

DANILO BARROS DONATO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE FORNALHA PARA COMBUSTÃO  
DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Donato, Danilo Barros, 1984-  
D677d Desenvolvimento e avaliação de fornalha para combustão  
2017 dos gases da carbonização da madeira / Danilo Barros Donato. –  
Viçosa, MG, 2017.  
ix, 89f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Fornalhas. 2. Carbonização. 3. Madeira - Combustão.  
4. Gases estufa. 5. Metano. 6. Monóxido de carbono. 7. Carvão  
vegetal. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Florestal. Programa de Pós-graduação em Ciência  
Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 22 ed. 634.983982

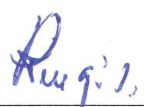
DANILO BARROS DONATO


**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE FORNALHA PARA COMBUSTÃO  
DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA**

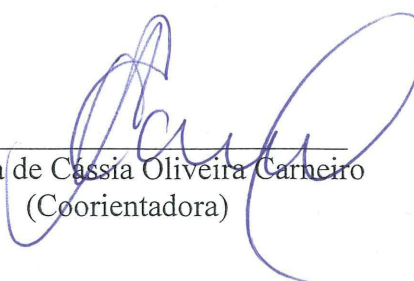
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 27 de abril de 2017.

  
Aylson Costa de Oliveira

  
Paulo Fernando Trugilho

  
Benedito Rocha Vital  
(Coorientador)

  
Angélica de Cassia Oliveira Carneiro  
(Coorientadora)

  
Ana Márcia Macedo Ladeira Caryalho  
(Orientadora)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais esta conquista.

Aos meus pais, Maria Neuza e Raimundo, pelo apoio incondicional, e às minhas irmãs, Diana e Camila.

À Maria Nena, pela amizade, confiança e conselhos.

À minha namorada, Janaina, pelo companheirismo, apoio e paciência.

À Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), pela infraestrutura disponibilizada para a pesquisa desenvolvida.

À Professora Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho, pela amizade de longa data, orientação e contribuições durante o desenvolvimento da pesquisa.

À Professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, por ser muito mais que uma coorientadora, por toda dedicação e contribuição na pesquisa desenvolvida.

Ao Professor Benedito Rocha Vital pelos auxílios e coorientação na pesquisa desenvolvida.

Aos bolsistas de Iniciação Científica do LAPEM, Reginaldo, Pedro.

Aos estudantes de pós-graduação, Wagner, Emerson, Welliton, Clarissa, Lucas Matheus e Miguel.

Aos funcionários do LAPEM Chico Bezerra, Eder Cabral, Sálvio (Moiado), Braulio e o Lawrence pela valiosa ajuda, amizade e descontrações ao longo da pesquisa.

Aos funcionários do viveiro, Sr. Ivo e Sr. João, por todas as vezes que auxiliaram no carregamento e descarregamento do forno.

Aos funcionários da Pós-graduação do DEF, Alexandre e Dilson.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnologia – CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Agradeço a todos aqueles que, de alguma maneira, colaboraram na execução deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

DANILO BARROS DONATO, filho de Maria Neuza Barros Donato e de Raimundo Pereira Donato, nasceu em 19 de dezembro de 1984, na cidade de Guanambi, Bahia.

No segundo semestre de 2004, ingressou no curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Minas Gerais, concluindo-o em dezembro de 2009.

Em agosto de 2011, iniciou o curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal, em nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, concluindo os requisitos necessários à obtenção do título de *Magister Scientiae* em julho de 2013.

Em agosto de 2013 ingressou no curso de doutorado, também pelo programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Viçosa (UFV), submetendo à defesa de tese, para obtenção do título de doutor em Ciência Florestal, em abril de 2017.

## SUMÁRIO

Página

<b>RESUMO.....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>3</b>
<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
1. Contexto energético da produção de carvão vegetal .....	3
2. Carbonização da madeira.....	4
3. Aspectos ambientais da produção de carvão vegetal.....	6
4. Balanço de emissões de produção de ferro gusa a carvão vegetal e mineral .....	8
5. Mecanismos para redução de emissões atmosféricas na produção de carvão vegetal.....	9
5.1. Técnicas adequadas.....	10
5.2. Rota da condensação dos gases da carbonização.....	11
5.3. Rota da combustão dos gases da carbonização.....	14
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>20</b>
<b>EFEITO DA CLASSE DIAMÉTRICA DA MADEIRA NO DESEMPENHO DE UMA FORNALHA DE ALVENARIA PARA QUEIMA DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>24</b>
2.1. Construção do forno.....	25
2.2. Dimensionamento e construção da fornalha .....	26
2.2.1. Dimensionamento da câmara de combustão da fornalha.....	26
2.2.2. Construção da câmara de combustão da fornalha.....	27
2.2.3. Construção da Chaminé da fornalha .....	28
2.3. Construção do duto de transporte dos gases até a fornalha .....	29
2.4. Carbonização da madeira.....	30
2.5. Instrumentação, operação e avaliação da fornalha .....	31
2.5.1. Instrumentação .....	31
2.5.2. Operação .....	31
2.6. Parâmetros avaliados do sistema forno-fornalha .....	32
2.7. Delineamento experimental .....	33
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>33</b>
3.1. Perfil térmico do forno.....	33
3.2. Parâmetros da fornalha .....	35
3.3. Perfil térmico da fornalha .....	38
<b>4. CONCLUSÕES.....</b>	<b>43</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>43</b>
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>46</b>
<b>REDUÇÃO DE METANO E MONÓXIDO DE CARBONO NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL EM SISTEMA FORNO-FORNALHA.....</b>	<b>46</b>

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>48</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>49</b>
2.1. Construção do forno.....	50
2.2. Construção da fornalha .....	51
2.2.1. Construção da câmara de combustão da fornalha.....	51
2.2.2. Construção da chaminé da fornalha.....	52
2.3. Construção do duto de transporte dos gases ate a fornalha .....	52
2.4. Carbonização da madeira.....	52
2.5. Coleta e caracterização dos gases .....	53
2.6. Delineamento experimental .....	55
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
3.1. Perfil das emissões médias dos gases da carbonização em função do tempo.....	55
3.2. Concentrações médias dos gases não condensáveis da carbonização .....	60
3.3. Correlações entre as temperaturas do forno e as emissões dos gases da carbonização .....	62
<b>4. CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>64</b>
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>67</b>
<b>INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DA MADEIRA DE EUCALIPTO NA PRODUTIVIDADE E NAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO EM SISTEMA FORNO-FORNALHA.....</b>	<b>67</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>69</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>70</b>
2.1. Descrição do sistema utilizado para as carbonizações da madeira.....	70
2.2. Carbonização da madeira.....	71
2.3. Propriedades do carvão vegetal .....	72
2.4. Delineamento experimental .....	73
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>74</b>
3.1. Parâmetros e rendimento gravimétrico das carbonizações .....	74
3.2. Propriedades do carvão vegetal .....	76
<b>4. CONCLUSÕES.....</b>	<b>81</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>81</b>
<b>CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>84</b>
<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>85</b>

## RESUMO

DONATO, Danilo Barros, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2017. **Desenvolvimento e avaliação de fornalha para combustão dos gases da carbonização da madeira.** Orientadora: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho. Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Benedito Rocha Vital.

O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, sendo este utilizado em grande parte pelo setor industrial brasileiro, principalmente pelo segmento siderúrgico. A utilização do carvão vegetal nesse segmento ainda é baixa, em torno de ¼, apesar de ter grandes benefícios ambientais quando comparado com o carvão mineral. No entanto, os benefícios ambientais passaram a ser questionados pelas emissões de metano e outros poluentes durante o processo de produção do carvão vegetal. Logo, rotas para minimizar esses impactos estão sendo desenvolvidas, a qual destaca-se a combustão dos gases poluentes por meio de fornalhas acopladas aos fornos, reduzindo as emissões a dióxido de carbono e água. Nesse sentido, o objetivo principal desse trabalho foi desenvolver e avaliar o desempenho de uma fornalha de alvenaria para combustão dos gases da carbonização da madeira visando a redução das emissões atmosféricas na produção de carvão vegetal. Como objetivos específicos, obter os parâmetros de funcionamento da fornalha; quantificar a redução de emissões de gases poluentes durante sua queima na fornalha, por meio de um analisador de gases; e avaliar o efeito da classe de diâmetro da madeira no tempo de carbonização e na qualidade do carvão vegetal. Para isso, foi construído um sistema forno-fornalha e para as carbonizações utilizou-se madeira de *Eucalyptus sp.*, em duas classes de diâmetro, de 7 -12 e de 13 - 18 cm, sendo realizadas três carbonizações para cada classe. Verificou-se que o tempo de queima dos gases nas carbonizações utilizando toras de 7-12 cm de diâmetro foi de 41,79% do tempo total do processo. Para as toras de maior diâmetro esse tempo foi de 34,73%. Já o consumo total de combustível auxiliar foi de aproximadamente 43,27 kg para as carbonizações das toras de menor diâmetro e de 55,56 kg para as toras de diâmetro maior. Devido a combustão dos gases da carbonização ao longo da fase exotérmica, foi observado redução das concentrações de CO e CH<sub>4</sub> na chaminé da fornalha de 66,5 e 70%, respectivamente, resultando na redução de 76,45 kg de CO<sub>2</sub> e por tonelada de carvão produzido. As carbonizações realizadas com madeiras de menor classe de diâmetro reduziram 14,86% do tempo em relação à classe de maior diâmetro e tiveram rendimento gravimétrico médio em carvão



vegetal superior; apesar do menor enforamento em madeira (4,45%). Conclui-se que a fornalha teve bom desempenho para a combustão dos gases da carbonização, independentemente da classe de diâmetro avaliada. A redução desses gases por meio de sua queima em fornalhas representa importante contribuição na mitigação de gases de efeito estufa, além de melhorar consideravelmente as condições de trabalho numa praça de carbonização.

## ABSTRACT

DONATO, Danilo Barros, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2017. **Development and evaluation of a furnace for the combustion of wood carbonization gases.** Advisor: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho. Co-advisors: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro and Benedito Rocha Vital.

Brazil is the world's largest producer and consumer of charcoal, which is used in large part by the Brazilian industrial sector, mainly by the steel segment. The use of charcoal in this segment is still low, around ¼, despite having great environmental benefits when compared to coal. However, the environmental benefits have come to be questioned by emissions of methane and other pollutants during the charcoal production process. Therefore, routes to minimize these impacts are being developed, which highlights the combustion of the polluting gases through furnaces coupled to the furnaces, reducing them to emissions to carbon dioxide and water. In this sense, the main objective of this work was to develop and evaluate the performance of a masonry furnace for the combustion of wood carbonization gases in order to reduce atmospheric emissions in the production of charcoal. And as specific objectives, obtain the parameters of operation of the furnace; Quantify the reduction of emissions of pollutant gases during its burning in the furnace by means of a gas analyzer; And to evaluate the effect of the diameter class of the wood on the carbonization time and on the quality of the charcoal. A Kiln-furnace system was constructed for this purpose, and for the carbonisations, Eucalyptus sp. Wood was used in two diameter classes, 7-12 and 13-18 cm, with three carbonations for each class. It was found that the time of burning of the gases in the carbonizations using logs of 7-12 cm in diameter was 41.79% of the total time of the process. For logs with the largest diameter this time was 34.73%. The total auxiliary fuel consumption was approximately 43.27 kg for the smaller diameter logs and 55.56 kg for the larger diameter logs. Due to combustion of the carbonization gases along the exothermic phase, a CO and CH<sub>4</sub> reduction in the furnace stack of 66.5 and 70% respectively was observed; Resulting in the reduction of 76.45 kg of CO<sub>2e</sub> per ton of coal produced. The carbonisations carried out with wood of smaller diameter class reduced 14.86% of the time in relation to the class of larger diameter; And had an average gravimetric yield of higher charcoal; However they had a smaller wooden stake at 4.45%. It was concluded that the furnace had a good performance for the combustion of the carbonization gases, regardless of the diameter class evaluated. The reduction of

these gases by burning them in furnaces represents an important contribution to the mitigation of greenhouse gases, as well as considerably improving working conditions.

## INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do mundo, sendo a maior parte dessa produção destinada quase que exclusivamente ao uso siderúrgico (aproximadamente 85%) e uma parcela menor é destinado ao uso nas indústrias de cerâmica, cimenteira, alimentícia e química (EPE, 2015).

Apesar do Brasil ser o maior produtor desse insumo energético, a sua base produtiva ainda é rudimentar, visto que mais de 60% de todo carvão vegetal produzido é proveniente de pequenos e médios produtores que utilizam fornos de encosta e circulares, sendo a condução do processo de carbonização realizado de forma empírica, ou seja, sem o controle de temperatura e sem nenhum mecanismo de controle das emissões. Especialmente em relação as emissões, vale salientar que uma grande parcela desses gases são compostos por monóxido de carbono e metano, esse último causador do efeito estufa e 25 vez mais poluente que o dióxido de carbono.

No entanto, ressalta-se que esses gases, apesar de poluentes, são combustíveis ricos em carbono e hidrogênio que, sob condições adequadas de temperatura e pressão, são capazes de, na presença de oxigênio, sofrer reações químicas, ocorrendo a liberação de energia sob a forma de luz e calor (CARDOSO et al., 2010).

Logo, uma das grandes necessidades tecnológicas do processo de carbonização da madeira é o desenvolvimento e/ou aperfeiçoamento das fornalhas para a combustão dos gases resultantes, pois com a queima dos gases tem-se um ambiente menos insalubre, além da possibilidade de utilização da energia térmica gerada para secagem da madeira a ser carbonizada, aumentando conseqüentemente o seu rendimento em carvão vegetal.

Neste contexto, cabe salientar que nos últimos 8 anos diversos modelos de fornalhas ou queimadores de gases foram desenvolvidos, contudo a maior parte das tecnologias geradas até o momento necessitam de aperfeiçoamento e melhorias, bem como torná-las mais atrativas economicamente para pequenos e médios produtores de carvão vegetal.

Deste modo, ainda existem alguns desafios a serem alcançados que são diretamente relacionados ao correto dimensionamento e operação das fornalhas; sendo estes influenciados tanto pelas variáveis da madeira como, por exemplo, a umidade e dimensões da tora a ser carbonizada, massa de madeira enforada, além das variáveis do processo, vazão mássica dos gases gerados, que por sua vez é bastante heterogênea,

qualidade dos gases, tempo de carbonização, entre outras. O controle destas variáveis é importante para a melhoria da eficiência de combustão dos gases da carbonização, obtida a partir do aumento do tempo de combustão e menor consumo de combustível auxiliar, além de reduzir a mão de obra de operação.

Diante do exposto, o objetivo principal desse trabalho foi desenvolver e avaliar o desempenho de uma fornalha para combustão dos gases da carbonização da madeira visando a redução das emissões atmosféricas na produção de carvão vegetal. Os objetivos específicos foram: obter as concentrações dos gases não condensáveis com e sem queima na fornalha em função do tempo de carbonização; obter os parâmetros de funcionamento da fornalha; obter o perfil térmico da fornalha durante a carbonização da madeira; correlacionar as emissões de H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> com as fases de carbonização da madeira; obter o perfil térmico do forno durante as etapas de carbonização e; avaliar o efeito da classe de diâmetro da madeira na produtividade e nas propriedades do carvão vegetal.

De acordo com os objetivos propostos, a pesquisa foi estruturada em quatro capítulos, conforme apresentado a seguir:

- Capítulo I: Referencial teórico;
- Capítulo II: “Efeito da classe diamétrica da madeira no desempenho de uma fornalha de alvenaria para queima dos gases da carbonização”;
- Capítulo III: “Redução de metano e monóxido de carbono na produção de carvão vegetal em sistema forno-fornalha”;
- Capítulo IV: “Influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e nas propriedades do carvão vegetal produzido em sistema forno-fornalha”.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELLOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 115-124, 2010.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE, “**Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia**”. Brasília, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, “**Balanco Energético Nacional 2015: Ano Base 2014**”. Rio de Janeiro, 2015

# CAPÍTULO I

## REFERENCIAL TEÓRICO

### 1. Contexto energético da produção de carvão vegetal

Em 2015, a área ocupada por florestas plantadas no Brasil totalizou 7,8 milhões de hectares, dos quais 5,6 e 1,6 milhões de hectares são plantios de *Eucalyptus* e *Pinus*, respectivamente. O segmento de celulose e papel concentra 34% da produção madeireira total do País, seguido pelos segmentos de siderurgia a carvão vegetal (14%), painéis de madeira industrializada (6%), produtos sólidos de madeira (4%) e o restante ocupado por investidores, produtores independentes (fomentados) e outros usos da madeira. Os principais plantios de eucaliptos estão localizados, principalmente, em Minas Gerais (24%), em São Paulo (17%) e no Mato Grosso do Sul (15%). E os plantios de *Pinus*, principalmente, nos estados do Paraná (42%) e em Santa Catarina (34%) (IBÁ, 2016).

O Brasil é o único país que produz carvão vegetal em larga escala para ser utilizado na indústria, destacando-se, então, como maior produtor e consumidor de carvão vegetal. Segundo a Associação Mineira de Silvicultura (AMS, 2015), no ano de 2014 foram produzidos 25.680 milhões de MDC de carvão vegetal, tendo Minas Gerais o principal estado produtor e consumidor de carvão vegetal (82,6%).

Os principais destinos foram os setores de ferro-gusa e aço, que consumiam 84,4% do carvão vegetal produzido, e de ferro-liga, que utilizou 11,6%, ferro nodular (1,8%), seguido do residencial (cocção e aquecimento residencial), do industrial (excluindo-se a siderurgia) (2,2%), com destaque para a produção de cimentos, indústria química, de alimentos e de cerâmicas (AMS, 2015). Esses dados evidenciam que, aproximadamente um terço da produção de ferro-gusa e mais da metade da produção de ferro-liga produzidos no Brasil utilizam o carvão vegetal como termorredutor.

