos, queimando o metano, que é um dos agentes causadores o aquecimento global.

De acordo com Oliveira (2012), queimadores ou fornalhas acopladas a fornos de carbonização têm o objetivo de incinerar os gases gerados durante o processo, transformando a poluição em energia na forma de calor. Esses equipamentos conferem às unidades de produção de carvão vegetal um aspecto limpo e contribuem para o processo de carbonização, auxiliando na tiragem de gases do interior do forno para a fornalha, em função da pressão negativa gerada no sistema pela chaminé do queimador.

Além disso, a queima dos gases possibilita a geração de um adicional de calor suficiente para outros fins, o uso alternativo para caldeiras, a secagem da lenha e, até mesmo

para a geração de energia elétrica, além de reduzir substancialmente os fumos e a poluição atmosférica pela queima completa dos pirolenhosos, alcatrão não solúvel e a parte combustível dos gases não condensáveis (CARDOSO, 2012).

A combustão dos gases da carbonização é uma alternativa viável para a sustentabilidade do setor produtivo de carvão vegetal, pois, além das vantagens expostas, gera um adicional de calor suficiente para a secagem da lenha, diminuindo a necessidade de madeira para obtenção da mesma quantidade de carvão (LANA, 2014). Esse ganho em rendimento gravimétrico é mais um fator que, por si só, já contribui para a redução das emissões, uma vez que há relação linear negativa entre as emissões atmosféricas e o rendimento gravimétrico na produção de carvão vegetal (COLOMBO 2006; COSTA, 2012).

#### **4.11 Carvão vegetal e o compromisso climático Brasileiro**

Na Conferência das Partes (COP) de 2015 em Paris, o Brasil foi o único país subdesenvolvido a apresentar uma proposta de redução drástica nas emissões de gases do efeito estufa. Além disso, sinalizou com a intenção de zerar o desmatamento na Amazônia e restaurar 12 milhões de hectares de florestas até 2030 (MMA,2014). A redução absoluta das emissões a longo prazo é apenas exigida dos países desenvolvidos, que fazem parte do acordo, ou seja, o país apresenta um compromisso voluntário. Assim, o Brasil passa a ser a primeira nação fora do grupo dos países mais ricos do mundo (G7) a estabelecer um prazo para a “descarbonização” da economia, determinando que até 2100 o país não mais realizará emissões de gases poluentes na atmosfera (MMA, 2014).

Para alcançar essa meta, o objetivo é ampliar de 28% para 33% o uso de energia de fontes renováveis (eólica, solar, biomassa e biocombustíveis) em sua matriz de energia até 2030, além do uso da energia hídrica (MMA,2014).

Tecnologias de redução na rota do carvão vegetal se mostram de mais fácil aplicação e em geral de resposta a curto prazo, por exemplo, o estoque de carbono das florestas de produção.

O Brasil criou o Fundo Nacional Sobre Mudança do Clima (Fundo do Clima), que tem por finalidade financiar projetos, estudos e empreendimentos que visem à redução de emissões de gases de efeito estufa e à adaptação aos efeitos da mudança do clima. O Fundo do Clima é vinculado ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) e disponibiliza recursos em duas modalidades, reembolsável e não-reembolsável, sendo os recursos reembolsáveis

administrados pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social e os recursos não-reembolsáveis operados pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2017).

O olhar do Brasil voltado para a produção de carvão vegetal é nítido, pois Fundo Nacional Sobre Mudança do Clima (Fundo do Clima), no ano de 2014, investiu R\$ 380 milhões de reais em projetos destinados a reduzir ou evitar as emissões de gases do efeito estufa, além de promover a adaptação de populações vulneráveis às mudanças climáticas. Desse montante, R\$ 360 milhões foram reembolsados e geridos pelo BNDS (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) e a destinação da maior parte desses recursos foi em projetos ligados à mobilidade urbana e no aumento da eficiência na produção de carvão vegetal de florestas plantadas (MMA, 2017).

O projeto ligado à melhoria da eficiência na produção de carvão vegetal incentivou o aumento de produção das empresas com propostas aprovadas, de 250 mil para 440 mil toneladas ao ano. Para acessar os recursos, a empresa beneficiada precisava comprovar que toda a madeira utilizada nos fornos era oriunda de florestas plantadas (MMA, 2014).

Somente para o estado de Minas Gerais, no ano de 2014, foram destinados US\$ 43,95 milhões (R\$ 105 milhões) para projetos de aumento da eficiência e diminuição das emissões na cadeia produtiva de ferro e aço do estado. Do total, R\$ 9,5 milhões foram recursos próprios do MMA e R\$ 60 milhões foram assegurados pelo MMA, MDIC (Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações) e pelo Banco Nacional do Desenvolvimento. O projeto conta ainda com US\$ 7,15 milhões (R\$ 16,5 milhões) de recursos do Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), além de R\$ 11 milhões do governo de Minas Gerais e o restante oriundos da iniciativa privada (MMA, 2014).

Outra iniciativa de proposta do governo foi o Inova Sustentabilidade, com investimentos em desenvolvimento tecnológico e aplicações pioneiras, visando à eficiência energética no setor industrial, o uso de carvão vegetal proveniente de produção sustentável, com recuperação de gases e carboquímicos, o controle e prevenção de emissões atmosféricas de gases de efeito estufa, incluindo sistemas para captura, e armazenamento de dióxido de carbono (MMA, 2014).

#### **4.12 Projeto “Siderurgia Sustentável”**

O uso do carvão vegetal como alternativa para mitigar as emissões de gases do efeito estufa, principalmente após o compromisso de redução proposto pelo Brasil na última Conferência Internacional Sobre Mudanças Climáticas, fez com que inúmeras iniciativas e políticas fossem propostas, entre elas, um dos destaques é o Projeto Siderurgia Sustentável, que foi firmado no ano de 2016.

O Projeto é resultado de uma parceria do Programa das Nações Unidas (Pnud) com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), A execução do Projeto conta, ainda, com o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, o Ministério da Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), com recursos do Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), além de contar com a participação dos Governos Estaduais, em especial o do Estado de Minas Gerais (MMA, 2017).

O Projeto está alinhado às prioridades nacionais e visa desenvolver uma cadeia de produção siderúrgica sustentável no Brasil, com o estabelecimento de uma economia de baixo carbono, estando vinculado às iniciativas estaduais e federais de redução de emissões dos gases de efeito estufa ancorados em acordos internacionais. O estado de Minas Gerais aparece como elemento de extrema importância na execução do projeto, uma vez que o mesmo é o maior produtor de carvão vegetal do Brasil (MMA, 2017).

Entre os resultados esperados, destacam-se:

- a criação e implementação de um arcabouço político favorável à produção de carvão limpo e eficiente utilizado pelo setor siderúrgico;
- o fortalecimento da base tecnológica e da capacidade humana;
- a criação de um mecanismo de apoio a novos investimentos baseado no monitoramento de desempenho (MMA,2017)

O primeiro estágio do Projeto será desenvolvido em Minas, com o intuito de posteriormente replicar os resultados em outros estados e demais lugares.

As ações e atividades desenvolvidas se alinham também aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que têm como proposta o avanço nas metas relativas ao combate à pobreza e à fome até 2030. Os resultados esperados contribuirão de maneira efetiva no cumprimento do ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança do Clima) (MMA, 2017).

## **5. METODOLOGIA**

O presente trabalho foi realizado em duas etapas, a primeira sendo referente ao levantamento bibliográfico do setor siderúrgico e ao uso do carvão vegetal e suas importâncias para o estado de Minas Gerais, que é o recorte de análise.

O foco do trabalho, primeiramente, foi fazer o balanço das emissões na produção de carvão vegetal, que é um dos “carros-chefes” de uma das rotas de produção do setor siderúrgico.

Após a primeira etapa do trabalho, se buscou analisar um sistema que visasse à redução das emissões atmosféricas na carbonização, verificando a eficácia do sistema, a possibilidade de inclusão no sistema produtivo do pequeno e médio produtor e o balanço das emissões em dois cenários. Um cenário base em que não se utiliza o sistema e o segundo cenário, já com a queima dos gases, posteriormente estimar e analisar o balanço das emissões do setor siderúrgico no estado de Minas Gerais, nos mesmos cenários.

Utilizou-se o banco de dados experimentais provenientes da pesquisa de Costa (2012), desenvolvida no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, do Departamento de Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Viçosa, que estudou a viabilidade de um sistema de queima de gases visando à inclusão no mercado de crédito de carbono.

### **5.1 Descrição do Forno utilizado para coleta dos dados**

O forno utilizado no experimento foi um protótipo, chamado de MF1, espelhado nos fornos de alta capacidade da empresa Arcelor-Mittal Bioenergia, desenvolvido em parceria entre a Universidade Federal de Viçosa e a empresa citada. O forno possui capacidade de 10 st, acoplado a uma fornalha para a realização das queimas dos gases (Figura 12). Optou-se por



esse tipo de forno, pois o mesmo foi desenvolvido visando um melhor aproveitamento gravimétrico produtivo.



**FIGURA 12** – Forno MF1, com sistema de queima de gases (Foto: Autoria Própria, Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, 07/01/2012).

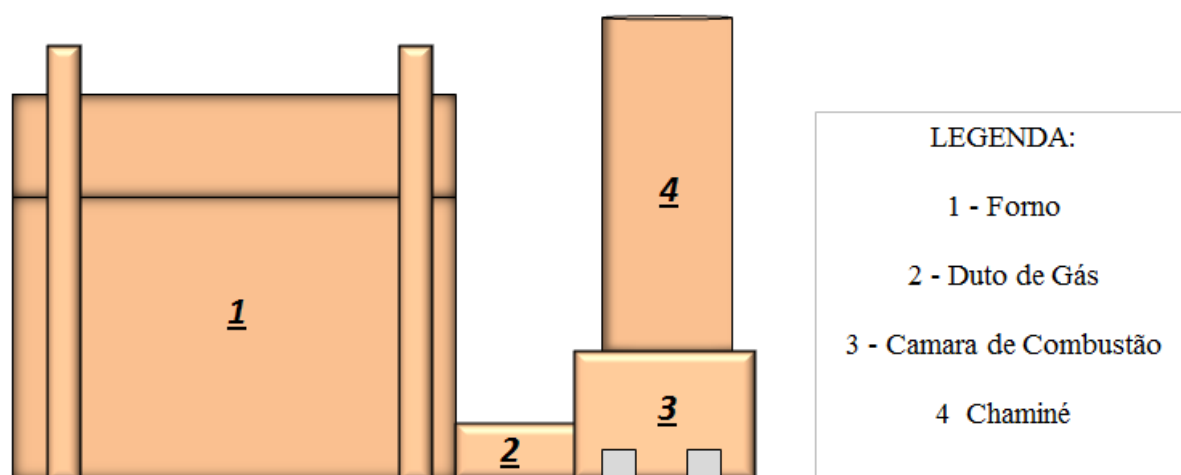
O controle da carbonização é etapa fundamental, pois o controle adequado do processo está diretamente ligado à qualidade do produto final e ao rendimento da produção. Assim sendo, no forno foram inseridos poços metálicos (cilindros metálicos com fundo fechado) para que fosse aferida a temperatura do forno ao longo de toda a carbonização. Para medir as temperaturas do forno, utilizou-se um sensor infravermelho, pirômetro, marca “Minipa” modelo “MT-350”, com capacidade de aferir temperaturas entre - 30 e 550°C.

O conjunto, câmara de combustão e chaminé, foi revestido internamente com manta cerâmica aderida por argamassa refratária, a fim de reduzir a perda de calor no interior da fornalha durante a queima dos gases, bem como retardar a depreciação dos materiais utilizados.

## **5.2 Sistema de queima de gases**

Ao buscar realizar as queimas e diminuir as emissões desses gases gerados durante a carbonização para a atmosfera, tem sido realizada a combustão desses em queimadores ou fornalhas, como pode ser observado na Figura 13. No experimento, a condução dos gases do

forno até a fornalha foi realizada por um duto metálico dotado de uma válvula borboleta, para controle de carbonização. A vazão dos gases do forno foi controlada pela operação da válvula borboleta, operada manualmente.



**FIGURA 13** – Sistema Forno/Fornalha utilizado no experimento para queima de gases.

Para que os gases entrem em combustão, é aconselhável que eles atinjam determinada temperatura (acima de 100°C). Para se ter esse controle, foram instalados termopares tipo “K” na fornalha para obtenção das temperaturas; o primeiro termopar foi instalado no começo do duto, próximo ao forno, obtendo a temperatura de saída de gases do forno; o segundo foi instalado na parte superior da base de alvenaria (acima da fornalha) para evitar interferências externas da atmosfera.

### 5.3 Processo de carbonização e quantificação das emissões

Na produção de carvão que se utiliza um sistema forno/fornalha não é possível verificar o andamento da carbonização através da coloração dos gases, como é feito no modelo tradicional, uma vez que os gases são queimados durante o decorrer do processo.

Para o experimento foi utilizada madeira de *Eucalyptus spp.*, com idade aproximada de 6 anos, comprimento de 1,5 m, diâmetro entre 12 e 20 cm e densidade variando entre 400 e 430 kg/m<sup>3</sup>. Foram realizadas duas carbonizações. O controle da carbonização foi realizado

através do monitoramento da temperatura, controlando as entradas de ar (oxigênio) para o interior do forno, através da abertura ou do fechamento dos “tatus” e também pela válvula borboleta, que controlava a saída dos gases do forno para a fornalha. A temperatura do interior do forno foi medida através dos poços metálicos e com o auxílio de um medidor termal infravermelho, como já mencionado anteriormente.

Para melhor controle, a carbonização foi dividida em etapas (fases), seguindo metodologia proposta por Oliveira *et al.* (2012), porém, o tempo de duração das fases foram diferentes. O controle da carbonização foi realizado com o intuito de melhoria do processo e da qualidade do produto, visando posteriormente o melhor rendimento gravimétrico possível. As faixas de temperatura e tempo seguiram os seguintes parâmetros.

Durante a fase inicial, o forno permaneceu, durante 24 horas, mantendo uma temperatura variável entre 120 e 150° C. Essa fase é caracterizada pelo processo de secagem da madeira enforada, ou seja, durante essa etapa ocorre grande saída de vapor d’água no processo. Após as 24 horas, para realizar a secagem da madeira, prosseguiu-se para a segunda fase do processo. Nesta segunda etapa, elevou-se a temperatura do forno para 275°C, buscando fixá-la nesse valor. Essa etapa teve duração aproximada de 16 horas e é caracterizada pela degradação das hemiceluloses da madeira, além de ter grande liberação ainda da umidade presente na madeira. As duas fases citadas, são as fases endotérmicas do processo. A terceira fase se diferencia das duas primeiras devido aos constituintes que são degradados na madeira, no caso a celulose. Nessa fase, a temperatura fixada foi de 375°C, permanecendo nesse valor durante 24 horas. Essa fase é importante, pois é nela que ocorrem os maiores picos de liberação dos gases combustíveis (CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>) que se objetiva no processo. Na quarta fase, ocorre a redução das emissões do processo, pois a quantidade de materiais voláteis presente na biomassa já entrou em fase de decréscimo. Se tem, nessa fase, a fixação restante do carbono no carvão. Essa fase possuiu temperatura final de aproximadamente 400°C e um tempo médio de 18 horas. Após o seu fim, o forno foi completamente vedado e se esperou o seu resfriamento.

Ao mesmo tempo em que foi realizada a ignição do forno foi feita a queima de resíduos de biomassa na fornalha, que teve a função durante as duas fases iniciais apenas como chaminé para a saída do gás da carbonização, que nessas fases apresenta alta concentração de vapor d’água, como anteriormente dito.

Quando os gases gerados atingiram temperaturas superiores a 100 °C na saída do forno, realizou-se um segundo abastecimento e queima de resíduos na fornalha, promovendo

o aquecimento do sistema e a ignição nos gases. Estima-se que quando os gases atingem essa temperatura já existem concentrações de gases combustíveis suficientes para que não haja necessidade de abastecimentos de resíduos lignocelulósicos na fornalha posteriormente, ou seja, após determinado tempo de processo, o sistema é autossuficiente quanto à queima dos gases, porém, cabe destacar a importância da válvula borboleta no processo, que tem a função de controle do fluxo de gás do forno para a fornalha propiciando a manutenção da chama na fornalha e também da temperatura no interior do forno.

#### 5.4 Aquisição dos dados de gases das Carbonizações

A quantificação dos gases emitidos durante a carbonização da madeira foi realizada através de um analisador de gás. A coleta de gases foi realizada continuamente durante as carbonizações, em intervalos regulares de 1 hora.

Os gases foram succionados dos pontos de coletas, sendo conduzidos até o sistema de condicionamento de gases *gasboard 9030 Wuhan CUBIC Optoelectronics Co., LTDA* (Figura 14).



**Figura 14** – Analisador de gás - Gasboard 9030 Wuhan CUBIC. (Foto: Autoria Própria)

Previamente à chegada ao equipamento, os gases passaram por um processo de pré-lavagem, que consistiu em um frasco lavador do tipo Dreschel com álcool e num segundo com algodão, ambos envolvidos com gelo armazenado em isopor. Esse sistema foi desenvolvido a fim de evitar que possíveis gotículas de alcatrão que porventura, não tivessem condensado no quitasato, viessem a fazê-lo na tubulação do *gasboard*, saturando o aparelho.

Após a pré-lavagem, os gases não condensáveis seguiram para o *gasboard* 9030, no qual passaram por uma lavagem em água, resfriamento a 4°C num desumidificador (*chiller*) e, posteriormente, por um cilindro contendo carvão ativado e algodão. Em seguida, procedeu-se à última limpeza dos gases, sendo essa mais refinada por meio de filtros de precisão que retêm impurezas menores que 3 µm e 1 µm, respectivamente.

Depois do tratamento, uma amostra dos gases não condensáveis foi admitida a cada 50°C, correspondendo a intervalos de 30 minutos, com vazão de 1L/min até o sistema online de análise de gás *gasboard* 3100 *Wuhan CUBIC Optoelectronics Co., LTDA*. Esse forneceu leituras da composição percentual base volume de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e hidrocarbonetos de cadeia pequena (C<sub>n</sub>H<sub>n</sub>).

## 5.5 Cálculo da massa dos gases

Com base nos dados obtidos de concentração de cada gás, que corresponde à média aritmética das leituras pontuais e o de massa dos gases não condensáveis, foi possível mensurar a massa total (g) de cada componente do gás não condensável emitida.