Nos últimos anos, o consumo máximo de carvão foi alcançado em 2005, quando foram produzidos e consumidos mais de 38 milhões de metros de carvão (MDC) (AMS, 2015). No entanto, ressalta-se que a indústria siderúrgica foi afetada pela crise econômica ocorrida no cenário mundial em 2008 e atualmente pela crise política e econômica interna brasileira, além da dificuldade de inserção dos produtos siderúrgico no mercado externo devido a baixa competitividade dos produtos brasileiros, principalmente, com os oriundos da China e Ucrânia, provocando acentuada diminuição

na exportação de ferro-gusa, aço e ferro-liga, e, conseqüentemente, na produção e consumo de carvão vegetal. De acordo com o Ibá (2016), o segmento das indústrias produtoras de ferro-gusa operam com menos de 50% de sua capacidade instalada, ainda existindo elevado índice de ociosidade na produção de carvão vegetal, como reflexo da crise econômica. No entanto, salienta-se que a indústria de ferro gusa e aço, bem como os demais setores siderúrgicos continuam investindo somas significativas na implantação e manutenção de florestas renováveis, tendo uma média de plantio anual nos últimos sete anos em torno de 23 mil hectares, que correspondem a investimentos da ordem de R\$120 milhões/ano. Com a recuperação do mercado de ferro-gusa, que parece iminente, espera-se também a expansão dos plantios florestais (SINDIFER, 2016).

## **2. Carbonização da madeira**

A carbonização da madeira é um processo de decomposição térmica físico-química irreversível, cujo objetivo principal é eliminar a maior parte do oxigênio e do hidrogênio pela ação do calor e, com isso, possibilitar a concentração do carbono na estrutura residual, que é o carvão vegetal (VALE e GENTIL, 2008).

Segundo Park et al. (2010) a carbonização da madeira é um processo complexo, pois envolve muitos processos tais como transferência de calor, evaporação da umidade, cinética de decomposição, calor de pirólise, pressão acumulada no sólido, além de alterações nas propriedades do material ao longo do processo, entre outros.

O estudo da cinética da carbonização da madeira é essencial para o entendimento do mecanismo e dos modelos matemáticos dos processos de carbonização, os quais podem levar ao melhoramento das atuais práticas de conversão da madeira em carvão vegetal. Além disso, ~~à medida que~~ o comportamento da pirólise está diretamente relacionado à composição química do carvão, os parâmetros cinéticos correspondentes, obtidos a partir da análise térmica podem ser usados para a caracterização da biomassa (ALVES, 2013).

De acordo com Raad et. al (2006), por meio de uma abordagem matemática, onde os diferentes fenômenos que ocorrem durante a decomposição térmica da madeira podem ser associados a modelos cinéticos, permitindo obter equações para estimar tanto massas finais em função das temperaturas de carbonização, quanto os mecanismos cinéticos do processo de carbonização de peças de madeira, devido principalmente aos gradientes de temperatura internos. Esses métodos exigem um conjunto de testes

experimentais com taxas de aquecimento diferentes, permitindo determinar os parâmetros cinéticos sem conhecer os mecanismos de reação (SLOPIECKA et al, 2012).

Syred et al. (2006) descreve o processo de carbonização em termos de reações primárias e secundárias. As reações primárias são conversões dos componentes principais da madeira em produtos incluindo gases, líquidos e sólidos (carvão), enquanto que as reações secundárias reduzem os produtos de reações primárias em frações mais leves, resultando, principalmente, em gases.

A degradação térmica da madeira no processo de carbonização são expressas por alguns autores por meio de faixas de temperaturas, ocorrendo por vezes diferenças entre os valores de algumas faixas. Ressalta-se que muitas reações químicas ocorrem durante o processo de carbonização, as quais estão estritamente relacionadas com a temperatura a que se submete a madeira (Tabela 1).

**Tabela 1.** Etapas do processo de pirólise da madeira, em faixas de temperatura.

Referência	Etapas (faixa de temperatura e fenômenos de reação)				
Trugilho & Silva (2001)	< 200°C Secagem da madeira	200 - 280°C <u>Endotérmica</u> Ácido acético, metanol, H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> e outros	280 - 500°C <u>Exotérmica</u> Gases, CO, CH <sub>4</sub> , etc., e alcatrões	> 500°C Liberação de pequenas quantidades de voláteis, em especial H <sub>2</sub>	
Raad (2004)	< 100°C Secagem (liberação das ligações higroscópicas)	105 - 200°C H <sub>2</sub> O (vapor) ocorre pirolise somente em períodos muito longos	200 - 270°C <u>Endotérmica</u>	> 270°C <u>Exotérmica</u> CO, CH <sub>4</sub> , alcatrão, pequenas quantidades de voláteis, em especial H <sub>2</sub>	
Syred et al. (2006)	20 - 100°C Liberação de vapor d'água absorção de energia	100°C Temperatura se mantém até que toda umidade seja retirada	110 - 270°C Início da pirólise, liberando CO, CO <sub>2</sub> , metanol e ácido acético	270 - 270°C Início de reações endotérmicas	> 270°C Reações espontâneas (Exotérmicas)

Segundo Raad (2004) a determinação das temperaturas onde ocorrem as reações de degradação dos constituintes da madeira tem sido feita, mais precisamente, por meio



de técnicas modernas de análise térmica, como Termogravimetria (TG) e Análise Térmica Diferencial (DTA).

A análise termogravimétrica mostra como a madeira se comporta quando aquecida, sendo possível verificar em que temperatura é iniciada a decomposição térmica e, ainda, em que faixa de temperatura a decomposição térmica é mais pronunciada. A análise termodiferencial torna possível a identificação dos picos e/ou das faixas de ocorrência das reações endotérmicas e exotérmicas do processo.

Na degradação térmica da madeira ocorrem fenômenos que, além de envolver reações químicas, condução de calor, evaporação e transporte de gases, esses são afetados principalmente pelos parâmetros operacionais como temperatura, pressão e taxa de aquecimento (DI BLASI, 2008).

O processo de pirólise é regido pela taxa de decomposição química dos biopolímeros, devendo ser analisado também quanto aos aspectos de transferência de calor e de massa, devido a estes participarem decisivamente para os resultados do processo, principalmente quanto a etapa de volatilização (VERAS et al., 2002).

Segundo Numazawa (2000) em processos de carbonização convencionais, a taxa de aquecimento, a temperatura final do processo de carbonização, o tempo de permanência na temperatura final de carbonização e a umidade da madeira, são os fatores mais importantes responsáveis pela cinética das reações, pelas propriedades físico-químicas e pelo rendimento gravimétrico.

### **3. Aspectos ambientais da produção de carvão vegetal**

No processo convencional de produção de carvão vegetal, aproximadamente 30% da madeira é convertida em carvão vegetal e o restante de sua massa (70%) é convertida em gases que na maior parte da produção nacional são lançados para atmosfera, sendo que aproximadamente 25% destes gases são compostos não condensáveis ( $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$  e  $CH_4$ ) e 45% são compostos orgânicos condensáveis.

Os poluentes contidos nos gases da carbonização podem ser classificados em três categorias: pós e partículas em suspensão, gases não condensáveis e compostos orgânicos condensáveis (MEZERETTE e GIRARD, 1996), sendo essa última categoria a mais importante, já que são potencialmente tóxicos para os seres humanos, por conterem alcatrão, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e compostos orgânicos nitrogenados.

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 (DEMIRBAS, 2000). De modo geral, temperaturas e taxas de aquecimento elevadas e alto teor de umidade da madeira maximizam o rendimento em gases e reduzem o rendimento em carvão vegetal.

Ressalta-se que no processo de carbonização, de acordo com o aumento da temperatura, há aumento da emissão de compostos gasosos e diminuição da produção de compostos orgânicos condensáveis na forma de licor pirolenhoso (SHEN et al., 2010). Logo, a influência da temperatura na produção desses coprodutos se deve, em grande parte, à constituição dos compostos químicos da madeira, conferindo diferentes resistências à degradação térmica, o que faz com que a liberação de produtos gasosos, como um todo, ocorra de acordo com os incrementos em temperatura e em faixas específicas.

Segundo Canal et al. (2016) a utilização de faixas teóricas de degradação da madeira na condução da carbonização contribui para redução da emissão de metano, por promover uma correta condução do processo, aumentando o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Os mesmos autores mencionam também que não são recomendáveis para o processo de carbonização teores de umidade acima de 30%, pois sob a ótica de emissão de gases de efeito estufa e também do aspecto técnico, tem-se aumento expressivo de metano, além de reduzir o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Neste contexto, a redução dos gases poluentes para o meio ambiente é fundamental para se obter a produção de carvão vegetal sustentável, ou seja, de maneira menos nociva ao meio ambiente. Cabe salientar que no Brasil, mais de 60% do carvão vegetal é essencialmente produzido em sistemas rudimentares de carbonização, e a maioria das alternativas para redução da poluição implica em aumento do custo de produção, que na maioria das vezes tornam inviáveis para pequenos e médios produtores. Logo, diversos sistemas de redução e controle da poluição vêm sendo estudados com intuito de minimizar os impactos causados pelas emissões de poluentes, além da busca incansável para redução dos custos de implantação, operação e manutenção dos mesmos.

Além disso, as emissões de gases geradas na carbonização proporcionam grandes desafios tecnológicos, que deverão ser traçados para minimizar os efeitos poluentes desse processo. Deste modo, a presença de incentivos fiscais ou regulamentações que visem a utilização dos coprodutos ou a queima dos gases, também

é um dos mecanismos para que se tenha ações rápidas para implantação destas tecnologias.

#### **4. Balanço de emissões na produção de ferro gusa a carvão vegetal e mineral**

A produção de carvão vegetal no Brasil está vinculada intimamente com a produção de ferro-gusa; essa situação acontece em poucos lugares no mundo, pois a maioria dos países utilizam o carvão mineral (PIMENTA et al., 2006).

O segmento de siderurgia no Brasil registrou no ano de 2015 um consumo de 4,6 milhões de toneladas de carvão vegetal, provenientes de 14% do total de florestas plantadas de eucaliptos no país, perdendo apenas para o setor de celulose e papel (IBÁ, 2016). Esse consumo de carvão vegetal pelas siderúrgicas representa apenas 20% da produção brasileira de ferro gusa, pois o restante é suprido pela utilização do carvão mineral. O carvão vegetal apresenta inúmeras vantagens sobre o carvão mineral, entre elas, ser renovável, menos poluente, baixo teor de cinzas e praticamente isento de enxofre. Já os impactos ambientais das usinas de carvão mineral são grandes, não só pelas emissões atmosféricas, mas também pelo descarte de resíduos sólidos e poluição térmica, além dos riscos inerentes da mineração, que vem levando a vários óbitos anualmente.

O carvão mineral é um combustível de origem fóssil e sua utilização resulta na emissão de diversos poluentes. Na produção de gusa a carvão mineral, há emissão de diversos poluentes como óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), material particulado e diferentes hidrocarbonetos orgânicos, como o benzeno (MILANEZ e PORTO, 2008). Por outro lado na produção de ferro gusa a carvão vegetal proveniente de florestas plantadas há um ganho ambiental de aproximadamente três toneladas de CO<sub>2</sub>, em comparação ao uso de fontes fósseis ou não renováveis, pois na rota que utiliza o carvão mineral como redutor, há emissões de CO<sub>2</sub> e remoção de O<sub>2</sub> em todas as fases da cadeia, totalizando a emissão de 1.883 kg de CO<sub>2</sub> e remoção de 1.274 kg de O<sub>2</sub> por tonelada de ferro-gusa ao longo de toda a cadeia. Já na cadeia que utiliza o carvão vegetal como redutor totaliza-se a remoção líquida de 1.111 kg de CO<sub>2</sub> e a emissão de 164 kg de O<sub>2</sub> por tonelada de ferro-gusa (CGEE, 2010). Logo, o uso de carvão vegetal como termoredutor na siderurgia representa para o país uma grande oportunidade na diminuição de emissões de gases de efeito estufa, conforme ilustra a Figura 1.



**Figura 1** - Resumo do balanço de emissões na produção de ferro gusa a carvão vegetal e a carvão mineral. Fonte: (MARQUES, 2008).

Sendo assim, a rota a carvão vegetal, menos poluidora, coloca a siderurgia brasileira em posição privilegiada no que se refere às emissões atmosféricas, favorecendo que ela esteja à frente quanto à adoção de metas setoriais para a redução de GEE. No entanto, apesar das vantagens ambientais, essas ainda não são devidamente exploradas pelos produtores nacionais e nem valorizadas pelo mercado externo. Há, portanto, vários desafios a serem enfrentados pelo setor e pelos governos, para ampliar a produção de ferro gusa a carvão vegetal, com incentivos à produção florestal, de forma a contribuir para a redução de emissões de GEE e ao mesmo tempo promover maior agregação de valor para esses produtos (ABRAF, 2012).

Essas medidas certamente devem envolver paralelamente a modernização da indústria de produção de carvão vegetal, com adoção de políticas públicas que regulamentem o emprego de tecnologias voltadas à redução das emissões de GEE, com aproveitamento energético dos subprodutos, bem como ao alcance de melhores rendimentos gravimétricos.

## 5. Mecanismos para redução de emissões atmosféricas na produção de carvão vegetal

Os mecanismos para redução das emissões atmosféricas na produção de carvão vegetal passam, primeiramente pelas técnicas adequadas, pela rota de recuperação dos gases condensáveis e/ou pela combustão dos gases em fornalhas.

## 5.1. Técnicas adequadas

Atualmente, em torno de 60% da produção nacional de carvão vegetal é feita por pequenos e médios produtores, alcançando um rendimento gravimétrico médio de 26% (CGEE, 2015). Embora as pesquisas relacionadas a produção de carvão vegetal tenha evoluído nos últimos anos, em função de diversas variáveis, como exemplo, materiais construtivos dos fornos, controle do processo de carbonização, aproveitamento dos gases gerados, entre outras; a produção, na sua maioria ainda ocorre de forma empírica, com base em critérios subjetivos. Segundo Campos (2008), o controle operacional subjetivo dos fornos de carbonização baseia-se na coloração dos gases, na temperatura das paredes do forno sentida pelo tato e na observação da aparência dos controladores de ar (Tatus), refletindo em baixo rendimento gravimétrico e índices inferiores de qualidade do carvão vegetal.

Neste contexto, diversos trabalhos mencionam que uma das formas mais efetivas, atualmente, de redução de emissões de Gases do Efeito Estufa, no parque industrial de produção de carvão vegetal no Brasil, seria por meio da melhoria da eficiência da carbonização, entendida por rendimento gravimétrico do processo, que pode ser melhorado carbonizando a madeira com menor teor de umidade, controle da temperatura dos fornos por sensores portáteis ou supervisórios, melhorias nos fornos, capacitação, dentre outros.

Ao carbonizar a madeira é desejável que seu teor de umidade esteja abaixo de 30%, pois valores acima aumenta o tempo de carbonização, devido à necessidade de secagem da madeira no interior do forno para depois iniciar a carbonização propriamente dita, além de ocasionar o consumo de parte da madeira enfiada para fornecimento da energia necessária para a evaporação da água, reduzindo o rendimento gravimétrico (OLIVEIRA, 2012).

Viana et al. (2006) afirmam que a energia para retirar a água presente na madeira é gerada a partir da queima de parte da carga a ser carbonizada e quanto maior a umidade, maior será a energia necessária para a secagem e menor será o rendimento da carbonização. Os mesmos autores citam experimentos realizados com *Eucalyptus camaldulensis* em forno tipo rabo quente, em que a produção aumentou 12% com a redução da umidade da madeira de 48% para 25%.

Segundo Cardoso et al. (2010) o rendimento e a qualidade do carvão vegetal dependem de alguns fatores, como a qualidade da madeira a ser carbonizada, seu teor de

umidade, que deve estar abaixo de 30% e o controle do processo, envolvendo, tempo e temperatura média máxima, principalmente.

Cardoso (2015), comparando-se as estimativas de rendimentos gravimétricos das carbonizações utilizando madeira de diferentes teores de umidade, obteve rendimento variando de 28,3% a 36,9%, tendo obtido ganho de 4,85% a mais de carvão ao se utilizar a madeira previamente seca, sendo que este resultado torna-se ainda mais expressivo quando se extrapola a produção para escala industrial.

De acordo com Raad (2001) a produção de carvão vegetal monitorada via pirometria, associada a um sistema supervísório proporciona maior controle dos processos de carbonização e resfriamento, resultando em ganhos representativos no rendimento gravimétrico.

No entanto, o controle da carbonização por meio da mensuração da temperatura interna do forno por sensores portáteis de infravermelho (pirômetro) tem sido mais utilizado devido ao seu menor custo em relação ao sistema supervísório, sendo acessível tanto para médios quanto pequenos produtores. Neste caso, além da aquisição do pirômetro necessita-se também da obtenção de cilindros metálicos que são acoplados a parede dos fornos, sendo que o seu comprimento deve ser igual ou um pouco maior que a espessura da parede e com uma das extremidades fechada voltada para a sua parte interna.

Por meio desse investimento tem a possibilidade dos produtores irem além do rendimento gravimétrico médio atual de 26% e conseguir alcançar rendimentos da ordem de até 35% (OLIVEIRA, 2012). Logo, essa produção adicional representa um significativo passo para a melhoria de competitividade do setor, além do menor consumo de madeira para uma mesma produção de carvão e conseqüentemente menor percentual de emissão gases poluente.