Por meio da pressão diferencial do fluxo, foi possível encontrar a velocidade de escoamento do mesmo. Tendo-se as características dimensionais da tubulação, determinou-se a vazão volumétrica do gás. A partir da porcentagem em massa molar de cada gás medido, em conjunto com o percentual em volume dos mesmos (dados gerados pelo equipamento), calculou-se a porcentagem em massa de cada gás presente no fluxo. Ao se combinar esses dados com as condições de temperatura e pressão, obtiveram-se as densidades totais e parciais do fluxo que, juntamente com as vazões volumétricas, resultaram nas vazões mássicas dos gases.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Emissão dos gases da carbonização e Balanço das Emissões

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios da massa dos gases oriundos da carbonização em dois cenários, com e sem queima dos gases.

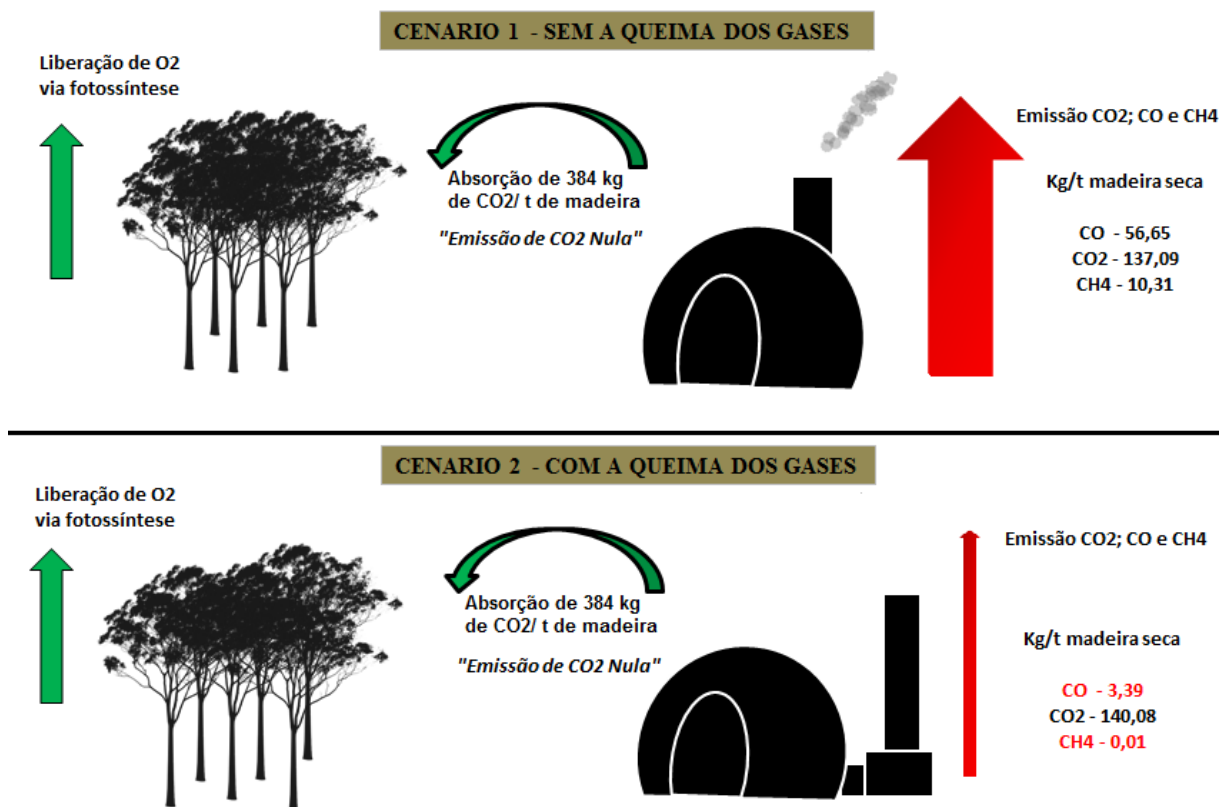
Tabela 1 - Relação da emissão mássica dos gases da carbonização por tonelada de madeira, com e sem o uso do sistema de queima de gases.

Gás	Emissão Kg/t Madeira - (°C)	
	(S/Queima)	(C/Queima)
CO	56,65	3,39
CO <sub>2</sub>	137,09	140,08
CH <sub>4</sub>	10,30	0,01

Com base nos dados analisados, pode-se observar que a emissão de metano e de monóxido de carbono foram reduzidas próximos a um valor nulo, 0,01 e 3,39 kg por tonelada de madeira seca, respectivamente. Dada que a massa de madeira enfiada foi de aproximadamente de duas toneladas, as emissões médias durante todo o processo, foram de, 113,3; 274,18 e 20,60 kg, com as carbonizações sem o uso do sistema para os gases CO, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, respectivamente. Ao realizar a queima dos gases, as emissões totais do processo foram de 6,78; 280,16 e 0,02 kg, para os mesmos gases. Esse dado mostra a eficiência do sistema para a redução de um dos gases poluentes mais nocivos ao meio ambiente dessa atividade (metano).

Em relação aos valores de CO<sub>2</sub> ocorreu um ligeiro aumento, provavelmente devido à oxidação do CO. A madeira é um composto formado basicamente de carbono e hidrogênio, na qual a liberação de compostos ricos em carbono é natural, e que, mesmo existindo a queima de CO na fornalha, o carbono resultante da reação ao entrar em contato com o oxigênio atmosférico, formará CO<sub>2</sub>. Porém, convém lembrar que na produção de carvão vegetal tem-se a presença da floresta de produção, em geral localizadas próximas aos locais produtores. A floresta, assim como toda biomassa, absorve carbono. Mallard (2009) estima que cada árvore do gênero *Eucalyptus* com densidade tem o potencial de absorver 380 kg de gás carbônico, logo por mais que exista a emissão de CO<sub>2</sub> durante a produção de carvão vegetal, a presença do plantio florestal faz com que essa emissão seja nula.

O esquema a seguir (Figura 15) simplifica, a partir dos dados coletados, como ficaria o balanço das emissões na produção de carvão a partir dos dois cenários, com e sem a queima dos gases, por tonelada de madeira.



**Figura 15** – Balanço das Emissões na produção de carvão vegetal segundo dados experimentais.

Como se pode observar, o sistema de queima é de extrema importância no ponto de vista ambiental, pois reduz significativamente a emissão de CO e CH<sub>4</sub>. Diferentemente do CO<sub>2</sub>, que é absorvido pela biomassa, esses dois últimos são simplesmente liberados na atmosfera, sem ter pontos positivos em suas emissões.

Para Bahr *et al.* (2006), como consequência da liberação de CH<sub>4</sub>, o teor de metano atmosférico aumentou mais do que o seu dobro desde o início da industrialização. A quantidade anual emitida mundialmente, segundo estudos do IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change – publicados em 1996, calculado entre os anos 1980 até 1990, foi de 375 milhões de toneladas, essa redução de metano antropogênico faz com a tecnologia seja de extrema importância.

O eucalipto em geral é cortado, entre 5 e 7 anos, posteriormente é realizado a rebrota, que da origem a uma nova floresta. Segundo Ferreira (2000) assim, mantém-se um estoque permanente de madeira em pé, enquanto perdura a produção da siderúrgica, correspondente aos 6 anos médios de crescimento da planta. Realizado o corte, as raízes, galhos menores e folhas são deixados no local, constituindo um estoque adicional de carbono.

Assim, a relação do CO<sub>2</sub> no processo pode ser dada como emissão nula. Mallard (2009) calcula que uma única árvore do gênero *Eucalyptus*, absorve em média 384 kg de CO<sub>2</sub>. Deste modo, ao observar a emissão total do processo durante o experimento, a emissão por tonelada de madeira para cada carbonização, foi de 140,08 kg, deixando um balanço positivo em relação à emissão e sequestro de CO<sub>2</sub>.

Mallard (2009) também aborda a fixação de CO<sub>2</sub> nas florestas em geral de eucalipto, por meio da seguinte equação, que segue a metodologia utilizada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), estimando a quantidade do gás fixada por árvore, pelo seguinte cálculo:

$$\text{CO}_2 = (\text{V} \times \text{D} \times \text{FEB}) \times (1+\text{R}) \times \text{FC} \times \text{MC}$$

onde:

V = volume comercial médio, 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) / parte radical (peso seco das raízes);

FC = fração de carbono;

MC = conversão de massa do carbono em massa de CO<sub>2</sub>.

Os seguintes valores aplicados pelo autor são:

V = 0,318 m<sup>3</sup>;

D = 0,44 t/m<sup>3</sup> (valor médio do *E. grandis*/ valor variável de acordo com a espécie)

FEB = 1,45;

R = 0,2;



FC = 0,43;

MC = (44/12).

Assim,  $\text{CO}_2 = (0,318 \times 0,44 \times 1,45) \times (1+0,2) \times 0,43 \times (44/12) = \mathbf{0,3839 \text{ t por \u00e1rvore}}$ .

Esta \u00e9 a realidade na produ\u00e7\u00e3o de carv\u00e3o vegetal, os produtores em geral mant\u00eam sua pr\u00f3pria floresta para a produ\u00e7\u00e3o de carv\u00e3o vegetal e s\u00e3o raras as exce\u00e7\u00f5es, principalmente ao falarmos de pequenos e m\u00e9dios produtores, que comprem madeira de terceiros.

As vantagens adicionais s\u00e3o: a emiss\u00e3o de  $\text{O}_2$  pela floresta, atrav\u00e9s do processo de fotoss\u00edntese, por mais que seja um processo natural, pode se destacar como um ponto positivo na produ\u00e7\u00e3o de carv\u00e3o vegetal.

Mas, outro grande fator positivo, \u00e9 a incinera\u00e7\u00e3o do material particulado durante a queima utilizando a fornalha, reduzindo grande parte do que \u00e9 normalmente produzido e sendo ponto chave para a melhoria da salubridade das unidades de produ\u00e7\u00e3o de carv\u00e3o, lembrando que problemas de sa\u00fade ligados ao aparelho respirat\u00f3rio em pessoas que trabalham em carvoarias est\u00e1 fortemente ligado, al\u00e9m da constitui\u00e7\u00e3o qu\u00edmica dos compostos da fuma\u00e7a, tamb\u00e9m aos particulados e materiais em suspens\u00e3o expelidos no processo.

Cardoso (2010), ao trabalhar com um sistema similar, reduziu consideravelmente a quantidade de material particulado liberado no processo de carboniza\u00e7\u00e3o, a emiss\u00e3o reduziu de 1585,88  $\text{mg/Nm}^3$  para 81,67  $\text{mg/Nm}^3$ , correspondendo a 94,85% menos de material particulado emitido.

Ao se utilizar o sistema de queima, o ambiente de trabalho fica mais salubre, devido a queima da fuma\u00e7a (Figura 16), al\u00e9m disso, apresenta as in\u00fameras vantagens j\u00e1 expostas anteriormente.



**Figura 16** – Forno em processo de carbonização utilizando sistema de queima de gases. A geração de fumaça e particulados é praticamente nula, o que torna o processo um fator de destaque quando comparado aos modelos tradicionais. (Foto: Autoria Própria, Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, 15/01/2012)

## 6.2 Funcionalidade do sistema de queima em outros modelos de fornos

O forno em que foi realizado o experimento (MF1), apesar de ser um forno desenvolvido para ganhos de rendimentos e outras melhorias durante o processo produtivo, não é um forno de uso popular. Pequenos produtores, em geral, optam por fornos mais arcaicos e de construção mais simples e frágil, como os fornos tipo “rabo-quente”, de superfície e o de encosta.

Fornos de encostas, devido à sua particularidade de ser construído em terreno acidentado, utilizando parte do “barranco” como própria estrutura do forno (paredes), se torna um sistema em que a instalação de um sistema de fornalha é mais complexa que o usual, porém, fornos de superfície e os chamados rabos-quentes, em contrapartida, são de simples ajustes, uma vez que para que o sistema de queima seja implementado nos mesmos, é necessário apenas fazer a inclusão do duto, fornalha e da chaminé.

Segundo Demirbas (2000), a vazão e a composição dos gases produzidos durante a carbonização dependem do tipo de forno, forma de controle de processo, tempo e temperatura

de carbonização e das características específicas da madeira empregada, fazendo importante também a execução de avaliação da fornalha em fornos de uso mais popular.

Por isso, ensaios com sistema de queima em fornos de superfície circulares foram realizados no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira na Universidade Federal de Viçosa, onde foram encontrados valores similares ao do experimento. Lana (2014), ao avaliar um sistema de queima similar, em um forno de superfície circular, conseguiu valores de redução de 86 e 88% para os gases CO e CH<sub>4</sub>.

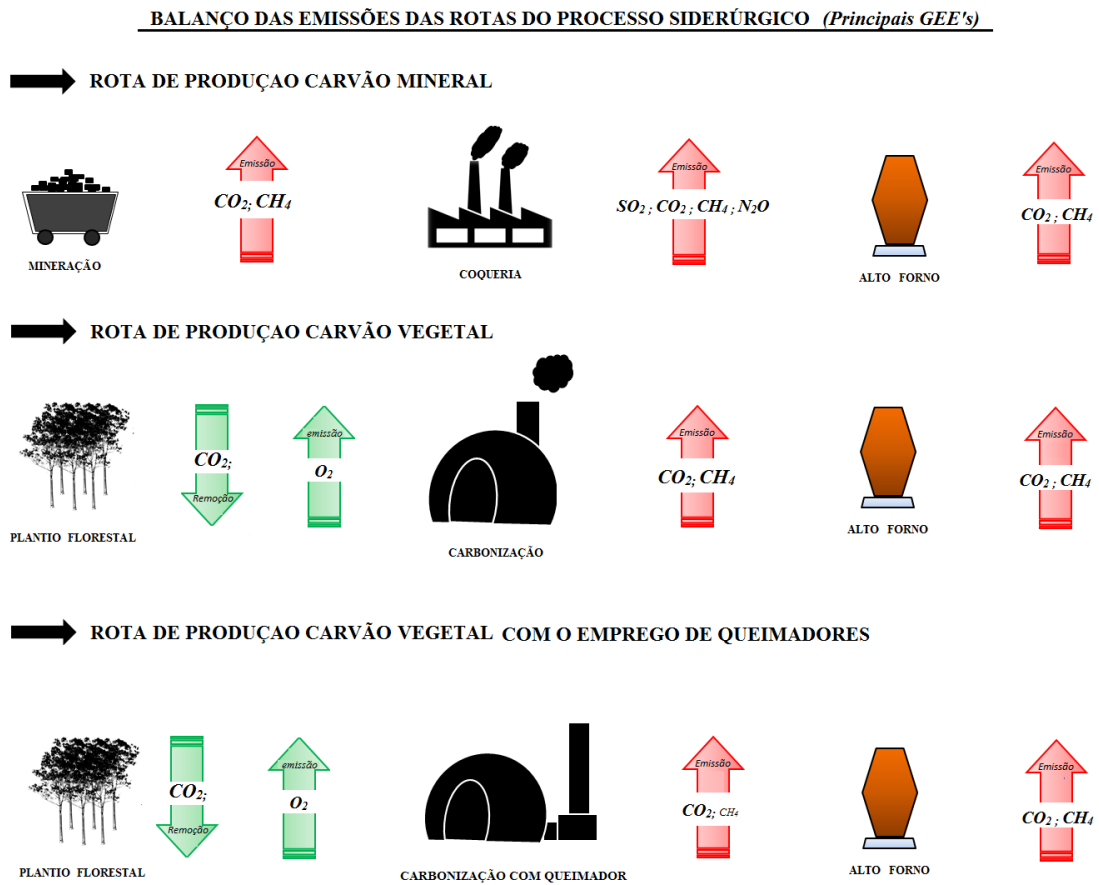
Ferreira (2000) ao estimar as emissões nas duas rotas de produção siderúrgica do aço, endossa os dados referentes a este trabalho, o autor reforça a ideia de estabelecimento de crédito internacional, ou bônus, pelo sequestro de carbono e pela regeneração de oxigênio. Os dados levantados pelo autor mostram que, a rota coque libera 1,65t de CO<sub>2</sub> por tonelada de aço produzido, ao passo que a rota a carvão vegetal sequestra 16,336 t de CO<sub>2</sub> e regenera 1,536 t de O<sub>2</sub> por tonelada de aço produzido, no ciclo completo desde a plantação do eucalipto até a produção do aço. Em adição, a rota a carvão mineral libera 7 kg de óxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), emissão está praticamente ausente na rota a carvão vegetal.

Esses valores mostram que, ao se ter um controle eficaz da carbonização, um controle da qualidade da madeira e práticas corretas, de carbonização, o sistema de queima (forno/fornalha) pode ser implementado na maioria dos fornos, lembrando que o sistema é simples de ser inserido nos fornos rabo-quente e esses representam cerca de 80% dos fornos utilizados para a produção de carvão vegetal.

### **6.3 Cenário de redução para o setor siderúrgico no estado de Minas Gerais**

Em termos de impactos, as duas rotas de uso do carvão são impactantes, seja pela mineração (para a extração do minério e do carvão), seja pelo uso do carvão vegetal nos moldes tradicionais.

A relação dos principais gases do efeito estufa emitidos pelas duas rotas tradicionais, além da rota hipotética que utiliza o queimador de gases, pode ser observado na figura 17.