De modo geral, as empresas e os produtores, estão investindo, porém faz-se necessários, ainda, políticas públicas para promover e priorizar incentivos que facilitem o acesso de pequenos produtores às inovações, tanto de processo quanto de equipamentos de melhor eficiência energética (CGEE, 2015), de modo, a alcançar a produção sustentável de carvão vegetal.

## **5.2. Rota da condensação dos gases da carbonização**

Os compostos orgânicos condensáveis (COC) são os principais compostos poluentes presentes nos gases da carbonização, pois conforme já mencionado essa é a

maior parcela gerada no balanço de massa do processo de carbonização e consequentemente a mais importante do ponto de vista ambiental, visto que a maior parte da produção nacional de carvão vegetal não recupera esses compostos, sendo estes lançados na atmosfera.

No processo de recuperação dos gases condensáveis gerados na carbonização da madeira tem-se o licor pirolenhoso contendo o ácido pirolenhoso e o alcatrão insolúvel. 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 ácido pirolenhoso é a primeira fase a evaporar durante a destilação do alcatrão. Formado, em sua maior parte, por cerca de 92% de água, contém ainda 8% de compostos orgânicos, dos quais o ácido acético é o composto predominante (ALMEIDA, 1982). Entretanto, uma série de outros compostos orgânicos também estão presentes no ácido pirolenhoso (Tabela 1).

**Tabela 2.** Rendimentos dos produtos da carbonização da madeira e concentrações médias dos compostos do licor pirolenhoso.

<b>Produtos da Carbonização</b>	<b>% base seca*</b>
Carvão (80% CF)	33,00
Gases não-condensáveis	25,00
<b>Gases Condensáveis</b>	<b>42,00</b>
<b>Ácido Pirolenhoso</b>	<b>35,50</b>
(Ácido Acético)	5,00
(Metanol)	2,00
(Alcatrão solúvel)	5,00
(Água e outros)	23,50
<b>Alcatrão Insolúvel</b>	<b>6,50</b>
(Fenol)	6,00
(Guaiacol)	6,00
(2,6-Xilenol)	1,00
(Cresol)	1,00
(o-Cresol)	6,00
(p,m-Cresol)	7,00
(4-Etil-guaiacol)	1,00
(4-Propil-guaiacol)	0,10
(3,5-Xilenol)	5,00
(Siringol)	35,00
(4-Metil-siringol)	11,00
(4-Etil-siringol)	5,00
(Água)	16~20
<b>Total</b>	<b>100</b>

\* % em relação ao peso inicial de madeira seca. Fonte: (ALVES, 2003).

Segundo Pimenta et al., (2004) já foram identificados mais de 600 compostos presentes nos COC e, dentre estes compostos, os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos apresentam potencial de causar impactos ao ambiente em função de suas propriedades mutagênicas e carcinogênicas. Estes compostos estão estreitamente associados com o alcatrão vegetal, tanto na forma de alcatrão insolúvel como na forma de alcatrão solúvel presente no ácido pirolenhoso.

A recuperação de produtos químicos a partir do alcatrão vegetal tem, como etapa inicial, a destilação fracionada; onde normalmente, são separadas quatro frações e um resíduo designado como piche vegetal (Tabela 2). Essas frações encontradas no alcatrão têm utilização na indústria química e alimentícia, sendo utilizadas como aditivos (flavorizantes) em alimentos produzidos industrialmente (CARAZZA e OKUMA, 2000).

**Tabela 3.** Rendimentos médios em destilação de alcatrão vegetal (CARAZZA e OKUMA, 2000).

<b>Descrição</b>	<b>% do alcatrão bruto</b>
Fração A: até 105 °C (ácido pirolenhoso)	10,4
Fração B: 105-180 °C (óleo leve)	10,6
Fração C: 180-240 °C (óleo médio)	20,9
Fração D: acima de 240 °C (óleo pesado)	4,6
Resíduo (piche)	44,0
Perdas (calculadas por diferença)	9,5
<b>Total</b>	<b>100,00</b>

Algumas experiências conduzidas no início da década de 1980 recuperaram o alcatrão vegetal dos gases da carbonização e aproveitaram como combustível em substituição ao óleo combustível. Porém, a inevitável geração de ácido pirolenhoso associada à obtenção de alcatrão tornou-se um ponto crítico, visto a inexistência de rota clara, ampla e consistente para seu aproveitamento. Portanto, tem sido nítida a não competitividade de ambos os produtos em relação aos derivados de petróleo, o que tem desestimulado as recuperações, devido principalmente a inexistência de uma cadeia sólida entre produção, processamento e consumo final. Destaca-se que a simples proposta da condensação dos gases pode resultar na geração de passivos ambientais adicionais importantes, se não houver uma adequada destinação para eles (BRITO et al., 2012).

Outras experiências de utilização dos COC tem se mostrado eficaz, como por exemplo, para a saúde e a boa produtividade das culturas orgânicas, sem a aplicação de



agrotóxicos, funcionando como bio-estimulante em culturas como soja, café e na fruticultura, sendo 40% mais barato do que os métodos convencionais. Outra aplicação é a 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 destes gases condensáveis gerados pela carbonização da madeira, não só poderá minimizar o impacto ambiental causado pelo lançamento dos gases na atmosfera como contribuir na redução do aquecimento global e gerar novas alternativas de emprego.

### **5.3. Rota da combustão dos gases da carbonização**

A rota de combustão dos gases da carbonização tem como objetivo diminuir as emissões geradas durante o processo por meio da incineração desses gases em fornalhas ou queimadores acoplados aos fornos de carbonização. Os queimadores ou fornalhas são dispositivos projetados visando à maior eficiência da combustão e possibilidade de aproveitamento da energia térmica liberada durante o processo de combustão (MAGALHÃES, 2007).

Os gases gerados durante a carbonização da madeira são ricos em carbono e hidrogênio, que em condições adequadas de temperatura e pressão são capazes de reagir na presença de oxigênio, liberando energia na forma de luz e calor. Os principais gases não condensáveis gerados são  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$  e  $CH_4$ . No caso de queima completa desses gases, as emissões seriam constituídas apenas de  $CO_2$ , vapor d'água e energia na forma de calor (CARDOSO, 2010).

Em geral o início da combustão dos gases da carbonização é caracterizado pelo início da fase exotérmica que ocorre, no caso específico de fornos com ciclo de processo de 6 a 7 dias, após 30-36 horas (depende da umidade inicial da madeira) do início da carbonização. Nesta fase, os gases são ricos em produtos inflamáveis e o teor de água é mínimo.

No interior da câmara de combustão dos gases são atingidas temperaturas que variam entre 650 a 1.150°C no interior da fornalha, sendo essa faixa suficiente para promover a destruição térmica do alcatrão, do licor pirolenhoso, dos fenóis e também de gases como  $CO$  e  $CH_4$  (CARDOSO et al., 2010).

Além de reduzir os gases nocivos ao ambiente, como o CH<sub>4</sub>, gás de efeito estufa com grande potencial de aquecimento global, reduz também, o CO, que afeta indiretamente esse processo por participar de reações fotoquímicas que alteram os níveis de GEE na atmosfera (PENNISE et al., 2001).

Cabe salientar que a combustão dos gases diminui, consideravelmente, o aspecto visual e o efeito tóxico da emissão, o que contribui positivamente para as condições de trabalho nas proximidades das unidades de produção de carvão vegetal.

Outra vantagem da combustão dos gases é a liberação de energia térmica em sua reação, com grande potencial de aproveitamento. Essa energia térmica gerada no processo pode ser utilizada para secagem da madeira a ser introduzida nos fornos, o que gera diminuição do seu teor de umidade e conseqüentemente reduz seu efeito negativo na qualidade do carvão vegetal e em seu rendimento gravimétrico, acarretando aumento de produtividade nas unidades de produção de carvão vegetal (CARDOSO et al., 2015).

O adicional térmico gerado pela combustão dos gases da carbonização pode também ser aproveitado na geração de energia elétrica, por meio de turbinas e geradores movidos a gás, ou acoplando-se a uma caldeira a vapor, ligada a uma turbina conectada a um gerador de eletricidade. Tem-se observado, no entanto, elevado custo para implantação desses sistemas, o que torna atrativa a alternativa de direcionamento dessa energia térmica para secagem prévia da madeira, que requer custo de implantação muito inferior, diminuindo os riscos de investimento e tornando a produção de carvão vegetal mais sustentável (CARNEIRO et al., 2012).

Conforme já mencionado, a carbonização da madeira acontece por fases (fase endotérmica e exotérmica), caracterizadas pelo grau de decomposição térmica, que podem até ser percebidas em uma mesma peça de madeira em aquecimento (OLIVEIRA, 1982). Porém, essas fases não acontecem individualizadas dentro de um forno de carbonização e sim concomitantemente, fazendo com que não existam faixas ou períodos específicos definidos para que um determinado gás proveniente do processo ocorra em alta concentração. À medida que a temperatura de carbonização se eleva, reduz-se a liberação de vapor e aumenta a de gases com maior poder calorífico, fornecendo, portanto, gás combustível para o processo da queima (COSTA, 2012).

Cardoso (2010), avaliando a eficiência na redução de emissões da carbonização em um sistema forno-fornalha, verificou que a combustão desses gases foi eficiente, diminuindo em 96% e 93% as emissões de metano e monóxido de carbono, respectivamente.

Coelho (2013) desenvolveu uma fornalha metálica para queima dos gases da carbonização da madeira e conseguiu um período de combustão contínua durante 32% do tempo total do processo, tendo obtido uma redução das emissões médias de 74,14% para o monóxido de carbono e 99,8% para o metano.

Lana (2014) avaliando também uma fornalha metálica obteve o tempo médio de combustão dos gases de 42% do tempo total do processo, tendo obtido redução média de 86 e 88,03% das concentrações de monóxido e metano, respectivamente.

Vale salientar que a composição e a vazão dos gases ao longo do tempo de carbonização são variáveis, ocasionando, na maioria das vezes, um dimensionamento incorreto das fornalhas para combustão dos gases da carbonização, o que resulta em consumo demasiado de combustível auxiliar para eliminação total dos gases resultantes da carbonização.

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. Porém, as variações térmicas e fluidodinâmicas dos fornos de carbonização da madeira são barreiras a serem transpostas para o desenvolvimento de um sistema ótimo de combustão dos gases (COELHO, 2013).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M.R. 1982. **Recuperação de alcatrão em fornos de alvenaria**. Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC. p177-180.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS Plantadas - ABRAF, "Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2011". Brasília, 2012.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS. 2015. **Anuário estatístico 2015: ano base 2014**. Belo Horizonte, MG. 41p.

CAMPOS, A.C.M. Carvão de *Eucalyptus*: efeito e parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR. 2008. 118 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da madeira) – Universidade Federal de Lavras – MG. 2008.

Canal, W. D.; Carvalho, A. M. M. L.; Carneiro, A. C. O.; Vital, B. R.; Pereira, B. L.C.; Donato, D. B. Efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases de efeito

estufa no processo de carbonização. **Scientia Forestalis**, volume 44, n. 112 p.831-840, dezembro de 2016.

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.

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G; VITAL, B. R.; BARCELLOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 115-124, 2010.

CARNEIRO, A. C. O; LANA, A. Q.; OLIVEIRA. A. C; PEREIRA, B. L. C., SALLES, T. C. **Estudo da viabilidade técnica e econômica da produção de carvão vegetal em fornos circulares com baixa emissão de poluentes**. Centro de Pesquisas em Economia Aplicada – CEPEA/ESALQ. Confederação Nacional da Agricultura e Pecuária – CNA. Viçosa, MG. 2012.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE, “Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia”. Brasília, 2015.

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.

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.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, "Balanço Energético Nacional 2015: Ano Base 2014". Rio de Janeiro, 2015.

FERREIRA, O. C. 2000. **Emissão de gases de efeito estufa na produção e consumo do carvão vegetal**. In: Economia e Energia. Ano III. Setembro/Outubro. Disponível em: <<http://ecen.com/eee18/enerequi.htm#energiaeq>>. Acesso em 05/05/2016.

IBÁ. INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Anuário Estatístico 2016, ano base 2015. Brasília, 2016. 100p.

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.

MAGALHÃES, E. A., **Desenvolvimento e análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa**. 2007. 184p. Tese D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

MARQUES, F. **O Setor Siderúrgico Brasileiro e o Caso Plantar** (Palestra proferida na disciplina EAD-5953 – Estratégias Empresariais e Mudanças Climáticas, da FEA/USP) 17 set. 2008, FEA/USP, São Paulo.

MEZERETTE, C.; GIRARD, P. **Environmental Aspects of Gaseous Emissions from Wood Carbonization and Pyrolysis Processes**. Centre Technique Forestier Tropical, France, 20 p. 1996.

Numazawa, S. **Contribution à l'étude de la pyolyse lente sous pression du bois – Détermination des paramètres optima du procédé et caractéristiques des produits obtenus**, Tese de Doutorado, Université de Technologie de Compiègne, França, 2000.

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

OLIVEIRA, J. B. **Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal**. Belo Horizonte, M.G. CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.77-89, 1982.

PARK, W. C.; ATREYA, A.; BAUM, H. R. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis. **Combustion and Flame**, Michigan, v. 157, n. 3, p. 481-497, Nov. 2010.

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.

RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização do *Eucalyptus spp.*** 2004. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) -Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

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.

ROSILLO-CALLE, Frank; BEZZON, Guilherme. Produção e uso industriais do carvão vegetal. In: ROSILLO-CALLE, Frank; BAJAY, Sérgio V.; ROTHMAN, Harry. Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2005.

SINDIFER. Sindicato da Industria do Ferro Gusa no Estado de Minas Gerais. Anuário Estatístico 2016, ano base 2015. Belo Horizonte-MG. 23p.

SLOPIECKA, K.; BARTOCCI, P.; FANTOZZI, F. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis. **Applied Energy**, London, v. 97, p. 491-497, Sept. 2012.

SYRED, C.; GRIFFITHS, A. J.; SYRED, N.; BEEDIE, D.; JAMES, D. A. Clean, efficient system for producing charcoal, heat and power (CHaP). **Fuel**, London, v. 85, n. 10, p. 1566-1578, July 2006.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.) **Scientia Agraria**, Piracicaba, c. 2, n. 27, 2004.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal. **Revista Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 114-201, jul./dez. 2001.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Rio Branco: Suprema, 2008. p.195-241.

VERAS, C.A.G.; CARVALHO JR, J.A.; FERREIRA, M.A. The chemical percolation desvolatilization model applied to the desvolatilization of coal in high intensity acoustic fields, *Journal of Brazilian Chemical Society*, 2002, Vol 13, N. 03 pgs 358–367.

## CAPÍTULO II

### EFEITO DA CLASSE DIAMÉTRICA DA MADEIRA NO DESEMPENHO DE UMA FORNALHA DE ALVENARIA PARA QUEIMA DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO

**RESUMO** – Apesar de existir trabalhos na literatura sobre desempenho de fornalhas e estes terem permitidos avanços no que tange a sua construção e as oportunidades da queima dos gases da carbonização, essa tecnologia ainda é incipiente e não está completamente consolidada e sim em desenvolvimento. A maior parte dessa tecnologia necessita de mais estudos, principalmente no que tange materiais construtivos, isolamento térmico, eficiência, além da redução dos custos e dos parâmetros da madeira enforada. Nesse sentido, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar o desempenho de uma fornalha de alvenaria acoplada a um forno circular para queima dos gases da carbonização. Os objetivos específicos foram: avaliar os parâmetros de funcionamento da fornalha; obter o perfil térmico do forno e da fornalha em função da classe de diâmetro da madeira carbonizada. Para as carbonizações utilizou-se madeira de *Eucalyptus* sp., com idade aproximada de 6 anos, comprimento de 1,5 m, em duas classes de diâmetro, de 7 -12 cm e de 13 - 18 cm. O processo de carbonização foi realizado monitorando-se a temperatura do forno, a qual foi controlada pelas entradas de ar (“tatu”) e pelo acionamento da válvula borboleta instalada no duto de ligação do forno com a fornalha. Para proceder a combustão dos gases foi utilizada uma fornalha acoplada a um forno circular de alvenaria. Foi observado que o início da queima dos gases para as toras de 7-12 cm de diâmetro ocorreu na trigésima hora da carbonização e mantida por período correspondendo a 41,79% do tempo total da carbonização. O início da queima dos gases nas carbonizações utilizando as toras de maior diâmetro ocorreu na trigésima quarta hora do processo e o tempo total de queima correspondeu a 34,73%. As toras de menor diâmetro tiveram menor consumo de combustível auxiliar (43,27 kg). As carbonizações realizadas com madeira de diâmetro menor tiveram menor tempo de condução, reduzindo em 14,86% o tempo de processo em relação à classe de diâmetro maior. Diante do exposto, pode-se dizer que a fornalha se mostrou adequada, pois atendeu as condições do processo de combustão, tendo um bom isolamento térmico, sem problemas em sua estrutura, tendo como principais vantagens seu baixo custo e facilidade de construção.