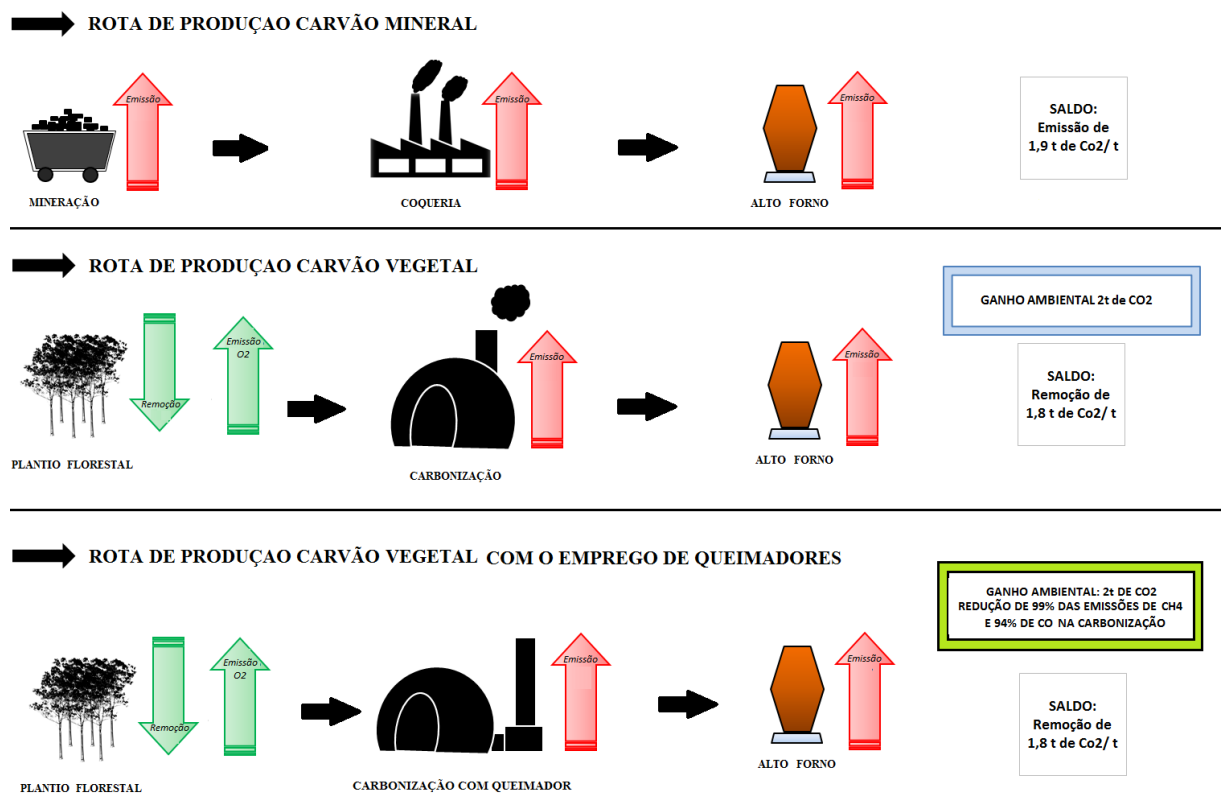


**Figura 17** – Balanço dos principais gases do efeito estufa oriundos das rotas produtivas tradicionais e da rota hipotética utilizando queimador de gases durante a carbonização.

Para realizar o balanço do setor, a referência será a mesma base de cálculo de Mallaard (2009), pela equação:

$$CO_2 = (V \times D \times FEB) \times (1+R) \times FC \times MC$$

Segundo o mesmo autor, na rota de produção baseada a carvão mineral se tem um saldo de emissão de 1,9 toneladas de CO<sub>2</sub> para cada tonelada de ferro-gusa produzido; na rota à base de carvão vegetal, contabilizando só as emissões, se tem 1,8 toneladas de CO<sub>2</sub> para cada tonelada de gusa (MALLARD, 2009). Porém, como a produção de carvão vegetal está ligada a um plantio florestal que possui a capacidade de absorver para cada tonelada de gusa produzida, 3,8 toneladas de CO<sub>2</sub>, o ganho ambiental, ao se optar pela utilização do carvão vegetal, é de 2 toneladas de CO<sub>2</sub> sequestrados, causando um superávit na relação remoção/emissão (Figura 18).



**FIGURA 18** – Balanço das emissões entre as rotas produtivas tradicionais da siderurgia e a rota com queimador por/t de ferro fusa (Fonte: Adptado de Mallard, 2009)

Com o uso dos queimadores durante a carbonização, além do saldo positivo relativo a presença das florestas e fixação de carbono, se teria o adicional ambiental referente a redução das emissões de CH<sub>4</sub> e CO. Do ponto de vista dos gases de efeito estufa, a redução do metano é de extrema importancia devido ao seu potencial de aquecimento 21 vezes maior que a do CO<sub>2</sub>. De acordo com Ferreira (2000), em geral para cada tonelada de ferro gusa, é necessário

aproximadamente 0,75 tonelada de carvão, a partir dos dados encontrados no experimento, usando como base um rendimento gravimétrico de 25%, deixaria de emitir por tonelada de gusa, so com o uso do queimador 30 kg de CH<sub>4</sub>, convertendo esse valor pelo potencial de aquecimento do gás, deixariamos de emitir 630 kg em dióxido de carbono proporcional. A importância de se deixar de emitir esse valor, se deve ao fato que não altera o fato de que o gás que deixamos de emitir é o metano, e o mesmo não é reabsorvido pela floresta de produção, sendo liberado diretamente para a atmosfera.

Segundo anuário estatístico da SINDIFER (2015), no ano de 2015 foi consumido no estado de Minas Gerais pelo setor de siderurgia um total de 7.551.000 metros cúbicos de carvão vegetal, assumindo um cenário em que todo o carvão, foi produzido em fornos com um sistema de combustão dos gases, apresentando um rendimento de conversão madeira/carvão médio de 25%, utilizando como base o carvão produzido com densidade estimada a granel de 210 kg/m<sup>3</sup> tem-se os seguintes valores, que são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Valores estimados de emissão na produção de carvão vegetal para o estado de Minas Gerais, em cenários com e sem o uso de sistema de queima de gases

<b>Modelo do sistema</b>	<b>CUMG (t)</b>	<b>M.U(t)</b>	<b>Ee. CO (t)</b>	<b>Ee. CO2 (t)</b>	<b>Ee. CH4(t)</b>
<b>S/Queimador</b>	1.585.710	6.342.840	359.321,89	869.539,94	65.331,25
<b>C/Queimador</b>	1.585.710	6.342.840	21.502,23	888.505,03	63,43

Expressão dos dados: onde: CUMG = Carvão utilizado pelas siderúrgicas em Minas Gerais; M.U = Massa de Madeira Utilizada; Ee.CO = Emissão estimada de monóxido de carbono; Ee.CO2 = Emissão estimada de dióxido de carbono; Ee.CH4 = Emissão estimada de metano

Utilizando os dados de redução encontrados no experimento, os dados de produção divulgados pelo Sindicato de produtores de ferro gusa de Minas Gerais, estimando a rendimento do estado em 25%, os indicadores mostram os seguintes valores:

As 1,6 milhões de toneladas de carvão consumidas no setor siderúrgico em 2015 (o valor 7.551.000 é referente ao volume de carvão em metro cúbico, para realizar a conversão para uma unidade mássica, é necessário multiplicar pela densidade do carvão seja real, ou estimada), foram provenientes de aproximadamente 6,3 milhões de toneladas de madeira (base seca), o que gerou os seguintes índices estimados de emissão de gases: 359 mil toneladas de CO; 869 mil toneladas de CO<sub>2</sub> e 65 mil toneladas de CH<sub>4</sub>, tais dados de emissão são referentes a um cenário sem o uso do sistema forno/fornalha para queima de gases, ou seja, são os valores brutos de emissão durante a carbonização da biomassa.

Para um cenário, em que todo o carvão vegetal é produzido através de fornos com sistema de queima, as reduções das emissões geraram os seguintes índices: 21 mil toneladas de CO; 888 mil de toneladas de CO<sub>2</sub> além de 63 toneladas de CH<sub>4</sub>. Em valores percentuais de redução, o uso do queimador reduziu as emissões de CO e CH<sub>4</sub> em aproximadamente 94 e 99%, respectivamente.

O uso do sistema não é uma obrigação aos produtores, fazendo com que a iniciativa de utilizá-los seja de sua boa vontade, pois alguns poderão usar o sistema como marketing ambiental para diferenciar o seu produto e mencionar a sua produção como ambientalmente limpa. No entanto, ressalta-se que ainda são poucos que tiveram a iniciativa de instalar o sistema em sua produção. Pode evidenciar um case de sucesso o empreendimento da Fazenda Guaxupé, em Divinésia-MG, que fornece carvão vegetal para o setor de ligas a um valor maior que o mercado se paga, justamente por produzir o carvão em sistema forno fornalha.

Usando vários cenários, em que o uso de queimadores fosse utilizado por diferentes parcelas de produtores, gerou os seguintes indicadores (tabela 3).

Tabela 3 – Estimativa de uso de queimadores em diferentes parcelas de produção em porcentagem no estado de Minas Gerais, dados de referência SINDIFER (2015)

Uso do Sistema (%)	Carvão Produzido (t)	Madeira Utilizada (t)	Ee. CO (t)	Ee. CO <sub>2</sub> (t)	E.e CH <sub>4</sub> (t)
0	1.585.710	6.342.840	359.321,89	869.539,94	65.331,25
10	158.571,00	634.284,00	2.150,22	88.850,50	6,34
20	317.142,00	1.268.568,00	4.300,45	177.701,01	12,69
30	475.713,00	1.902.852,00	6.450,67	266.551,51	19,03
40	634.284,00	2.537.136,00	8.600,89	355.402,01	25,37
50	792.855,00	3.171.420,00	10.751,11	444.252,51	31,71
60	951.426,00	3.805.704,00	12.901,34	533.103,02	38,06
70	1.109.997,00	4.439.988,00	15.051,56	621.953,52	44,40
80	1.268.568,00	5.074.272,00	17.201,78	710.804,02	50,74
90	1.427.139,00	5.708.556,00	19.352,00	799.654,52	57,09
100	1.585.710,00	6.342.840,00	21.502,23	888.505,03	63,43

Expressão dos dados: Ee. CO = emissão estimada de monóxido de carbono; Ee. CO<sub>2</sub> = emissão estimada de dióxido de carbono; Ee. CH<sub>4</sub> = emissão estimada de metano

A interpretação da Tabela 3 segue a seguinte forma, durante o último levantamento da SINDIFER referente ao ano de 2015, foi consumido 1,5 milhões de toneladas de carvão, que foram oriundos de aproximadamente 6,3 milhões de toneladas de madeira (usando um rendimento médio de 25%), o que gerou os índices de emissão de 359; 870 e 65 mil toneladas de CO, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, respectivamente.

Se o sistema de queima de gases fosse utilizado por 50% dos produtores no último levantamento, estes, seriam responsáveis pelo uso aproximado de 793 mil toneladas do carvão consumidos pelo setor siderúrgico, fazendo o uso de cerca de 3,1 milhões de toneladas de madeira e gerando os seguintes indicadores de emissão: 11 mil toneladas de CO, 444 mil de toneladas de CO<sub>2</sub> além de 32 toneladas de CH<sub>4</sub>.

Em geral, levantamentos sobre emissão de gases do efeito estufas são realizados através de inventários, um inventário de emissões deve ser estabelecido como um processo contínuo, que permita identificar, bem como calcular as emissões de gases de efeito estufa, como um produto de uma dada atividade, por um fator de emissão adequado (GHG PROTOCOL, 2013), um inventário de emissões adota metodologias ou protocolos reconhecidos, como é o caso do GHG Protocol.

Os protocolos usam diferentes valores de referência de aquecimento para cada gás, ou seja, a capacidade de retenção de calor do CO é diferente do potencial de retenção do CH<sub>4</sub>. O termo usado para igualar o potencial de aquecimentos dos gases é chamado de carbono equivalente.

Para calcular o carbono equivalente é necessário saber o poder destrutivo das moléculas de cada gás do efeito estufa. Este conceito é conhecido como Potencial de Dano Global (ou Global Warming Potential – GWP), e permite que saibamos quanto de efeito foi gerado quando emitimos a mesma quantidade de cada um dos gases. Este número é baseado na eficiência radiativa (habilidade de absorver o calor), assim como a meia-vida de uma mesma quantidade de cada gás, acumulado em um certo período de tempo (normalmente 100 anos). Este valor nunca é absoluto, mas sim relativo ao CO<sub>2</sub>. O GWP de cada gás significa quanto mais (ou quanto menos) um gás aumenta o efeito estufa em 100 anos comparada com a mesma quantidade de CO<sub>2</sub> emitida ao mesmo tempo. A molécula de dióxido de carbono tem valor definido como 1 neste índice (Paulas, 2007). O metano tem potencial de aquecimento 21 vezes maior que o dióxido, ou seja, compensa mais reduzir 1kg de emissão de CH<sub>4</sub>, do que 1 kg de CO<sub>2</sub>, além disso, 1kg de metano tem o mesmo potencial de aquecimento do que 21 kg de CO<sub>2</sub>.

A emissão de CH<sub>4</sub> foi de 65 mil toneladas (SINDIFER, 2015), convertendo para carbono equivalente, a emissão foi de 1.495 milhões de toneladas de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e), ou seja, a emissão de metano em relação ao seu fator de dano atmosférico na produção de carvão vegetal é muito mais elevada que as emissões de CO<sub>2</sub>, ainda, diferentemente do CO<sub>2</sub> o metano não é absorvido pela floresta, fazendo com que essa emissão



em um cenário sem o uso do queimador, seja desprendido diretamente na atmosfera. Em contrapartida, caso toda a produção do estado fosse a partir do uso de um sistema de queima de gases, a emissão total de metano bruto seria de 63 toneladas, o que convertendo em carbono equivalente geraria um total de 1.449 toneladas de CO<sub>2</sub>e.

Vale ressaltar que, além dos dados serem uma estimativa das emissões, os valores são referentes apenas ao quantitativo carvão vegetal produzido e destinado ao setor siderúrgico do estado de Minas Gerais, o uso desses dados se deve ao fato de serem valores publicados por órgão competente, logo, se baseia em valores condizente com a realidade, ainda, salienta-se que o setor siderúrgico é responsável por 85% da destinação do carvão produzido no Brasil.

## **7 CONCLUSÃO**

Os resultados a partir deste estudo permite aferir algumas considerações relevantes:

- Embora se apresente como uma importante alternativa, o uso de carvão vegetal deve ser melhor estudado, principalmente no que se refere ao plantio florestal, florestas implantadas em zonas de déficit hídrico, podem agravar o cenário, estudos que visem as condições hidrológicas regionais prevaletentes, assim como na disponibilidade natural de água se fazem extremamente importantes, principalmente em tempos, em que a escassez hídrica é assunto de relevante importância.
- A legislação atual no estado de Minas dá o prazo até o ano de 2018 para que todo o carvão vegetal voltado para a produção siderúrgica seja oriundo de apenas plantio florestal não nativo. E, apesar de ter diversos problemas ainda ligados à atividade de carvoejamento, ela ainda se apresenta como atividade menos impactante do que a mineração para a extração do carvão mineral, logo, se deve sim, incentivar a mudança de uso dos insumos, por uma fonte renovável e de menor impacto no meio ambiente.
- O uso do carvão vegetal pela siderurgia apresenta diversas vantagens, além do carvão vegetal ser ambientalmente menos impactante no que tange às emissões atmosféricas, coloca o Brasil, que é pioneiro no uso de carvão vegetal na indústria em questão, em posição estratégica no mercado mundial, na produção de gusa e aço verde, a partir de uma rota sustentável de produção, pode ser uma forma de agregar valor ao produto e fazer com que o mesmo se destaque no mercado.

- Se mostra eficaz também, o uso de tecnologias de baixo custo que visem um melhor controle da carbonização, além, de uma maior proteção ao operador, a exemplo: Para verificar a temperatura do forno nos moldes tradicionais, o operador entra em contato com as paredes do forno, podendo ocasionar queimaduras, além de outros problemas de saúde, uma vez que a temperatura próxima ao forno está relativamente mais elevada do que a do ambiente, fazendo com que o corpo sofra alterações bruscas de temperatura em curto intervalo de tempo. Ao se utilizar um medidor de temperatura que evita o contato direto, o operador fica resguardado de problemas que podem ser causados pelas condições do processo.

- O uso de fornalhas, para queima dos gases da carbonização, se mostrou extremamente eficaz para ao fim a qual é destinado, redução das emissões de CO e CH<sub>4</sub>, além da incineração de particulados de maior dimensão. É um ponto positivo e que reafirma a necessidade da inclusão da tecnologia frente aos processos tradicionais. Os valores de CO<sub>2</sub>, apesar de ter um leve incremento em seus valores, o mesmo em questão de balanço de emissão pode ser considerado nulo, visto a presença da floresta que atua como sequestrador de carbono.

- Apesar de o estudo estar relacionado a um tipo de forno de uso incomum, é comprovado que, queimadores podem ser adicionados em grande parte dos fornos de uso tradicional.

- As emissões de poluentes na produção de carvão vegetal são passíveis de serem reduzidas a valores de extrema relevância e a queima da “fumaça” e seus componentes, além de ter um impacto ambiental extremamente positivo, ainda deixam o ambiente das carvoarias mais salubres, diminuindo a carga de exposição a periculosidades do produtor ou trabalhador que está envolvido diretamente na atividade.

- A redução de metano (CH<sub>4</sub>) abre caminhos para novas oportunidades, uma delas é o mercado de crédito de carbono, que é um dos carros chefes do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Entre as metodologias propostas pelo MDL está a redução das emissões de metano, gás esse com potencial de aquecimento 21 vezes maior do que o CO<sub>2</sub>. O uso da tecnologia de redução das emissões atua justamente nesse ponto. Sendo assim, com a divulgação adequada e estudos na área, o uso de queimadores pode ser incentivado a partir da possibilidade de renda extra a partir do mercado de crédito de carbono.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHB - **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil**. Consulta. 2017. Disponível em: <http://www.atlasbrasil.org.br/2013/consulta>. Acesso em 20 de Outubro de 2017.

ANDRADE, M. C. **Geografia, ciência da sociedade: uma introdução à análise do pensamento geográfico**. Atlas, 1987.

ARAÚJO, L. (1997). **Manual da Siderurgia**. In L. Araújo, Manual da Siderurgia (Vol. 1, pp. 195 - 258). São Paulo: Editora Arte & Ciência.

ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. **Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla***. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. 2012. **Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2011**. Brasília, 2012. 130p.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Anuário estatístico 2011**. Belo Horizonte, 2012.

BAHR, T.; FRICKE, K.; Hillebrecht, K.; KOLSCH, F.; REINHARD, B. **Clean Development Mechanism - Tratamento de Resíduos Sólidos e Oxidação de Gás Metano para Minimização de Emissões**. 2006.

BARNHISEL, R.I.; POWELL, J.L.; AKIN, G.W. & EBELHAR, M.W. **Characteristics and reclamation of acid sulfate mine spoil**. In: KITTRICK, J.A.; FANNING, D.S. & HOSSNER, L.R., eds. Acid sulfate weathering. Madison, Soil Science Society America, 1982. p.37-56.

BARROS, G. **O desenvolvimento do setor siderúrgico brasileiro entre 1900 e 1940: Crescimento e substituição de importações**. Estud. Econ., São Paulo, vol.45, n.1, p. 153-183, jan.-mar. 2015.

BRITO, J. O. **Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira.** Documentos Florestais, Piracicaba, n. 9, p1-19, 1990.

BRITO, J. O. **Desafios e perspectivas da produção e comercialização do carvão vegetal.** 2010. II Fórum Nacional sobre carvão vegetal. Sete Lagoas – MG. 2010.

CAMIOTO, F. C., REBELLATO, D. A. N. **Análise da contribuição ambiental por meio da alteração da matriz energética do setor brasileiro de ferro-gusa e aço.** Gest. Prod., São Carlos, v. 21, n. 4, p. 732-744, 2014

CAMPOS, M. L., ALMEIDA, J. A., SOUSA, L. S. **AValiação de três áreas de solo construído após mineração de carvão a céu aberto em Lauro Müller, Santa Catarina.** Revista Brasileira de Ciências do Solo, 27:1123-1137, 2003

CARDOSO, M.T., 2010. **Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira** (Mestrado Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

CARNEIRO, A. C. O.; BARCELLOS, D. C.; SANTOS, R. C. **Treinamento carvão vegetal: apostila teórica e prática.** Viçosa-MG, 2011. 129p.