**Palavras-Chave:** Câmara de combustão; temperatura; combustível auxiliar.



## CHAPTER II

### PERFORMANCE OF A MASONRY FURNACE TO BURN CARBONIZATION GASES

**ABSTRACT** – Although there is some work in the literature on the performance of furnaces, and these have allowed great advances in their construction and the opportunities of the burning of carbonization gases, this technology is still incipient and not fully consolidated, but in development, And most of this technology requires more studies, especially in relation to construction materials, thermal insulation, efficiency, and the reduction of costs and parameters of the wood encased. In this sense the main objective of this work was to evaluate the performance of a masonry furnace coupled to a circular furnace to burn the carbonization gases. And as specific objectives: to evaluate the parameters of operation of the furnace; And to obtain the thermal profile of the furnace and the furnace according to the diameter class of the charred wood. Eucalyptus sp. Wood, approximately 6 years old, 1.5 m long, was used for carbonisation in two diameter classes, 7-12 and 13-18 cm. The carbonization process was carried out by monitoring the oven temperature, which was controlled by the air intakes ("arm") and by the activation of the butterfly valve installed in the furnace connection duct with the furnace. A furnace coupled to a circular masonry furnace was used to combust the gases. It was observed that the onset of gas burning for 7-12 cm diameter logs occurred at the 30th hour of carbonization, for a period corresponding to 41.79% of the total carbonization time. The burning of the gases in the carbonizations using the larger diameter logs occurred at the thirty-fourth hour of the process and the total burning time corresponded to 34.73%. The smaller diameter log had a lower auxiliary fuel consumption (43.27 kg). The carbonisations performed with smaller diameter wood had a shorter lead time, reducing process time by 14.86% in relation to the larger diameter class. In view of the above, it can be said that the furnace proved to be adequate, since it met the conditions of the combustion process, having a good thermal insulation, without problems in its structure, having as main advantages its ease of construction and low cost when compared to other materials.

**Keywords:** Combustion chamber; temperature; auxiliary fuel.

## 1. Introdução

O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, sendo responsável por 25% da produção mundial. Este insumo energético é em grande parte utilizado pelo setor industrial brasileiro, principalmente o segmento siderúrgico, sendo o estado de Minas Gerais o maior consumidor e produtor nacional (IBÁ, 2016).

A utilização do carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira traz grandes benefícios e tem ainda um grande potencial social, econômico e ambiental (MCHENRY, 2009). Entretanto, os benefícios ambientais passaram a ser questionados pelas emissões de metano e outros poluentes durante o processo de produção do carvão vegetal. Outro grande inconveniente quando se trata de produção de carvão vegetal é que muitas vezes as unidades produtoras estão situadas próximas às zonas urbanas e rodovias, conseqüentemente os gases liberados pelo processo tornam-se problema para a comunidade localizada no entorno, uma vez os gases são nocivos ao meio ambiente e ao homem, além de conter material particulado.

Nesse sentido, pesquisadores de diferentes áreas têm buscado formas de reduzir as emissões de poluentes, por meio da combustão dos gases gerados na carbonização da madeira utilizando para tanto, fornalha acoplada aos fornos (OLIVEIRA, 2012).

Ressalta-se que, apesar de já existirem trabalhos na literatura sobre o tema, que permitiram grandes avanços no que tange a construção e as oportunidades da queima dos gases da carbonização, essa tecnologia ainda é incipiente e não está completamente consolidada e sim em desenvolvimento. A maior parte dessa tecnologia necessita de mais estudos, principalmente no que tange materiais construtivos, isolamento térmico, eficiência, além da redução dos custos e dos parâmetros da madeira a ser carbonizada.

Outros desafios da utilização da rota de queima dos gases da carbonização, estão relacionados aos parâmetros da madeira, tais como suas dimensões, teor de umidade e massa enfiada, além disso, tem-se as variáveis do processo, como por exemplo, tempo de carbonização, variação da composição e temperatura dos gases ao longo do processo, número de fornos a serem acoplados a mesma fornalha, distância entre eles, e outros. Sabe-se que essas variáveis exercem uma grande influência no correto dimensionamento da fornalha e também no seu desempenho, pois a qualidade dos gases que irão chegar à câmara de combustão da fornalha ao longo do processo poderão interferir na eficiência de sua combustão, podendo exigir um maior consumo de combustível auxiliar e também maior demanda de mão de obra em sua operação.

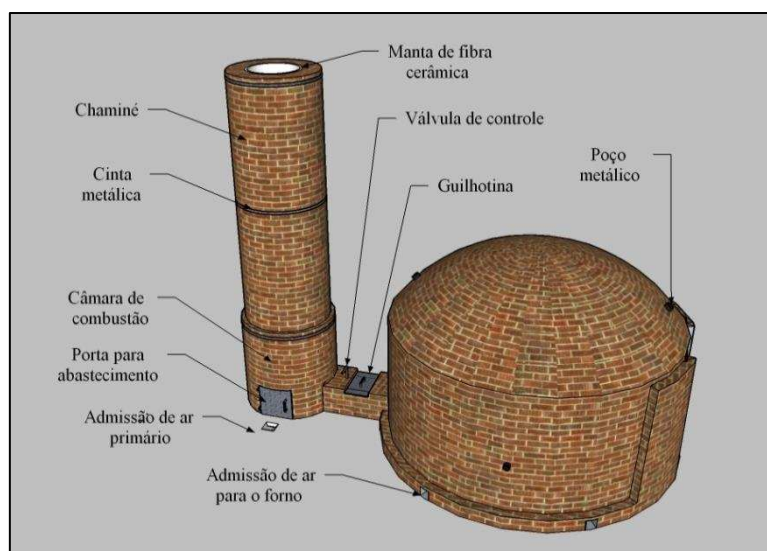
Sendo assim, a rota da queima dos gases da carbonização tem sido desafiadora para os atuais padrões produtivos de carvão vegetal no Brasil, não só pelo fato desta rota estar em fase de desenvolvimento, mas também pelo seu custo de construção e operação, além de compreender, de fato, os comportamentos dos gases e funcionalidade da fornalha de acordo com as características da madeira. Logo, faz necessário o estudo destes sistemas de produção de carvão vegetal voltada a realidade dos pequenos e médios produtores para que se tenha queimadores de baixo custo e eficientes, além de serem de fácil operação.

Nesse sentido, o objetivo principal deste trabalho foi dimensionar e avaliar o desempenho de uma fornalha de alvenaria acoplada a um forno circular para queima dos gases da carbonização. Os objetivos específicos foram: avaliar os parâmetros de funcionamento da fornalha e; obter o perfil térmico do forno e da fornalha em função da classe de diâmetro da madeira carbonizada.

## **2. Material e Métodos**

Este trabalho foi desenvolvido na unidade de pesquisa de produção de carvão vegetal do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM, da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa – MG.

Para realizar este estudo foi utilizado um forno circular de alvenaria ao qual foi acoplado uma fornalha para queima dos gases da carbonização. Optou-se por esse tipo de forno para receber a fornalha por ser de baixo custo, fácil construção e bastante difundido entre os pequenos e médios produtores de carvão vegetal, principalmente no Estado de Minas Gerais. Na Figura 1 é apresentada uma vista em perspectiva do sistema construído.



**Figura 1** - Vista em perspectiva do sistema forno-fornalha de alvenaria.

## 2.1. Construção do forno

O forno com capacidade volumétrica de 12 st, aproximadamente 8,5 m<sup>3</sup> de madeira, foi construído com tijolos maciços cerâmicos e revestido externamente por uma argamassa especial de areia lavada, cimento, argamassa refratária, cal virgem, açúcar e água, com o objetivo de reduzir possíveis entradas de ar e perdas térmicas e também aumentar a sua durabilidade. Ao nível do solo e do piso, foram feitas seis aberturas, conhecida popularmente como “Tatu”, cujas dimensões foram de 10 x 15 cm, as quais estão uniformemente distribuídas no perímetro do forno para admissão de ar. A abertura e o fechamento dessas entradas controlavam a admissão de ar no sistema e, conseqüentemente, as temperaturas do forno, auxiliando na carbonização.

A porta do forno foi construída em formato trapezoidal, com base maior de 90 cm, base menor de 70 cm e altura de 150 cm. Em sua aresta superior uma cantoneira metálica em formato de “U” foi fixada, para garantir sustentação e durabilidade.

Uma cinta metálica de 3/8 polegada foi instalada ao redor do forno, externamente, em sua primeira fileira de tijolos da cúpula, dando estabilidade ao forno às pressões internas dos gases durante a carbonização e às forças gravitacionais incidentes sobre a copa.

Para o controle da carbonização foram inseridos oito poços metálicos (cilindros metálicos com fundo fechado): quatro localizados na copa a 1,70 m e quatro laterais a 60 cm em relação ao solo, distribuídos entre as aberturas para admissão de ar. Para medir as temperaturas do forno, utilizou-se um sensor de infravermelho, pirômetro,

marca Minipa modelo “MT-350”, com capacidade de medir temperaturas entre 30 e 550°C.

## 2.2. Dimensionamento e construção da fornalha

### 2.2.1. Dimensionamento da câmara de combustão da fornalha

O volume da câmara de combustão foi calculado em função da vazão dos gases do forno e da massa de madeira enforada. A capacidade volumétrica real do forno utilizado neste estudo foi de 8,5 m<sup>3</sup>, no entanto, o volume útil de madeira enforada foi de aproximadamente 7 m<sup>3</sup>, o que corresponde a aproximadamente 3,2 toneladas de massa seca de madeira.

De acordo com as características do forno mencionadas acima, considerando a massa específica do gás a 0 °C de 1,44 kg/m<sup>3</sup> e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal de 30%, o valor aproximado do volume de gás foi de 1555,56 m<sup>3</sup>.

Ao se conhecer o volume real e a massa específica dos gases na temperatura de operação, pôde-se determinar as vazões mássica dos gases e do comburente, conforme as equações a seguir:

$$\dot{m} = \frac{mg}{t} \quad (1)$$

$$\dot{m}_c = \dot{m} + \dot{m}_{ar} \quad (2)$$

Onde:

$\dot{m}$ : vazão mássica (kg/s)

$mg$ : massa de gás (kg)

$t$ : tempo (s)

$\dot{m}_c$ : vazão da câmara de combustão (kg/s)

$\dot{m}_{ar}$ : vazão de ar (kg/s)

A vazão mássica dos gases da carbonização foi de 8,64\*10<sup>-3</sup> kg/s, considerando tempo médio de carbonização de 72 horas (tempo aproximado para o forno avaliado).

A vazão volumétrica foi calculada pela Equação 3. Para o cálculo da densidade dos gases, considerou-se a temperatura interna da câmara de combustão em 800 °C.

$$Q = \frac{\dot{m}_c}{\rho} \quad (3)$$

Onde:

Q: vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/s)

$\dot{m}_c$ : vazão da câmara de combustão (kg/s)

$\rho$ : densidade dos gases (kg/m<sup>3</sup>)

O volume da câmara de combustão foi estimado a partir da equação 4.

$$V = Q * Tr \quad (4)$$

Onde:

V: volume estimado da câmara de combustão (m<sup>3</sup>)

Q: Vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/s)

Tr: Tempo de residência dos gases no interior da câmara (s)

Para fins de efeito de cálculo do volume da câmara de combustão, considerou-se o valor de *Tr* igual a 2s. Logo, multiplicando esse valor pela vazão volumétrica obteve-se o volume de 0,095 m<sup>3</sup>. Multiplicando esse valor por 3 (número de fornos que se pretende acoplar a essa fornalha) obteve-se um volume da câmara de combustão igual a 0,286 m<sup>3</sup>.

### 2.2.2. Construção da câmara de combustão

A câmara de combustão da fornalha foi construída em alvenaria com formato cilíndrico e altura de 100 cm, diâmetro interno de 65 cm e externo de 110 cm. Foi construída de tijolos maciços de cerâmica e uma mistura de argamassa de argila, açúcar e cimento, em parede dupla, com revestimento interno em manta cerâmica para melhorar o isolamento térmico do meio externo.

A manta cerâmica utilizada foi NAUTEC IBAR HT, com espessura média de 2” (5,08 cm), constituída de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (52 a 54%), SiO<sub>2</sub> (44 a 48%) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,1 a 0,2%), TiO<sub>2</sub> (0,1 a 0,2%). A manta foi fixada no interior da fornalha por meio de pinos metálicos em formato de “L”.

As propriedades da manta são: Limite máximo de uso a 1.482°C, limite contínuo de uso a 1.380 °C, ponto de fusão a 1760°C, diâmetro da fibra de 2,5µ, comprimento da fibra 178 mm e contração linear de 2,0% a 1.300 °C por 24 horas (NUTECIBAR,

2007). Além de isolar termicamente a manta aumenta a eficiência do processo de combustão, assim como a vida útil da fornalha.

Na lateral da câmara de combustão foi instalada uma janela basculante metálica revestida internamente por manta cerâmica, de 40 x 40 cm, para alimentação de combustível auxiliar (resíduos lignocelulósicos), responsável por proceder à ignição dos gases advindos da carbonização, e também para elevar a temperatura da câmara de combustão quando necessário.

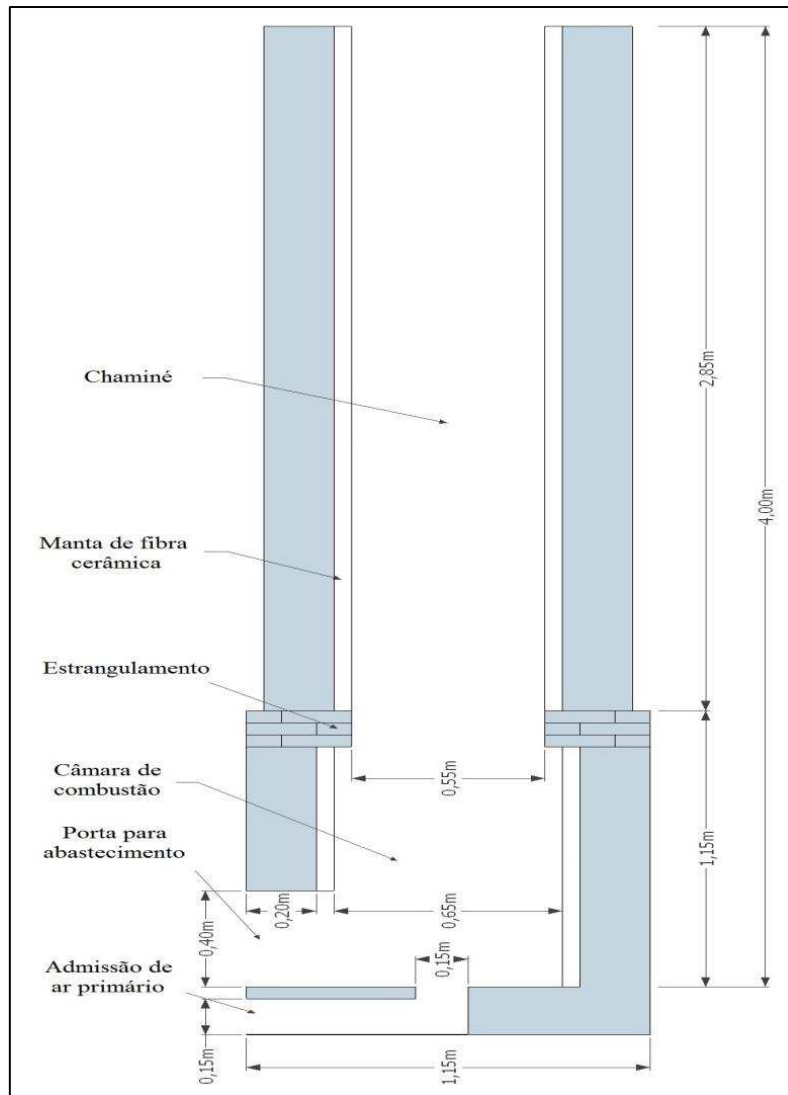
No centro da base da fornalha foi instalada uma grelha metálica de 15 x 15 cm, responsável pela admissão de ar primário para o interior da câmara de combustão da fornalha, advindo do meio externo, através de um duto subterrâneo de seção quadrangular, construído em tijolos cerâmicos comuns e argamassa de areia e argila, com 90 cm de comprimento e 15 cm de altura. Na extremidade do duto utilizou-se uma chapa metálica (dimensões de 25 cm de comprimento por 15 cm de largura) para controle da entrada de ar atmosférico na fornalha, localizada a 30 cm externamente à porta de admissão de combustível auxiliar.

Após a construção da câmara de combustão da fornalha foi feito um estrangulamento de 15 cm no seu diâmetro antes de iniciar a construção da chaminé. Este procedimento foi realizado visando alcançar o tempo de residência dos gases (2s) na câmara de combustão e conseqüentemente aumentar a eficiência de combustão dos mesmos.

### **2.2.3. Construção da chaminé da fornalha**

A chaminé foi construída sobre a câmara de combustão, logo após o “estrangulamento” do diâmetro da câmara. A chaminé foi construída em alvenaria, com 55 cm de diâmetro interno e altura total de 4 m. A chaminé, também, foi construída em parede dupla e revestida internamente por manta cerâmica.

Na Figura 2 é apresentada a vista lateral da fornalha, evidenciando o duto de admissão de ar primário para a fornalha, a câmara de combustão e a chaminé da fornalha.



**Figura 2** - Vista em corte lateral com dimensões dos componentes da fornalha.

### 2.3. Construção do duto de transporte dos gases até a fornalha

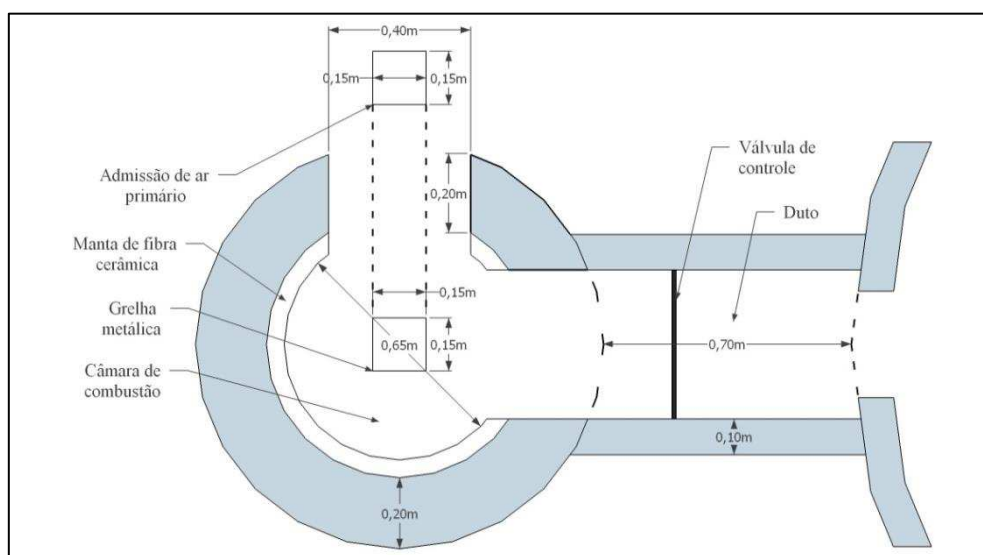
O duto de transporte dos gases da carbonização do forno até a fornalha foi construído com tijolos maciços, em camada simples (10 cm de espessura) e assentados com argamassa.