CARVALHO JR., J. A.; MCQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada.** Florianópolis, 2007. 176p.

CGEE, 2015. **Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília.

SANTOS, C. Fornos de carvão irregulares são fiscalizados em São Mateus. Disponível em: <https://www.folhaacademica.com.br/fornos-de-carvao-irregulares-sao-fiscalizados-em-sao-mateus/>. Acesso em: 02 de Novembro de 2017

CENAMO, M. C. **O Mercado de Carbono e as Oportunidades para o Agronegócio Brasileiro.** Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA). São Paulo, 2005. 4p.

CENBIO, Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Carvão Vegetal, Aspectos Técnicos, Sociais, Ambientais e Econômicos**. Nota Técnica – Universidade de São Paulo (USP), 2008.

COELHO, M. P. **Desenvolvimento de metodologia para o dimensionamento de câmaras de combustão para gases oriundos do processo de carbonização de madeira**. 2013. 78p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2013.

COLOMBO, S. F. O.; PIMENTA, A. S.; HATAKEYAMA, K. **Produção de carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais: um modelo sustentável**. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 13., 2006, Bauru-SP. Anais... Bauru: UNESP, 2006.

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - CEBDS. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**. Rio de Janeiro, 2002. 35p. Acesso em: 2 de maio de 2017.

CONSIDER. **Anuário Estatístico. setor siderúrgico**. Conselho de Não-Ferrosos e de Siderurgia. Brasília, 1986.

COSTA, J. M. F. N. **Temperatura final de carbonização e queima dos gases na redução de metano como base à geração de créditos de carbono**. Universidade Federal de Viçosa. Dissertação de mestrado. Viçosa, MG, 2012. 60f.

CROSSETTI, P. D., & FERNANDES, P. D. (2005). **Para onde vai a China? O impacto do crescimento Chinês na siderurgia Brasileira**. BNDES Setorial. Edição número 22. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. 2011. **Balanco Energético Nacional 2011: Ano Base 2010**. Rio de Janeiro, 2011. 266p. Disponível em: <<http://www.ben.epe.gov.br>>. Acesso em: 25 out. 2016.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Plano de Ação para a Adequação Ambiental das Indústrias de Siderurgia Não-Integrada a Carvão Vegetal no Estado de Minas Gerais**. Sumário Executivo. 39 p. 2010.

FERREIRA, O. C. **O futuro do carvão vegetal na siderurgia**. 2000. Disponível em: <http://ecen.com/eee21/emiscar2.htm>. Acesso em: 15 de Setembro de 2017.

FILHO, E. P.; SANTOS, P. E. T. **Escolha de cultivares de eucaliptos em função do ambiente e do uso**. Relatório Técnico Embrapa, 2013.

FRANGETTO, F.W.; GAZANI, F.R. **Viabilização jurídica do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil - O Protocolo de Quioto e a cooperação internacional**. São Paulo: Peirópolis; Brasília, DF: IIEB - Instituto Internacional de Educação no Brasil, 2002. 477 p.

FGV. **Conjuntura Econômica**. Fundação Getúlio Vargas. vol 27 Rio de Janeiro. 1973.

FUNDACENTRO. **A vida e o trabalho nas carvoarias: riscos e impactos na saúde das crianças e dos adolescentes**. Belo Horizonte: Agência Terra, 1996.

FUNDACENTRO – Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho. Norma de higiene ocupacional NHO 08. **Procedimento técnico: coleta de material particulado sólido suspenso no ar de ambientes de trabalho**. São Paulo: Fundacentro, 2007.

FUNDAÇÃO GAIA. Relatório Annual, 2001. Disponível em: <http://fgaia.org.br/relatorios/2001/index.html>. Acesso em: Outubro de 2017

GONZÁLEZ, J. F.; ENCINAR, J. M.; CANITO, J. L.; SABIO, E.; CHACÓN, M. **Pyrolysis of cherry stones: energy uses of the different fractions and kinetic study**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Amsterdam, v. 67, p. 165-190, 2003.

GUERRA, C. B., 1995. **Meio Ambiente e Trabalho no “Mundo do Eucalipto”**. Belo Horizonte: Agência Terra.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Share of total primary energy supply in 2008: energy statistics, 2010. Acessado em: 01 abril. 2017.

IBA – Instituto Brasileiro de Arvores. **Relatório Anual 2017 - ano-base 2016**. Disponível em: [http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf). Acesso em: 22 de Outubro de 2017.

\_\_\_\_\_. **Relatório Anual 2016 - ano-base 2015.** Disponível em: [http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2016\\_.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf). Acesso em 22 de Outubro de 2017.

IAB – Instituto Aço Brasil. **O Processo Siderúrgico.** 2017. Disponível em <http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>. Acessado em: 20 de setembro de 2017.

\_\_\_\_\_. **Dados do Setor.** 2017. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/dados.asp>. Acessado em: 15 Outubro de 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. N 3, 2015. **Brasil em Números.** Disponível em: [https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2/bn\\_2015\\_v23.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2/bn_2015_v23.pdf). Acesso em 15 de Outubro de 2017.

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia. **Relatório de Sustentabilidade.** 2007. Disponível em: [http://www.acobrasil.org.br/site2015/downloads/Relatorio\\_2007.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site2015/downloads/Relatorio_2007.pdf). Acessado em: 20 de Outubro de 2017.

IEF – Instituto Estadual de Florestas. **Consumo de carvão vegetal de origem nativa cai 61% em Minas.** 2012. Disponível em: <http://www.ief.mg.gov.br/noticias/1/1354-consumo-de-carvao-vegetal-de-origem-nativa-cai-61-em-minas>. Acesso em: 20 de Junho de 2017.

LANA, A. Q. **Desenvolvimento e avaliação de uma fornalha metálica para combustão dos gases da carbonização da madeira.** 2014. P. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG - 2014.

MALARD, A. A. M. **Avaliação ambiental do setor de siderurgia não integrada a carvão vegetal do Estado de Minas Gerais.** Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade Sócioeconômica e Ambiental)-Universidade de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. **Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: Produção e utilização do carvão vegetal.** 1982. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. p. 75-89. 1982.

MENDONÇA, Francisco de Assis. **Geografia e meio ambiente.** São Paulo: Contexto, 2010.

\_\_\_\_\_. **Geografia socioambiental.** In: Terra Livre, 2011, São Paulo, n. 16, p. 113-132, 1º semestre, 2001.

MILANEZ, B; PORTO, M. F. S. **A ferro e fogo: impactos da siderurgia para o ambiente e a sociedade após a reestruturação dos anos 1990.** IV Encontro Nacional da Anppas, Brasília (DF) 4 – 6 jun.2008.Disponível em:<<http://www.anppas.org.br/encontro4/cd/ARQUIVOS/GT6-61-8-20080509163054.pdf> .Acesso em: 18 dez. 2016.

MINETTE, L. J.; PIMENTA, A. S.; FARIA, M. M.; SOUZA, A. P.; SILVIA, E. P.; FIEDLER, N. C. **Avaliação da carga de trabalho físico e análise biomecânica de trabalhadores da carbonização em fornos tipo “rabo-quente”.** 2007. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.31, n.5, p.853-858, 2007.

MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE. **Fundo Clima investirá R\$ 380 milhões para combater efeito estufa.** 2014. Disponível em:[http://www.mma.gov.br/informma/item/9933-fundo-clima-investir%C3%A1-r\\$-380-milh%C3%B5es-para-combater-efeito-estufa](http://www.mma.gov.br/informma/item/9933-fundo-clima-investir%C3%A1-r$-380-milh%C3%B5es-para-combater-efeito-estufa). Acesso em: 10 ago. 2017.

\_\_\_\_\_. **Governo investe pesado buscando reduzir emissões das siderúrgicas.** 2014. Disponível em: <http://mma.gov.br/informma/item/9924-governo-investe-pesado-buscando-reduzir-emiss%C3%B5es-das-sider%C3%BArgicas>. Acesso em: 10 Agosto de 2017.

\_\_\_\_\_. **Com proposta mais ambiciosa, Brasil chega à COP21 como importante negociador do clima.** 2014. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2015/11/com-proposta-mais-ambiciosa-Brasil-chega-a-COP21-como-importante-negociador-mundial-do-clima>. Acesso em: 25 de Junho de 2017.

\_\_\_\_\_. **Mudança do Clima.** 2017. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima>. Acesso em: 25 de Junho de 2017.

\_\_\_\_\_. **Fundo Nacional sobre Mudança do Clima.** 2017. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/fundo-nacional-sobre-mudanca-do-clima>. Acesso em: 26 de Junho de 2017.



\_\_\_\_\_. **Minas Gerais é pioneiro no Projeto Siderurgia Sustentável.**

Disponível em: <http://www.mma.gov.br/index.php/comunicacao/agencia-informma?view=blog&id=2178>. Acesso em. 26 de Junho de 2017.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Relatório Técnico 59 Perfil do Ferro-Gusa.** 58 p, 2009. Disponível em:

<[http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P33\\_RT59\\_Perfil do Ferro-Gusa.pdf/ce33aa31-8e3b-4cd1-8723-87dc213f8c6b](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P33_RT59_Perfil_do_Ferro-Gusa.pdf/ce33aa31-8e3b-4cd1-8723-87dc213f8c6b)>. Acesso em: 15 maio de 2017.