O duto para condução dos gases possuía 38 cm de altura por 38 de largura e 70 cm de comprimento. Em sua lateral (35 cm da entrada da fornalha) foi inserido um tubo de cobre de 0,5 cm de diâmetro para inserção do termopar do tipo “k” para obtenção da temperatura de saída dos gases do forno.

O controle da vazão dos gases da carbonização para a fornalha foi realizado por meio da válvula borboleta, operada manualmente, instalada no centro do duto à 40 cm de distância da parede do forno (Figura 1).



Na Figura 3 é apresentada a planta baixa da câmara de combustão da fornalha e do duto de transporte dos gases da carbonização.



**Figura 3** - Planta baixa da câmara de combustão e duto de transporte dos gases até a fornalha.

#### 2.4. Carbonização da madeira

Para as carbonizações utilizou-se madeira de *Eucalyptus* sp., com idade aproximada de 6 anos, comprimento de 1,5 m, em duas classes de diâmetro, de 7 -12 e de 13 - 18 cm, apresentando umidade média de 34,28 e 39,35%, respectivamente. Foram realizadas seis carbonizações, sendo três para cada classe de diâmetro.

As carbonizações foram conduzidas utilizando as faixas teóricas de temperatura obtidas na copa do forno, conforme proposto por Oliveira et al. (2013) para madeira com teor de umidade entre 30 e 40% (Tabela 1).

**Tabela 1** – Faixas teóricas de temperatura para controle da carbonização da madeira.

Fase	Faixa de Temperatura	Tempo de Temperatura
I	100 – 150 °C	15 – 16 horas
II	150 – 270 °C	11 – 12 horas
III	270 – 380 °C	23 – 24 horas
IV	380 – 400 °C	17 – 18 horas

O processo de carbonização foi realizado monitorando-se a temperatura do forno, a qual foi controlada pelas entradas de ar (“tatu”) e pelo acionamento da válvula borboleta instalada no duto de ligação do forno com a fornalha.

As temperaturas do forno foram monitoradas a partir de oito poços metálicos, utilizando-se um sensor infravermelho de temperatura, pirômetro, marca Minipa, modelo “MT-350, com intervalo de medição de 30 °C a 550 °C.

O término da carbonização foi determinado pela chegada da frente de carbonização nos últimos controladores de ar do forno (“tatu”) localizados mais próximos da saída de gases para o duto. Após o fechamento dos “tatus” e constatada a redução do volume dos gases da carbonização na saída da chaminé, realizou-se a completa vedação do forno, que se deu com auxílio de uma guilhotina de chapa de ferro de 35 x 30 cm e 3 mm de espessura, fixada entre o local de saída de gases do forno e o início do duto de transporte dos gases da carbonização. A guilhotina foi instalada de modo a ser guiada por duas cantoneiras laterais de ferro, e após esse procedimento iniciou-se o processo de resfriamento do forno.

## **2.5. Instrumentação, operação e avaliação da fornalha**

### **2.5.1. Instrumentação**

Foram instalados três termopares tipo “K” equidistantes ao logo da fornalha, para o monitoramento das temperaturas. O primeiro termopar foi instalado na câmara de combustão, a 50 cm de altura, o segundo a 1,85 m e o terceiro foi instalado a 80% da altura total da chaminé, a 3,20 m, para evitar interferências externas da atmosfera.

### **2.5.2. Operação**

A primeira ignição da fornalha foi realizada com auxílio de 5 kg de combustível auxiliar (resíduos lignocelulósicos) concomitantemente a ignição do forno. O intuito deste abastecimento inicial foi para proceder a ignição do forno, visto que o aumento de temperatura no interior da fornalha aumenta a pressão manométrica negativa exercida pela chaminé, e conseqüentemente aumenta a tiragem dos gases pela mesma, auxiliando na ignição do forno.

O segundo abastecimento da fornalha foi realizado no início da fase exotérmica do processo de carbonização caracterizada por temperaturas na copa do forno a partir de 270 °C e a temperatura no duto de transporte dos gases da carbonização superiores a 100 °C. Este procedimento foi realizado de acordo com experimentos conduzidos por

Cardoso (2010), Costa (2012), Oliveira (2012), Coelho (2013) e Lana (2014), que observaram vazões e concentrações de gases com maior poder calorífico ocorrendo a partir do início da fase exotérmica do processo, permitindo a sua combustão por grandes intervalos de tempo, sem a necessidade de abastecimento com combustível auxiliar.

Os demais abastecimento da fornalha com combustível auxiliar foram realizados ao longo do processo, somente quando necessário a intervenção para manter a temperatura no interior da câmara de combustão da fornalha para não cessar a chama. É importante ressaltar que todo material combustível utilizado no abastecimento da fornalha foi pesado e também determinado o seu teor de umidade para quantificação do consumo de combustível auxiliar gasto ao final do processo.

O controle da entrada de ar para interior da câmara de combustão da fornalha foi realizado com auxílio de uma chapa metálica que permaneceu parcialmente fechada, ao longo do processo, com o objetivo de controlar a entrada ar atmosférico, de modo a propiciar melhor balanço entre combustível e comburente.

Outro periférico do sistema forno-fornalha que auxiliou no controle da combustão dos gases e também na condução do processo de carbonização foi a válvula borboleta, pois esta permitiu o controle da vazão dos gases advindos do forno auxiliando na manutenção da chama na câmara de combustão da fornalha.

## **2.6. Parâmetros avaliados do sistema forno-fornalha**

No sistema forno-fornalha foram mensurados a temperatura do forno; temperatura dos gases no duto; temperatura da câmara de combustão da fornalha; temperatura da chaminé ponto 1 (1,85 m de altura da chaminé) temperatura da chaminé ponto 2 (3,2 m de altura da chaminé); massa seca de combustível auxiliar e tempo total de queima dos gases.

A temperatura interna do forno e da fornalha foi mensurada em intervalos regulares de 1 hora, do início ao término do processo de carbonização. A partir dos dados de temperaturas obteve-se o perfil térmico do forno e da fornalha em função das classes de diâmetro da madeira utilizada nesse estudo.

O desempenho da fornalha foi determinado por meio da relação entre o tempo total de queima sem a necessidade de abastecimentos com resíduos e o tempo total de carbonização. Sendo que o início da combustão dos gases se deu mediante ao segundo abastecimento da câmara de combustão da fornalha (início da Fase III do processo).

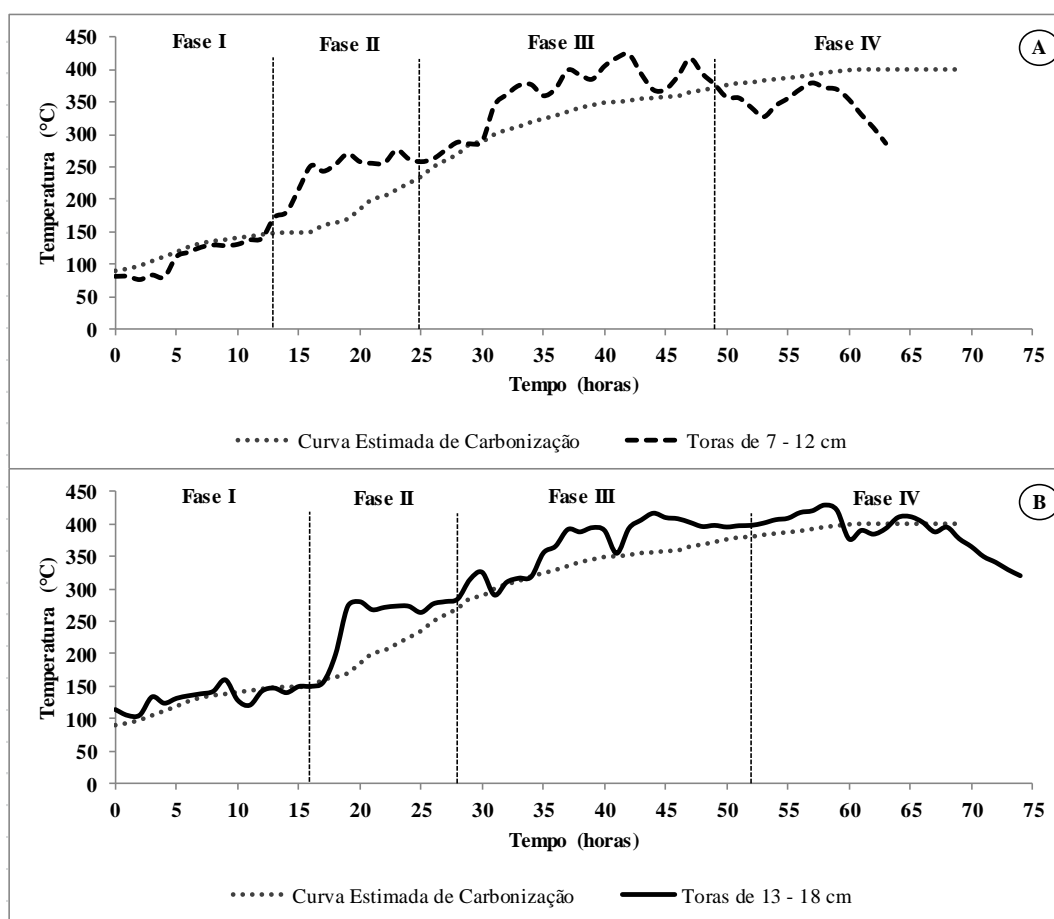
## 2.7. Delineamento experimental

Para avaliar o efeito da classe de diâmetro da madeira nos parâmetros operacionais da fornalha em função das fases do processo de carbonização, o experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com duas classes de diâmetro, sendo três repetições por tratamento, totalizando 6 unidades amostrais. Os dados foram submetidos a uma análise de variância pelo teste F, ao nível de significância de 5%.

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1. Perfil térmico do forno

Na Figura 4 são apresentadas as temperaturas médias da copa do forno em função do tempo de carbonização para as duas classes de diâmetro avaliadas e a curva estimada.



**Figura 4** - Temperatura média na copa do forno em função do tempo de carbonização e classes de diâmetro da madeira.

Observa-se que as temperaturas médias obtidas na copa do forno foram próximas as faixas estabelecidas de temperatura para cada fase, indicando que houve uma adequada condução do processo.

Observa-se que as carbonizações realizadas com madeira de menor classe de diâmetro tiveram menor tempo de condução (63 horas), ou seja, reduziu 14,86% do tempo em relação à classe de diâmetro maior. Além disso, a madeira de maior diâmetro apresentou maior teor de umidade e essa variável também tem grande influência sobre o tempo final de carbonização, pois quanto mais elevado esse teor, maior será o tempo necessário para eliminação desta água, no início da carbonização, aumentando o tempo da fase endotérmica e, conseqüentemente, o tempo total de carbonização.

Segundo Andrade (2000) na secagem da madeira, a transferência de energia na forma de calor ocorre do ambiente para a sua superfície, através de convecção, e daí para seu interior por condução, ocorrendo inicialmente a perda de umidade da superfície da madeira e, posteriormente com a transferência de calor da superfície para o seu interior ocorre aumento da energia cinética das moléculas de água, favorecendo sua movimentação para a superfície e, conseqüentemente, a sua secagem.

Logo, outra variável que influenciou no tempo final de carbonização foi o diâmetro da madeira, pois por unidade de volume, quanto menor o diâmetro maior será o somatório das áreas superficiais e, conseqüentemente, maior será a transferência de calor por unidade de tempo. Segundo Rozas (2007) a condutividade térmica é a medida da taxa de fluxo de calor que por meio da espessura de um material, sujeita-se a um gradiente de temperatura.

Dessa forma, o fato da madeira apresentar baixa condutividade térmica e quando submetida nas mesmas condições de temperatura e pressão, faz com que o diâmetro seja a variável que mais influencia na transferência de calor. Sendo assim, a madeira de maior diâmetro requer um tempo maior para ser carbonizada do que as de menor diâmetro, nas mesmas condições. Pois, a degradação térmica da madeira requer que o calor seja transferido radialmente através da sua espessura, o que reforça a influência do diâmetro no tempo de carbonização.

Vale ressaltar, também, que quanto menor o tempo de carbonização do forno, maior será a sua produtividade, no entanto, além do ciclo de carbonização, deve-se levar em consideração, as variáveis como o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e a massa de madeira enforada, visto que, quando se enfora madeira de menores

dimensões tem-se um maior número de espaços vazios e, conseqüentemente, uma menor massa de madeira enfiada.

### 3.2. Parâmetros da fornalha

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios dos parâmetros operacionais da fornalha para as diferentes classes de diâmetro.

**Tabela 2 – Valores médios dos parâmetros da fornalha.**

Parâmetros	Fase I		Fase II		Fase III		Fase IV	
	7-12 cm	13-18 cm	7-12 cm	13-18 cm	7-12 cm	13-18 cm	7-12 cm	13-18 cm
Tempo total de queima dos gases (%)	0 a	0 a	0 a	0 a	83,33 a	45,83 b	54,55 b	77,78 a
Temperatura dos gases no duto (°C)	56,93 a	50,13 a	92,18 a	65,58 b	198,88 a	138,42 b	268,83 a	310,86 a
Temperatura Câmara de combustão (°C)	48,87 a	50,06 a	65,55 a	53,75 a	508,32 a	258,38 b	323,92 b	402,32 a
Temperatura da Chaminé Ponto 1 (°C)	52,80 a	54,50 a	69,83 a	60,08 a	607,00 a	319,46 b	418,58 b	541,82 a
Temperatura da Chaminé Ponto 2 (°C)	53,47 a	58,44 a	69,55 a	59,00 a	528,92 a	314,75 b	353,08 b	496,19 a
Temperatura externa da câmara de combustão (°C)	20,20 a	19,07 a	21,75 a	18,00 a	31,86 a	29,58 a	37,50 a	40,91 a
Massa seca de combustível auxiliar (kg)	3,85 a	3,85 a	0 a	0 a	11,11 b	25,93 a	27,16 a	24,63 a

\* Médias seguidas da mesma letra entre as classes de diâmetro para um mesmo parâmetro e fase não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste F.

Observa-se na Tabela 2 que nas Fases I e II do processo de carbonização, os valores médios dos parâmetros da fornalha para ambas as classes de diâmetro não tiveram diferença significativa, exceto a temperatura dos gases no duto na Fase II.

Observa-se também que não houve queima dos gases nessas duas fases, pois apesar do abastecimento inicial da fornalha na Fase I, este contribuiu apenas para auxiliar no processo de ignição do forno. Ressalta-se que nessas duas fases iniciais, o

processo de carbonização é endotérmico, ou seja, parte da energia gerada no processo é utilizada na secagem da madeira e início da degradação térmica de seus constituintes.

Mello (2013) menciona que na fase endotérmica do processo ocorre grande absorção de energia devido à secagem da madeira e que somente a partir dos 300 °C que o processo de carbonização da madeira se torna exotérmico, liberando, portanto, energia para o meio e acentuando o processo de degradação da madeira e a consequente liberação de gases.

Segundo Taccini (2011), nas Fases I e II da carbonização a madeira, até que o forno atinja a temperatura média de 280 °C, em sua cúpula, ocorre na maior parte, apenas liberação de vapor d'água e CO<sub>2</sub>. Para Syred et al. (2006), quando a madeira é submetida a temperaturas entre 20 e 100 °C, há liberação de vapor de água e absorção de energia e a temperatura se mantém em 100°C, até que toda umidade seja eliminada. Entre 110 e 270 °C, ocorre o início da carbonização, liberando ácido acético, metanol, CO<sub>2</sub> e CO.

Observa-se que na Fase III houve aumento significativo da temperatura interna da fornalha, independente do ponto avaliado e classe de diâmetro, evidenciando que a partir dessa fase inicia a combustão dos gases da carbonização. Isso é acompanhado também em relação as fases anteriores, pelo incremento de temperatura no duto de transporte dos gases da carbonização.

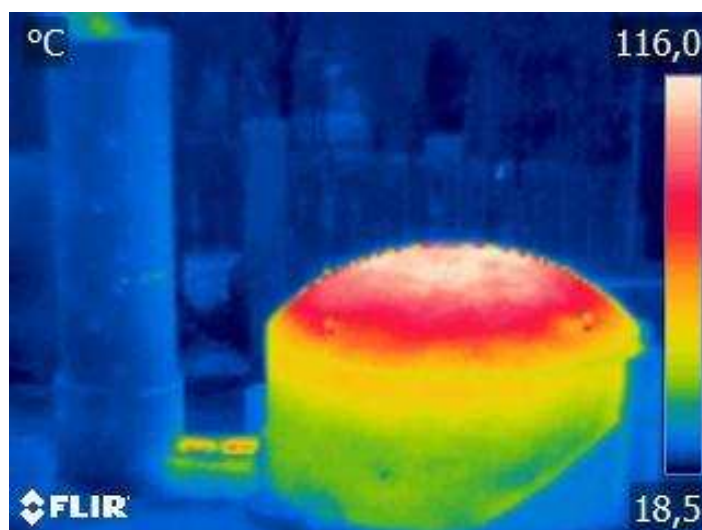
Segundo Rezende (2006) na Fase III da carbonização, com aumento de temperatura do forno ocorre intensificação da decomposição de hemiceluloses e celulose, havendo aumento de perda de massa da madeira e, conseqüentemente, aumento na formação de gases combustíveis.

A combustão dos gases da carbonização se estende até próximo ao final da Fase IV, entre 1 a 2 horas do encerramento do processo. Nessa fase, com temperaturas entre 380 a 400 °C, além da fixação de carbono, ocorre redução gradual na liberação de voláteis, ou seja, na vazão de gases combustíveis.

O tempo total de queima dos gases da carbonização, nas Fases III e IV foi diferente entre as classes de diâmetros de madeira carbonizadas, sendo que a classe de menor diâmetro promoveu maior tempo de queima na Fase III e menor na Fase IV. Essa diferença se deve ao fato de que as carbonizações com toras de menor classe de diâmetro tiveram menor ciclo de carbonização, fazendo com que na Fase III ocorresse maior liberação de gases combustíveis, devido a maior área superficial das toras de menor diâmetro, o que promoveu maior transferência de calor por unidade de tempo e

também pelo maior teor de umidade das toras de maior diâmetro. Segundo Andrade (2000), o calor transferido da superfície para o interior da madeira por condução é dependente de suas propriedades como densidade e permeabilidade, e também de suas dimensões.

Na Figura 5 é apresentada uma imagem termográfica no infravermelho do sistema forno-fornalha avaliado.



**Figura 5** - Imagem termográfica no infravermelho do sistema forno-fornalha.

A temperatura externa média da parede da câmara de combustão da fornalha na fase exotérmica para ambas classes de diâmetro foi de aproximadamente 35°C, enquanto a temperatura interna média no mesmo ponto de medição chegou a aproximadamente 508,32 °C, tendo conseguido isolamento médio de temperatura de mais que 450°C. Isso evidencia a alta inércia térmica da manta e do material construtivo da fornalha, ou seja, a maior parte da energia na forma de calor gerada contribuiu para manter aquecido o seu interior, proporcionando menor consumo de combustível auxiliar para manter a câmara de combustão aquecida. Além disso, a imagem permite visualizar a condução da carbonização, evidenciando maior temperatura na copa do forno em comparação a parte inferior, mostrando que a frente de carbonização avança de cima para baixo, o que é esperado.

Observa-se, ainda, que o consumo total de combustível auxiliar foi de aproximadamente 43,27 kg para as toras de menor diâmetro e de 55,56 kg para as toras de diâmetro maior, o que corresponde a 0,0094 m<sup>3</sup> e 0,0120 m<sup>3</sup> de lenha, respectivamente. Este consumo pode ser considerado, baixo, pois alguns pesquisadores,



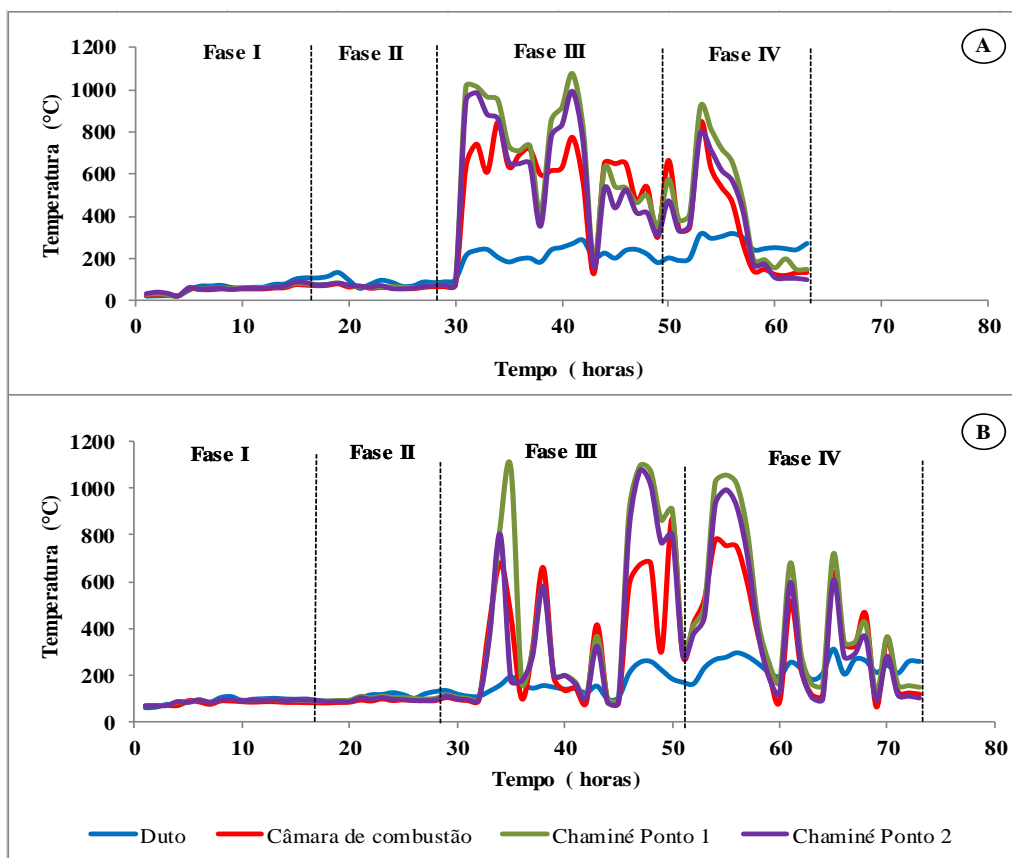
por exemplo, Oliveira (2013) obteve consumo de 100 kg de resíduos durante a terceira fase de carbonização, e Lana (2014) gastou em média 77 Kg de combustível auxiliar por carbonização. Salienta-se que ambos avaliaram a eficiência de queima de uma fornalha acoplada em fornos de superfície com capacidade de 12 st, semelhante ao forno utilizado nesse estudo, tendo como diferencial o material construtivo da fornalha e seu layout.

Vale ressaltar que apesar do consumo de combustível auxiliar ter sido baixo; essa fornalha foi dimensionada para ser acoplada em até 3 fornos de mesmas dimensões do que foi utilizado nesse estudo. Logo, vale a pena mencionar, se a mesma estivesse acoplada a mais fornos funcionando concomitantemente, provavelmente, o consumo desse combustível teria sido ainda menor, tendo em vista que sua câmara de combustão irá receber uma maior vazão de gases, auxiliando na manutenção da chama. Mas, ressalta-se que isso só é válido desde que se faça um correto sincronismo dos fornos.

É importante mencionar que mesmo acoplando mais fornos e sincronizando-os, haverá um consumo de combustível auxiliar para realizar a ignição dos fornos de carbonização, pois esse ocasiona um diferencial de temperatura necessário para gerar pressão manométrica negativa ao longo da chaminé que fará a exaustão dos gases, auxiliando na ignição dos fornos.

### **3.3. Perfil térmico da fornalha**

Na Figura 5 é apresentado o perfil térmico médio da fornalha em função das fases de carbonização e das classes de diâmetro da madeira.



**Figura 5** – Perfil térmico da fornalha: utilizando toras de 7 - 12 cm de diâmetro (A); e toras de 13 - 18 cm de diâmetro (B).

Observa-se na Figura 5 que o perfil térmico da fornalha nas Fases I e II para ambas as classes de diâmetro e nos diferentes pontos de coleta de temperatura, tiveram o mesmo comportamento térmico. Conforme já mencionado, isso se deve ao fato de que nessas duas fases iniciais o processo é endotérmico.

Observa-se que o início da queima dos gases iniciou-se na Fase III, para ambas as classes de diâmetros utilizadas nesse estudo. Essa fase é caracterizada como exotérmica, ou seja, é a partir dela que ocorre a maior liberação de gases de maior poder calorífico, como por exemplo, o CO e CH<sub>4</sub>, que são gases inflamáveis, passando a exercer a função de combustíveis para a combustão no interior da fornalha. Segundo Costa (2012) à medida que a temperatura de carbonização se eleva, reduz-se a vazão de vapor d'água e aumenta a de gases com maior poder calorífico, fornecendo, portanto, gás combustível para o processo de queima. Taccini (2011) menciona que a partir da Fase III do processo ocorre emissão mínima de vapor de água e elevam-se as concentrações de CO e CH<sub>4</sub>.

Um outro indicativo para dar início a combustão dos gases na fornalha é a temperatura dos gases da carbonização, medida no duto de transporte dos gases, pois segundo Cardoso (2010), Costa (2012), Oliveira (2012) e Coelho (2013), quando essa está acima de 100°C, significa que os gases gerados já possuem poder calorífico para manutenção da chama no interior da fornalha, ou seja, existem concentrações de gases combustíveis suficientes para que não seja necessário o abastecimento da fornalha com biomassa, por exemplo.

Observa-se na Figura 5A que o início da queima dos gases para as toras de 7-12 cm de diâmetro ocorreu na trigésima hora da carbonização, permanecendo por período de 26 horas e 20 minutos, correspondendo a 41,79% do tempo total da carbonização. O início da queima dos gases nas carbonizações utilizando as toras de maior diâmetro (Figura 5B) ocorreu na trigésima quarta hora do processo de carbonização e o tempo total de queima dos gases foi de 25 horas e 42 minutos, representando 34,73% do tempo total do processo.

Vale ressaltar que os gases não condensáveis gerados no processo de carbonização são o CO<sub>2</sub>, CO e CH<sub>4</sub>, sendo os dois últimos responsáveis pela combustão. Gerber et al. (2010) mencionam que no processo de pirólise de madeira, sob condições controlada, o CO é um dos principais gás gerado, com concentrações acima de 27 % e o CH<sub>4</sub> apresenta concentrações de no máximo 5 %.

Durante a queima dos gases no interior da câmara de combustão da fornalha foram obtidas temperaturas variando entre 465 a 1037 °C. Segundo Cardoso et al. (2010), este intervalo de temperatura é suficiente para promover a combustão completa do alcatrão, do licor pirolenhoso e dos gases CO e CH<sub>4</sub>, transformando-os em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. Logo, espera-se ter obtido redução destes compostos nas duas últimas fases da carbonização utilizando o sistema forno-fornalha proposto neste trabalho.

Porém, ressalta-se que entre o início da combustão dos gases e o encerramento do processo de carbonização ocorreu algumas interrupções (apagamento da chama da fornalha), como pode ser observado pelas depressões (picos invertidos) na Figura 5, sendo necessário, portanto, realizar abastecimento da fornalha com combustível auxiliar (madeira, casca e/ou atijo) para manter a temperatura adequada na câmara de combustão para continuação da queima dos gases da carbonização. Essa interrupção da chama da fornalha pode ser explicada, pelo menos em parte, pela redução da vazão dos gases combustíveis e/ou pelo empobrecimento da mistura desses gases, por exemplo, com a elevação da concentração de CO<sub>2</sub> e também diluição de oxigênio (O<sub>2</sub>).

Sendo assim, como a concentração dos gases é heterogênea ao longo do processo de carbonização e pela admissão de ar primário da câmara de combustão da fornalha ser realizada manualmente, pode vir a ocorrer um excesso ou deficiência de  $O_2$  necessário para as reações de combustão dos gases advindos do forno. Segundo Coelho (2013), a relação de  $O_2$ /Gás para que ocorra a queima estequiométrica de um gás composto por metano, monóxido de carbono e hidrogênio é de 4:1.

Vale salientar que para aumentar a eficiência de queima dos gases da carbonização em uma fornalha, se faz necessário que a construção da mesma leve em consideração os três princípios da combustão (temperatura, turbulência e tempo) para propiciar uma mistura ar-combustível homogênea, na dosagem ideal e no tempo correto, a fim de permitir o aquecimento do combustível até a sua ignição autossustentável e combustão completa (LOPES, 2002; MELO, 2013).

Ferreira (2004) colabora com os autores acima e ressalta que é necessário conhecer não somente a temperatura de combustão, mas também o tempo de oxidação. Assim, a câmara de combustão deve ser projetada de modo, a permitir uma velocidade adequada de propagação dos gases no seu interior, para obter um tempo mínimo de residência para que ocorra a combustão completa. Conforme pode ser observado na Figura 2, a fornalha utilizada neste estudo foi projetada com esse intuito, tendo um estreitamento do diâmetro logo acima da câmara de combustão, visando, portanto, aumentar o tempo de residência dos gases, favorecendo assim, o aumento na eficiência de queima dos mesmos e, conseqüentemente, diminuição de consumo de combustível auxiliar.

No entanto, observa-se que o perfil térmico da fornalha utilizando toras de maior diâmetro, a carbonização teve um maior número de interrupções da fornalha quando comparado com as carbonizações utilizando toras de menor diâmetro. Alguns fatores podem ter contribuído para esse fator, dentre os quais destaca-se o maior teor de umidade das toras, o que ocasiona uma maior heterogeneidade na composição dos gases e, conseqüentemente, diminuição da vazão de gases combustíveis, além de demandar maior controle do processo de carbonização para manter a temperatura média do forno de acordo com as faixas teóricas estabelecida para este trabalho (Tabela 1). Pois, no momento em que ocorre a queima dos gases da carbonização se tem um aumento médio de temperatura do forno em aproximadamente  $40^\circ C$ , logo se faz necessário a intervenção do carbonizador no fechamento parcial ou total dos “Tatus” para a correta

condução do processo, evitando que ocorresse degradação desnecessária da madeira, comprometendo o rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal.

Sendo assim, para evitar interrupções na queima de gás na câmara de combustão é necessário que mais fornos de carbonização sejam acoplados numa mesma fornalha, mínimo de quatro, de forma que se consiga fazer o sincronismo entre eles, a fim de garantir o suprimento adequado de uma mistura de gases inflamáveis no interior da câmara de combustão da fornalha, mantendo a autocombustão e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de combustível auxiliar. Faz-se necessário, também, o controle da temperatura interna da câmara de combustão, pois verificou-se que temperaturas inferiores a 700 °C não propiciou a manutenção da chama, sendo necessário o uso de materiais combustíveis para aumentar a temperatura da mesma; enquanto que temperaturas superiores a 1100 °C não são recomendadas, pois diminuem a vida útil da manta cerâmica e dos tijolos utilizados na construção do sistema.

Observa-se, também, que a temperatura da chaminé no ponto 1 (1,85 m de altura) ficou acima das obtidas na câmara de combustão e também do ponto 2 da chaminé. Sendo assim, pode se dizer que na chaminé no ponto 1 foi a seção da fornalha que ocorreu a maior concentração das reações de oxidação dos gases. Isto pode ser explicado pelo fato de que o tempo de residência dos gases da carbonização na câmara de combustão da fornalha não foi o suficiente para promover a combustão completa dos mesmos na câmara de combustão.

Na literatura ainda não há trabalhos específicos sobre tempo de residência dos gases da carbonização na câmara de combustão da fornalha para oxidação completa. No entanto, existem alguns trabalhos referentes ao tempo de residência dos gases em câmara de combustão de incineradores para resíduos perigosos. Segundo Lin et al. (2012), o tempo de residência recomendado para câmaras de incineração de resíduos perigosos, cuja queima pode liberar organoclorados, ácidos, entre outros compostos, é de dois segundos.

Segundo Pereira et al. (2016), o dimensionamento de uma câmara de combustão cujo o tempo de residência dos gases é subestimado ou superestimado pode resultar em uma queima ineficiente ou despesas desnecessárias na construção dos sistemas.

Logo, pode-se dizer que neste trabalho que o fato da temperatura no interior da câmara de combustão ter sido inferior aos obtidos na chaminé, mostra que o tempo de residência dos gases foi inferior a 2 segundos, fazendo com que a sua queima ocorresse

ao longo da chaminé, indicando que o projeto do sistema forno-fornalha precisa ser melhorado.

#### 4. Conclusões

A fornalha teve bom desempenho para a combustão dos gases da carbonização, independentemente da classe de diâmetro avaliada, tendo funcionado em aproximadamente 42% do tempo total de carbonização nos testes que utilizaram toras de 7-12 cm de diâmetro e aproximadamente 35% para os testes com toras de 13-18 cm.

O gasto de combustível auxiliar para abastecimento da câmara de combustão foi considerado pequeno para ambas as classes de diâmetro avaliadas.

A estrutura da fornalha se mostrou adequada, pois atendeu as condições do processo de combustão, apresentando bom isolamento térmico, sem problemas em sua estrutura, tendo como principais vantagens o seu baixo custo e facilidade de construção.

A determinação do perfil térmico do forno em função da classe de diâmetro da madeira, além de permitir observar a evolução da temperatura em seu interior ao longo do processo, auxilia também em sua operação assim como no planejamento das praças de carbonização.

A determinação do perfil térmico da fornalha permitiu o reconhecimento de algumas falhas de dimensionamento da câmara de combustão, além de ter indicado a evolução da temperatura em seu interior ao longo do processo, auxiliando em sua operação.

#### 6. Referências

ANDRADE, A., 2000. **Indicação de programas para a secagem convencional de madeiras**. Piracicaba, 72f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz" /Universidade de São Paulo.

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELLOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. 2010. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 115-124, 2010.

CARDOSO, M. T. **Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira**. 2010. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 2010.

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.

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.