\_\_\_\_\_. **Plano Nacional de Energia 2030.** 2010. 146 p. Disponível em:

[http://www.epe.gov.br/PNE/20080512\\_6.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_6.pdf). Acesso em: 19 de Outubro de 2017.

MORAIS, L. B. G. C. **Pensando A Relação Sociedade-Natureza na Geografia: Apontamentos para a Geografia Socioambiental.** CAMINHOS DE GEOGRAFIA - revista on line. 8p, 2012. Disponível em:

<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/16797/12198>. Acesso em: 03 de dez. de 2017.

MORELLO,. T. F. **Carvão Vegetal e Siderurgia: De Elo Perdido a Solução para um Mundo Pós Kyoto.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 2013.

MOTA, F. C. M. **ANÁLISE DA CADEIA PRODUTIVA DO CARVÃO VEGETAL ORIUNDO DE Eucalyptus sp. NO BRASIL.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Brasília. 2013.

NISHI, M. H. et al. **Influência dos Créditos de Carbono na Viabilidade financeira de três Projetos Florestais.** Revista Árvore, v.29, n.2, p.263-270, 2005.

OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno-fornalha para a produção de carvão vegetal:** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2012.

PAULA,. L. I. **Cenários ambientais de produção de ferro gusa no contexto legal: o setor siderúrgico não-integrado a carvão vegetal de Sete Lagoas, Minas Gerais.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. 2010.

PAULA, S. O que é carbono equivalente?. 2007. Disponível em: <http://scienceblogs.com.br/rastrodecarbono/2007/08/o-que-e-carbono-equivalente/>. Acesso em: 20 de Outubro de 2017)

PENNISE, D. M.; SMITH, K. R.; KITHINJI, J. P.; REZENDE, M. E.; RAAD, T. J.; ZHANG, J.; FAN, C. **Emissions of greenhouse gases and other airborne pollutants from charcoal making in Kenia and Brazil**. Journal of Geophysical Research, v. 106, n. D20, p. 24143-24156, 2001.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D.C. **Atualização em carvão vegetal**. Apostila. Viçosa: UFV, 2004. 95p.

PINHEIRO, P.C.C. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática**. / Elmo Viana, Maria Emília Antunes de Rezende, Paulo César da Costa Pinheiro, Ronaldo Santos Sampaio. 1ª. ed. Belo Horizonte: Edição do autor, 2006.

PITCHEL, J.R.; DICK, W.A. & SUTTON, P. **Comparison amendments and management practices for long-term reclamation of abandoned mine lands**. J. Environ. Qual., 23:766-772, 1994.

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. O que é IDHM. 2017. Disponível em: <http://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/idh0/conceitos/o-que-e-o-idhm.html>. Acesso em: 21 de Outubro de 2017.

PUGH, C.E.; HOSSNER, L.R. & DIXON, J.B. **Pyrite and marcasite surface area as influenced by morphology and particle diameter**. Soil Sci. Soc. Am. J., 45:979-982, 1981.

RAAD, T.J.; PINHEIRO, P.C.C.; YOSHIDA, M.I. **Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus spp***. Cerne, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, abr.-jun. 2006

SINDIFER. Sindicato da Indústria do Ferro Gusa no Estado de Minas Gerais. **Anuário Estatístico 2012**. Belo Horizonte-MG. 23p.

SINDIFER. Sindicato da Indústria do Ferro Gusa no Estado de Minas Gerais. **Anuário Estatístico 2015**. Belo Horizonte-MG. 23p.

TACCINI, M. M. **Estudo das metodologias da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, referentes à avaliação de emissões de gases de efeito estufa na produção de carvão vegetal**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 2011.

TOLÊDO, D. P. **Análise técnica, econômica e ambiental de acrocomia aculeata (jacq.) lodd. ex mart. e jatropha curcas l. como alternativa de culturas para o produtor rural na cadeia produtiva do biodiesel**. 2010. 126f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

UNFER, R. K. **Processos de Fabricação de Aço através da Siderurgia**. Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Disciplina: Processos Mecânicos de Fabricação – PMF. 2011.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Approved baseline and monitoring methodology AM0041 “Mitigation of methane emissions in the wood carbonization activity for charcoal production”**: version 01. 2006. 63 p. Acesso em: 12 mar. 2017.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Formulário do documento de concepção de projeto (MDL-DCP) versão 3: Coconut Shell charcoaling and power generation in Badalgama**. Sri Lanka, versão número 10. 2008b.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Formulário do documento de concepção de projeto (MDL-DCP): versão 03: Mitigação de emissões de 60 metano na produção de carvão vegetal da V&M Florestal**. Minas Gerais, Brasil, versão número 1. 2012.

VITAL, M.H.F.; PINTO, M.A.C. **Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil**. BNDS setorial 30, p. 237-297. 201

## ANEXO I

### **Uso do MDL em um sistema produtivo com queima de gases?**

A preocupação com o clima deu início a uma série de reuniões de ordem mundial com o objetivo de discutir soluções para mitigação do avanço do aquecimento global. As respostas políticas internacionais só se tornaram concretas em 1992, pelas Nações Unidas, através da adoção de um tratado internacional, a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, conhecida também pela sigla CQNUMC.

Visando alcançar as metas de redução propostas durante a conferência, foram criados mecanismos com fins comerciais, recebendo estes, o nome de Mecanismos de Flexibilização. O intuito da criação desses mecanismos está ligado a uma busca alternativa para que os países desenvolvidos (Países do anexo 1) possam alcançar patamares desejáveis de redução sem afetar diretamente suas atividades, tais mecanismos visavam apenas a relação entre países do mesmo anexo. Frente a isso, foi proposto o MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), único mecanismo de flexibilização que envolve a participação de países fora do anexo 1.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) objetiva a mitigação de gases de efeito estufa em países em desenvolvimento, na forma de sumidouros, investimentos em tecnologias mais limpas, eficiência energética e fontes alternativas de energia. Segundo a Convenção, sumidouros são quaisquer processos, atividades ou mecanismos, incluindo a biomassa e, em especial, florestas e oceanos, que têm a propriedade de remover um gás de efeito estufa, aerossóis ou precursores de gases de efeito estufa da atmosfera.

No final de 2009, na COP 15, realizada em Copenhague, o Brasil assumiu, de acordo com seu Plano nacional de Mudanças do clima, uma meta de redução de 36,1 a 38,9% de suas emissões totais de GEE conforme critérios do mecanismo do NAMA (National Appropriated Mitigation Actions ou Ações de Mitigação Nacionalmente Apropriadas) (ABRAF, 2012).

Porém, por mais eficientes que os processos se tornem, a escala de crescimento das atividades tem superado de longe tais esforços, de modo que as emissões globais em valor absoluto têm crescido aceleradamente. Por isso políticas e acordos como o MDL se fazem de extrema necessidade, como forma de mitigar os impactos deste crescimento.

No contexto do MDL, considera-se que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o metano (CH<sub>4</sub>) são os dois gases mais danosos ao efeito estufa em termos quantitativos. Apesar da atividade de carbonização contribuir com a emissão de ambos os gases, o que torna o processo como potencialmente inserível no MDL, contabiliza-se a liberação apenas de metano, gás com potencial de aquecimento 21 vezes maior que a do CO<sub>2</sub>, já que este último é sequestrado no desenvolvimento dos plantios florestais.

Até o momento, existem duas metodologias propostas, que fazem referência à produção de carvão vegetal. São elas:

**AMSIIIK “Avoidance of methane release from charcoal production by shifting from traditional open-ended methods to mechanized charcoaling process” (UNFCCC, 2008):**

Essa metodologia faz referência a projetos que visem à redução ou mitigação da emissão de metano na produção de carvão, substituindo os métodos convencionais de produção de carvão por novas unidades de produção equipadas com sistemas de captura e queima do gás gerado no processo.

Se o objeto de análise para a aplicação da metodologia forem fornos de alvenaria, a unidade a ser utilizada para a verificação da eficiência do sistema deverá ser (KgCH<sub>4</sub>/t madeira).

**AM0041 “Mitigation of Methane Emissions in the Wood Carbonization Activity for Charcoal Production” (UNFCCC, 2006):**

Essa metodologia trabalha com créditos de carbono, para produções que comprovem melhorias no processo de conversão da biomassa para carvão, com consequente melhora do rendimento gravimétrico do processo, também é trabalhada usando como gás principal, o metano (CH<sub>4</sub>).

**ACM0021 “Reductions of emissions from charcoal production by improved kiln design and/or 20 abatement of methane” (UNFCCC, 2012):**

Metodologia que se aplica a projetos que reduzam a emissão de metano através da substituição dos fornos tradicionais por outros que utilizem algum sistema de recuperação e queima do gás gerado na produção. Em resumo, essa metodologia é uma união das duas anteriores, porém, é em geral, destinada a grandes unidades de produção.

Assim sendo, os produtores de carvão vegetal dotados de fornalhas e com produção de pequena e média escala, podem utilizar metodologia - AMSIIIK – “Avoidance of methane release from charcoal production by shifting from traditional open-ended methods to mechanized charcoaling process”. Metodologia que é aplicável a projetos que evitem a liberação de CH<sub>4</sub>, substituindo os métodos convencionais de produção de carvão por novas unidades de produção equipadas com sistemas de captura e queima do gás gerado no processo (UNFCCC, 2008).

Para a aprovação do projeto de MDL, deve-se traçar um cenário base, onde se demonstra o impacto daquela atividade, sem o uso das tecnologias e, posteriormente, demonstrar com dados reais e práticos o quanto se deixa de emitir com o incremento do sistema de redução.