FERREIRA, W.P.M. **Avaliação de uma fornalha a carvão vegetal para aquecimento de aviário.** 2004. 134f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

FUJIHARA, M. A.; GOULART, L. C.; MOURA, G. Cultivated Biomass for Pig Iron in Brazil. In: Silveira S, editor. **Bioenergy – Realizing the Potential.** 2005, pp. 189-199.

GERBER, S.; BEHRENDT, F.; OEVERMANN, M. “An Eulerian modeling approach of wood gasification in abubbling fluidized bed reactor using char as bed material”. **Fuel.** 2010, Vol. 89, pp. 2903-2917.

IBÁ. INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Anuário Estatístico 2016, ano base 2015. Brasília, 2016. 100p.

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.

LIN, HAI.; MA, XIAOQIAN. Simulation of co-incineration of a sewage sludge with municipal solid waste in a grate furnace incinerator. *Waste Management.* 2012, 32, pp. 561-567.

LAW, C. K. **Combustion Physics.** Cambridge University press, 2006. 347p.

LOPES, R.P. **Desenvolvimento de um sistema gerador de calor com opção para aquecimento direto e indireto de ar.** 2002. 220f. Tese D. Sc. – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2002.

MELO, I. C. N. A. **Caracterização tecnológica da madeira e do carvão vegetal em clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.** 2013. 104f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2013.

MCHENRY, M. P. Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk. *Agriculture, Ecosystem and Environment.* 2009, Vol. 129, pp. 1-7.

NUTEC IBAR Fibras cerâmicas Ltda. **Folha de dados técnicos – Produto: manta de fibra cerâmica HT,** Póá, São Paulo, 2007. <Disponível em: <http://www.nutecibar.com.br/pdf/6003.PDF>>. Acesso em: 01/02/2017.

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

OLIVEIRA A.C, CARNEIRO A.C.O, PEREIRA BLC, VITAL BR. CARVALHO A.M.M.L, TRUGILHO P. F. et al. Optimization of charcoal production through control of carbonization temperatures. *Rev Árvore* 2013;37:557–66.

PEREIRA, E. G.; MARTINS M. A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A. C. O.; Pyrolysis gases burners: Sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews (2016)**.

ROZAS M. E. C. **Modelo de Transferência de Calor e Massa na Secagem de Madeira Serrada de Pinus**. Tese de doutorado, Engenharia Florestal da UFPR, Curitiba, PR, 2007.

SYRED C, GRIFFITHS AJ, SYRED N, BEEDIE D, JAMES D. A clean, efficient system for producing Charcoal, Heat and Power (CHaP). *Fuel* 2006; 85:1566–78.

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 MSc. Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 2011.

YANG, YONGXIANG, REUTER, MARKUS A.; HARTMAN, DERK T. M. CFD Modelling for control of hazardous waste incinerator. *Control Engineering Practice*. 2003, 11, pp. 93-101.



### CAPÍTULO III

#### REDUÇÃO DE METANO E MONÓXIDO DE CARBONO NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL EM SISTEMA FORNO-FORNALHA

**RESUMO** – A maior parte da produção de carvão vegetal atualmente no Brasil é proveniente de pequenos e médios produtores, sendo a condução do processo de carbonização realizado de forma empírica e também sem nenhum mecanismo de controle das emissões. Especialmente em relação as emissões, vale salientar que uma grande parcela desses gases são compostos pelo gás metano, causador do efeito estufa e 25 vez mais poluente que o dióxido de carbono e pelo monóxido de carbono. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi avaliar a redução de gases de efeito estufa na produção de carvão vegetal em sistema forno-fornalha. Para proceder à combustão dos gases foi utilizado uma fornalha acoplada a um forno circular de alvenaria. Os gases foram coletados em dois pontos distintos, sendo o primeiro no duto de transporte dos gases da carbonização para fornalha, próximo ao forno, e o segundo a 80% (3,20 metros) da altura total da chaminé, de modo, a obter as concentrações antes e após a queima dos gases. A fornalha avaliada neste estudo proporcionou redução média na emissão de gases poluentes ao longo da fase exotérmica do processo de carbonização de 66,5% para o CO e de 70% para o gás CH<sub>4</sub>. A queima dos gases da carbonização no sistema forno-fornalha avaliado resultou na redução total de 244,65 kg de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e), obtido a partir de 3,2 toneladas de massa seca de madeira enforada. A redução desses gases por meio de sua combustão em fornalhas representa uma importante contribuição na mitigação de gases de efeito estufa, além de melhorar consideravelmente as condições de trabalho.

**Palavras-Chave:** Carbonização da madeira; tempo de residência; combustão.

## CHAPTER III

### REDUCTION OF GREENHOUSE GASES IN THE PRODUCTION OF VEGETABLE CHARCOAL IN FURNACE OVEN SYSTEM

**ABSTRACT** – Most of the charcoal production currently in Brazil comes from small and medium producers, and the conduction of the carbonization process is carried out empirically and also without any emission control mechanism. Particularly in relation to emissions, it is worth noting that a large proportion of these gases are composed of methane gas, which causes the greenhouse effect and is 25 times more polluting than carbon dioxide and carbon monoxide. In this sense, the objective of this work was to evaluate the reduction of greenhouse gases in the production of charcoal in Kiln-furnace system. A furnace coupled to a circular masonry furnace was used to burn the gases. The gases were collected at two different points, the first one being in the carbonization duct near the furnace, and the second at 80% (3.20 meters) of the total height of the chimney, in order to obtain The concentrations of the gases before and after their burning. The furnace evaluated in this study provided a mean reduction in the emission of pollutant gases throughout the exothermic phase of the carbonization process from 66.5% to CO and 70% to CH<sub>4</sub> gas. The burning of the carbonization gases in the Kiln-furnace system evaluated resulted in a total reduction of 244.65 kg of CO<sub>2</sub> equivalent emissions, obtained from 3.2 tonnes of dry mass of wood encased. The reduction of these gases through their combustion in furnaces represents an important contribution to the mitigation of greenhouse gases, as well as considerably improving working conditions.

**Keywords:** Carbonization of wood; residence time; combustion.

## 1. Introdução

A maior parte produção de carvão vegetal produzido atualmente no Brasil é por pequenos e médios produtores, utilizando fornos rudimentares de baixo rendimento e sem controle de emissões atmosféricas, causando impactos econômicos, sociais e principalmente ambientais. Porém, esses impactos podem ser minimizados por meio de tecnologias que melhore o rendimento gravimétrico e/ou por sistemas que capturam os gases emitidos, ou até mesmo incinerando-os.

No entanto, boa parte das tecnologias que estão sendo desenvolvidas, são de custos elevados e voltada, na sua maioria, para as grandes empresas. Sendo assim, é imprescindível o desenvolvimento de fornos com tecnologias de baixo custo de aquisição e que possibilitem o aumento no seu rendimento, além de proporcionar, por exemplo, a queima dos gases durante o processo, reduzindo as emissões de gases nocivos ao meio ambiente, como o monóxido de carbono (CO) e o metano (CH<sub>4</sub>), que além de gerar um ambiente menos insalubre, tem a possibilidade de se realizar o aproveitamento da energia térmica gerada nesse processo para várias aplicações como, por exemplo, na secagem da madeira.

Segundo Van ELK (2010) a queima dos gases da carbonização, além de ser vantajoso ao meio ambiente, pode se tornar economicamente viável pela possibilidade de gerar projetos de créditos de carbono, pois há nesse processo redução da emissão, principalmente, de metano, que é cerca de 25 vezes mais nocivo que o dióxido de carbono para o efeito estufa.

Sendo assim, com a crescente preocupação mundial com a redução de gases de efeito estufa (GEE) frente ao aquecimento global, o segmento de produção de carvão vegetal no Brasil, provavelmente contribuirá para a redução de emissões de gases poluentes por meio de sua queima em fornalhas acopladas aos fornos, principalmente se essas tecnologias estiverem acessíveis economicamente a pequenos e médios produtores, que correspondem por mais de 50% deste segmento, que gerou em 2014 aproximadamente por 5,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub> e).

Logo, torna-se indispensável a adoção de mecanismo que visem reduzir as emissões de GEE no segmento com vistas a colaborar com o compromisso assumido pelo governo brasileiro, em 2016, na 22ª Conferência das Partes sobre Mudança do Clima (COP 22), cuja meta é reduzir 37% das emissões de carbono até o ano de 2025.

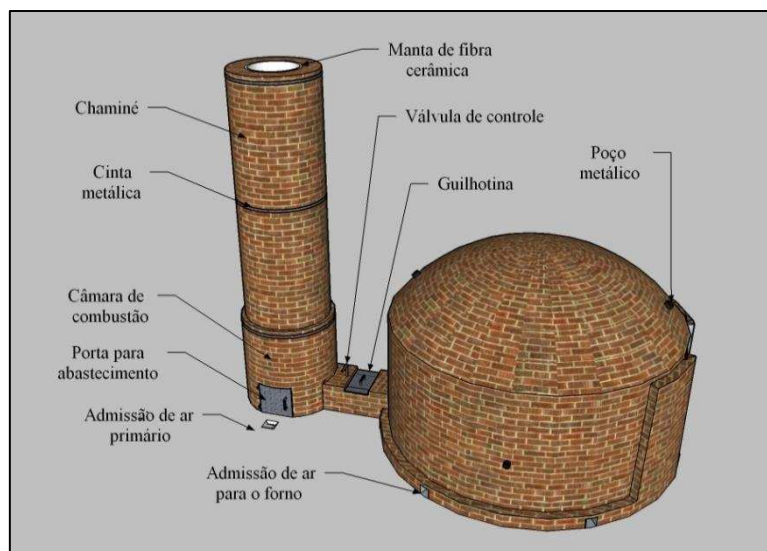
Assim, com a crescente preocupação mundial com a mudança global do clima, a redução de emissões atmosféricas do processo de carbonização por meio da combustão dos gases resultantes do processo, torna-se um importante ativo do segmento, pois passa a ser um diferencial de competitividade para os produtos siderúrgicos brasileiros, além de alcançar, de forma efetiva, a sustentabilidade no setor, visto que a queima dos gases é uma rota alternativa para reduzir as emissões de gases poluentes gerados na carbonização da madeira, conseqüentemente reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente.

Nesse sentido, o objetivo principal desse trabalho foi avaliar a redução de metano e monóxido de carbono emitidos na carbonização da madeira por meio da sua queima em fornalha de alvenaria. Os objetivos específicos foram: quantificar as concentrações dos gases não condensáveis em cada fase da carbonização; avaliar o comportamento das emissões dos gases em função do tempo de carbonização e; correlacionar as emissões dos gases em função da temperatura de carbonização.

## **2. Material e Métodos**

Este trabalho foi desenvolvido na unidade de pesquisa de produção de carvão vegetal do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM, da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa – MG.

Para realizar este estudo foi utilizado um forno circular de alvenaria ao qual foi acoplado uma fornalha para queima dos gases da carbonização. Optou-se por esse tipo de forno para receber a fornalha por ser de baixo custo, fácil construção e bastante difundido entre os pequenos e médios produtores de carvão vegetal, principalmente no Estado de Minas Gerais. Na Figura 1 é apresentada uma vista em perspectiva do sistema construído.



**Figura 1** - Vista em perspectiva do sistema forno-fornalha de alvenaria.

## 2.1. Construção do forno

O forno com capacidade volumétrica de 12 st, aproximadamente 8,5 m<sup>3</sup> de madeira, foi construído com tijolos maciços cerâmicos e revestido externamente por uma argamassa especial de areia lavada, cimento, argamassa refratária, cal virgem, açúcar e água, com o objetivo de reduzir possíveis entradas de ar e perdas térmicas e também aumentar a sua durabilidade. Ao nível do solo e do piso, foram feitas seis aberturas, conhecida popularmente como “Tatu”, cujas dimensões foram de 10 x 15 cm, as quais estão uniformemente distribuídas no perímetro do forno para admissão de ar. A abertura e o fechamento dessas entradas controlavam a admissão de ar no sistema e, conseqüentemente, as temperaturas do forno, auxiliando na carbonização.

A porta do forno foi construída em formato trapezoidal, com base maior de 90 cm, base menor de 70 cm e altura de 150 cm. Em sua aresta superior uma cantoneira metálica em formato de “U” foi fixada, para garantir sustentação e durabilidade.

Uma cinta metálica de 3/8 polegada foi instalada ao redor do forno, externamente, em sua primeira fileira de tijolos da cúpula, dando estabilidade ao forno às pressões internas dos gases durante a carbonização e às forças gravitacionais incidentes sobre a copa.

Para o controle da carbonização foram inseridos oito poços metálicos (cilindros metálicos com fundo fechado): quatro localizados na copa a 1,70 m e quatro laterais a 60 cm em relação ao solo, distribuídos entre as aberturas para admissão de ar. Para medir as temperaturas do forno, utilizou-se um sensor de infravermelho, pirômetro,

marca Minipa modelo “MT-350”, com capacidade de medir temperaturas entre 30 e 550°C.

## **2.2. Construção da fornalha**

### **2.2.1. Construção da câmara de combustão**

A câmara de combustão da fornalha foi construída em alvenaria com formato cilíndrico e altura de 100 cm, diâmetro interno de 65 cm e externo de 110 cm. Foi construída de tijolos maciços de cerâmica e uma mistura de argamassa de argila, açúcar e cimento, em parede dupla, com revestimento interno em manta cerâmica para melhorar o isolamento térmico do meio externo.

A manta cerâmica utilizada foi NAUTEC IBAR HT, com espessura média de 2” (5,08 cm), constituída de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (52 a 54%),  $\text{SiO}_2$  (44 a 48%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,1 a 0,2%),  $\text{TiO}_2$  (0,1 a 0,2%). As mantas foram fixadas no interior da fornalha por meio de pinos metálicos em formato de “L”.

As propriedades da manta são: Limite máximo de uso a 1.482°C, limite contínuo de uso a 1.380 °C, ponto de fusão a 1760°C, diâmetro da fibra de 2,5 $\mu$ , comprimento da fibra 178 mm e contração linear de 2,0% a 1.300 °C por 24 horas (NUTECIBAR, 2007). Além de isolar termicamente a manta aumenta a eficiência do processo de combustão, assim como a vida útil da fornalha.

Na lateral da câmara de combustão foi instalada uma janela basculante metálica revestida internamente por manta cerâmica, de 40 x 40 cm, para alimentação de combustível auxiliar (resíduos lignocelulósicos), responsável por aquecer a câmara de combustão e proceder à ignição dos gases advindos da carbonização.

No centro da base da fornalha foi instalada uma grelha metálica de 15 x 15 cm, responsável pela admissão de ar primário para o interior da fornalha, advindo do meio externo, através de um duto subterrâneo de seção quadrangular, construído em tijolos cerâmicos comuns e argamassa de areia e argila, com 90 cm de comprimento e 15 cm de altura. Na extremidade do duto utilizou-se uma chapa metálica (dimensões de 25 cm de comprimento por 15 cm de largura) para controle da entrada de ar atmosférico para fornalha, localizada a 30 cm externamente à porta de admissão de combustível auxiliar.

Logo após a construção da câmara de combustão da fornalha foi feito um estrangulamento de 15 cm de diâmetro para aumentar o tempo de residência dos gases da carbonização na câmara de combustão e conseqüentemente aumentar a eficiência de combustão dos mesmos.

### 2.2.2. Construção da chaminé da Fornalha

A chaminé foi construída sobre a câmara de combustão, logo após o “estrangulamento” do diâmetro da câmara. A chaminé foi construída em alvenaria, com 55 cm de diâmetro interno e altura total de 4 m. Assim como a câmara de combustão da fornalha, a sua chaminé também foi construída com parede dupla e revestida internamente por manta cerâmica.

### 2.3. Construção do duto de transporte dos gases até a fornalha

O duto de transporte dos gases da carbonização do forno até a fornalha foi construído com tijolos maciços, em camada simples (10 cm de espessura) e assentados com argamassa.

O duto para condução dos gases possuía 38 cm de altura por 38 de largura e 70 cm de comprimento. Em sua perpendicular (35 cm da entrada da fornalha) foi inserido um tubo de cobre de 0,5 cm de diâmetro, para inserção do termopar do tipo “k” para obtenção da temperatura de saída dos gases.

O controle da vazão dos gases da carbonização para a fornalha foi realizado por meio da válvula borboleta, operada manualmente, instalada ao centro do duto, aproximadamente a 40 cm de distância da parede do forno (Figura 1).

### 2.4. Carbonização da madeira

Para as carbonizações utilizou-se madeira de *Eucalyptus* sp., com idade aproximada de 6 anos, comprimento de 1,5 m e classe de diâmetro de 13 - 18 cm, apresentando umidade média de 39,35%. Foram realizadas duas carbonizações.

As carbonizações foram conduzidas utilizando as faixas teóricas de temperatura obtidas na copa do forno, conforme proposto por Oliveira et al. (2013) para madeira com teor de umidade entre 30 e 40% (Tabela 1).

**Tabela 1** – Faixas teóricas de temperatura para controle da carbonização da madeira.

Fase	Faixa de Temperatura	Tempo de Temperatura
I	100 – 150 °C	15 – 16 horas
II	150 – 270 °C	11 – 12 horas
III	270 – 380 °C	23 – 24 horas
IV	380 – 400 °C	17 – 18 horas

O processo de carbonização foi realizado monitorando-se a temperatura do forno, a qual foi controlada pelas entradas de ar (“tatu”) e pelo acionamento da válvula borboleta instalada no duto de ligação do forno com a fornalha.

As temperaturas do forno foram monitoradas a partir de oito poços metálicos, utilizando-se um sensor infravermelho de temperatura, pirômetro, marca Minipa, modelo “MT-350, com intervalo de medição de 30 °C a 550 °C.

O término da carbonização foi determinado pela chegada da frente de carbonização nos últimos controladores de ar do forno (“tatu”) localizados mais próximos da saída de gases para o duto. Após o fechamento dos “tatus” e constatada a redução do volume dos gases da carbonização na saída da chaminé, realizou-se a completa vedação do forno, que se deu com auxílio de uma guilhotina de chapa de ferro de 35 x 30 cm e 3 mm de espessura, fixada entre o local de saída de gases do forno e o início do duto de transporte dos gases da carbonização. A guilhotina foi instalada de modo a ser guiada por duas cantoneiras laterais de ferro, e após esse procedimento iniciou-se o processo de resfriamento do forno.

## **2.5. Coleta e caracterização dos gases**

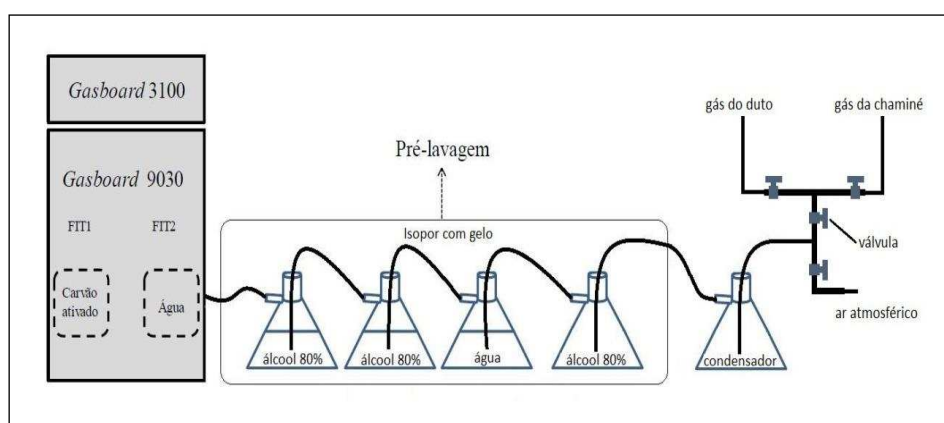
Os gases foram coletados em dois pontos distintos, sendo o primeiro no duto de transporte dos gases da carbonização para fornalha, próximo ao forno, para evitar interferências da combustão da fornalha, e o segundo a 80% (3,20 metros) da altura total da chaminé, para evitar efeito do ambiente externo na composição dos gases, respectivamente, para ter as concentrações dos gases antes e após a queima dos mesmos.

Para efetuar a coleta dos gases foram inseridos tubos de cobre até a metade do diâmetro interno tanto do duto quanto da chaminé. A coleta de gases foi realizada em intervalos regulares de 90 minutos, sendo que o intervalo de tempo de leitura para cada ponto de coleta foi de 10 minutos consecutivos, com 10 minutos de intervalo entre cada ponto de leitura, a fim de limpar as tubulações do sistema de limpeza de gases e do analisador *gasboard* com ar de modo, a evitar possíveis interferências entre as leituras dos diferentes pontos de coleta. Utilizou-se um sistema de válvulas para alternar o fluxo de gases do duto e da chaminé, o que permitiu que a concentração dos gases nos dois pontos fosse obtida em intervalos muito próximos.

Os gases foram succionados por uma bomba peristáltica de funcionamento contínuo a uma vazão média de sucção de 1L/minuto, e transportados até o sistema de



pré-lavagem, constituído por cinco frascos de kitassato em linha, dentro de uma caixa de isopor. Os frascos foram parcialmente submersos em gelo, para diminuição da temperatura, a fim de reter a fração condensável dos gases. O gás percorria uma mangueira que transpassava centralmente a tampa de silicone de cada frasco e submergia no fluido no seu interior. Sua saída se dava pelo bico de abertura lateral do kitassato (que funcionaram como frascos do tipo drechsel), seguindo assim para o próximo frasco e por último para o analisador de gás (Figura 2).



**Figura 2** - Sistema de lavagem, condicionamento e análise dos gases. Fonte: Adaptado de Lana (2014).

O primeiro kitassato vazio foi utilizado somente para condensação dos gases, o segundo para lavagem dos gases em álcool a 80%, o terceiro para lavagem em água e o quarto e quinto para lavagem em álcool 80%, novamente.

Após a pré-lavagem, os gases não condensados foram conduzidos até o sistema de condicionamento de gases do analisador *gasboard 9030 Wuhan CUBIC Optoelectronics Co. Ltda.*, no qual passaram por uma lavagem em água, resfriamento a 4°C em um desumidificador (*chiller*) e posteriormente por um cilindro contendo carvão ativado e algodão. Em seguida, procedeu-se à última limpeza dos gases por meio de filtros de precisão, denominados FIT1 e FIT2, os quais retêm impurezas menores que 3 e 1µm, respectivamente. Depois os gases foram admitidos pelo sistema *online* de análise de gás *gasboard 3100 Wuhan CUBIC Optoelectronics Co. Ltda.*, que forneceu leituras da composição porcentual, base volume, de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, além do poder calorífico dos gases em kcal/NM<sup>3</sup>.

As concentrações médias dos principais gases não condensáveis do processo de carbonização, como o metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono

(CO) e oxigênio (O<sub>2</sub>), serão apresentadas a partir das emissões médias em intervalos de 6 em 6 horas até o término do processo.

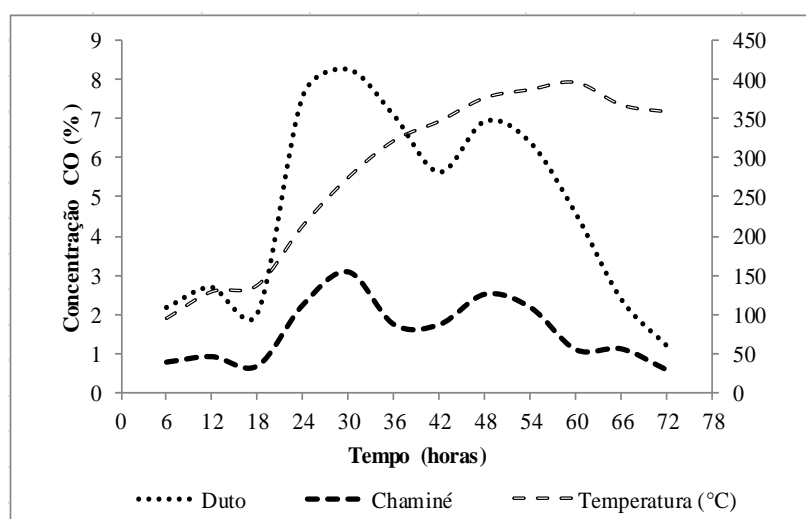
## 2.6. Delineamento experimental

Foi avaliado o efeito da temperatura na concentração e poder calorífico dos gases não condensáveis da carbonização ao longo do processo. Para determinar as correlações existentes entre as temperaturas do forno e a taxa de emissão dos gases ao longo do processo de carbonização, foi empregado o coeficiente de correlação de Pearson, considerando-se o nível 95% de probabilidade. Para as correlações que se mostraram significativas, foram feitas análises de regressões, para quantificar a relação entre essas variáveis, levando em consideração o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), a significância da regressão pelo teste F e a significância dos coeficientes pelo teste t.

## 3. Resultados

### 3.1. Perfil das emissões médias dos gases da carbonização em função do tempo

Na Figura 3 é apresentada a concentração média do gás monóxido de carbono (CO) ao longo do processo de carbonização.



**Figura 3** - Concentração média de monóxido de carbono em função do tempo de carbonização.

Observa-se, de forma geral, que os valores médios de monóxido de carbono, no duto, aumentaram ao longo da fase endotérmica. Verificam-se três picos, sendo o primeiro após 12 horas do início da carbonização, seguido de redução até a décima

sétima hora, e voltando aumentar, consideravelmente, sua concentração, atingindo a porcentagem máxima na vigésima oitava hora, e novamente teve uma redução voltando a aumentar sua concentração com o terceiro pico na quinquagésima segunda hora.

Ressalta-se que o primeiro pico da concentração do CO, é devido às combustões incompletas da madeira dentro do forno, principalmente nas regiões próximas aos “tatus” nas etapas endotérmicas do processo de carbonização e essas por sua vez quando acontecem, ocasionam uma maior degradação da madeira e, conseqüentemente, gerou maior volume de gases, elevando os níveis CO. Após a décima oitava hora da carbonização houve aumento pronunciado na concentração de CO, caracterizado pelo aumento da temperatura do processo, acompanhado também pela degradação das hemiceluloses e celulose (Fases 1 e 2 da carbonização).

Yang et al. (2007) corroboram com o comportamento da concentração do CO obtido nas fases iniciais do processo, pois de acordo com os autores, as ramificações presentes nas hemiceluloses são facilmente removidas da cadeia principal e degradam-se em compostos voláteis, como CO, CO<sub>2</sub> e alguns hidrocarbonetos, principalmente na faixa de temperatura de 150 a 275°C.

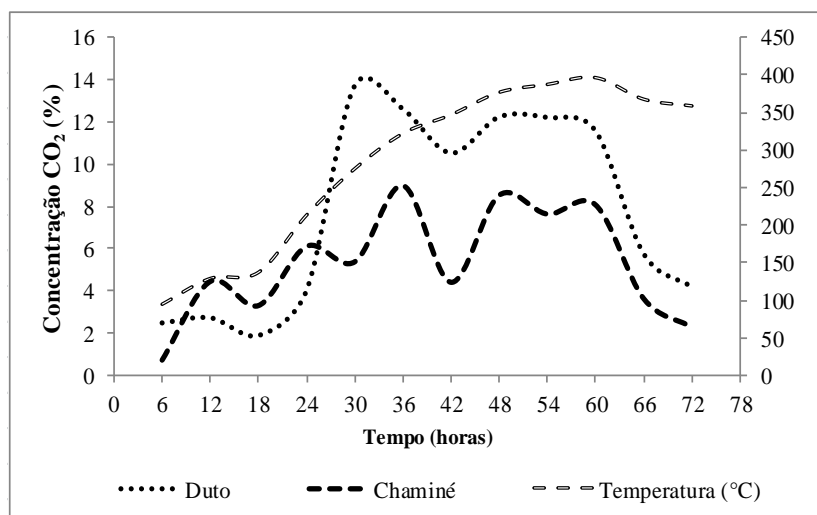
Costa (2012) avaliando a composição dos gases não condensáveis ao longo da carbonização, verificou o mesmo comportamento para o gás CO, ou seja, um aumento significativo na concentração a partir dos 200°C, atingindo um pico máximo aos 300°C (12% CO). Depois verificou-se um novo pico, porém de menor magnitude aos 400°C.

Becidan et al. (2007), também, encontraram o mesmo comportamento e atribuíram a maior participação de CO<sub>2</sub> e CO na composição dos gases não condensáveis da carbonização e sua tendência de decréscimo ou estabilização a altas temperaturas, ao fato de serem os principais produtos da degradação da celulose e das hemiceluloses, principais componentes da biomassa que se decompõem quase totalmente em temperaturas inferiores a 400°C.

Ressalta-se que a celulose, por ser o constituinte presente em maior percentual na madeira, tem na fase de sua degradação (Fase 3) uma maior duração, em torno de 24 horas para o sistema avaliado, com temperaturas variando de 270 a 400°C, correspondendo a aproximadamente 34% do tempo total de carbonização. De acordo com Taccini (2011), a partir da Fase 3 da carbonização ocorrem as principais reações exotérmicas do processo, havendo elevada liberação de CO, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>.

Verifica-se que a concentração de CO diminui consideravelmente, ao final do processo de carbonização, devido a redução dos produtos voláteis presentes na massa de carvão resultante.

Na Figura 4 é apresentada a concentração média do gás dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).



**Figura 4** - Concentração média de dióxido de carbono em função do tempo de carbonização.

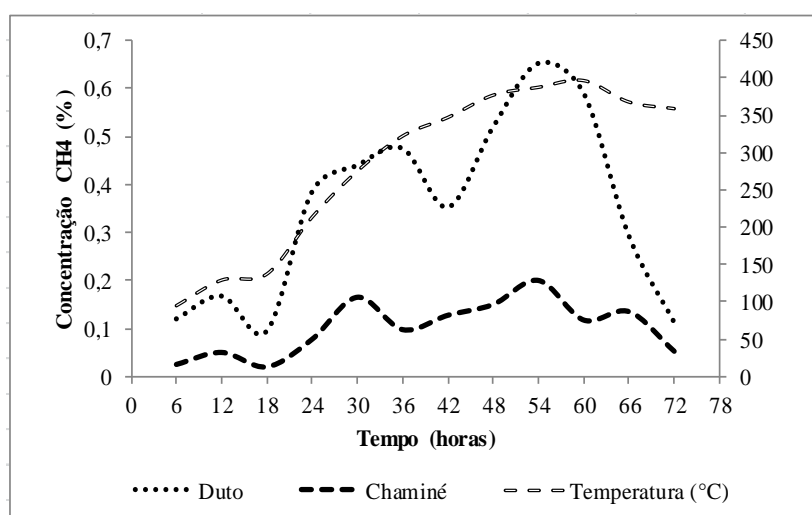
Observa-se que a concentração média de  $\text{CO}_2$ , na chaminé, no início da carbonização foi superior a do duto. Provavelmente, isso se deve ao abastecimento inicial da fornalha, com combustível auxiliar, aproximadamente 5 Kg de madeira, necessários para aquecer a câmara de combustão para gerar um diferencial de temperatura entre a fornalha e o forno, o que acarreta uma pressão manométrica negativa ao longo da chaminé para promover a exaustão dos gases da carbonização de dentro do forno, auxiliando, portanto, na sua ignição.

Verifica-se que a concentração deste gás no duto tem aumento expressivo ao longo da carbonização atingindo um pico máximo na trigésima segunda hora do processo a uma temperatura média do forno de  $302^\circ\text{C}$ . Tihay e Gillard (2010), estudando a correlação entre a queda da concentração de ligações  $\text{C}=\text{O}$  e o aumento da emissão de  $\text{CO}_2$ , identificaram que o primeiro pico de emissão do  $\text{CO}_2$  ocorre em torno de  $300^\circ\text{C}$ , e é decorrente da quebra de grupos  $\text{C}=\text{O}$  e ligações  $\text{C}-\text{O}$ . Segundo Yang et al. (2007), as hemiceluloses são os principais constituintes da madeira que contribuem

na emissão de CO<sub>2</sub>. Ressalta-se que a maior parte da degradação destes constituintes ocorre na faixa de temperatura de 150 a 270 °C.

A partir da vigésima quinta hora de carbonização a concentração média de CO<sub>2</sub> do duto foi superior a da chaminé, sendo que era esperado o inverso, visto que quando se inicia a combustão dos gases da carbonização, esses são oxidados a CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e energia na forma de calor. Esses valores, provavelmente, se devem a uma maior admissão de ar primário para a câmara de combustão, fazendo com que ocorresse uma diluição do CO<sub>2</sub> pelo ar atmosférico.

Na Figura 5 é apresentada a concentração média do gás metano (CH<sub>4</sub>) ao longo do processo de carbonização.



**Figura 5** – Concentração média de metano em função do tempo de carbonização.

Observa-se a ocorrência de três picos na curva de concentração do CH<sub>4</sub> ao longo da carbonização, sendo que o primeiro ocorre na fase endotérmica do processo e os demais na exotérmica. Em relação a primeiro pico da concentração de CH<sub>4</sub>, pode-se dizer que provavelmente foi devido às combustões parciais dentro do forno, uma vez que neste intervalo de tempo, o processo se encontra na fase de secagem, onde ocorre praticamente a liberação CO<sub>2</sub> e vapor d'água.

A partir da décima oitava hora de carbonização, observa-se um incremento na concentração de CH<sub>4</sub> até a trigésima quarta hora do processo, a uma temperatura do forno de aproximadamente 330 °C.

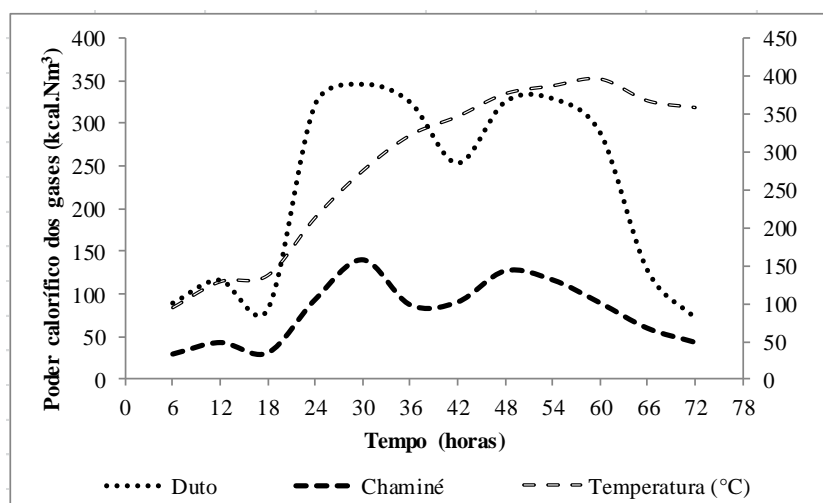
Segundo Gonzalez et al. (2003) a concentração média dos gases não condensáveis ao longo do processo de carbonização exibe perfil com 2 picos máximos

de emissão, ou um pico máximo seguido por outro menor, ou ainda pequenas emissões ao longo do processo.

O pico máximo da concentração de  $\text{CH}_4$  ocorreu após 55 horas do processo, onde a temperatura média do forno encontrava-se a aproximadamente  $420\text{ }^\circ\text{C}$ , evidenciando que a temperatura final exerce forte influência na taxa de emissão desse gás. Segundo Wang et al. (2009); Fu et al., (2010); Yang et al., (2007) e Tihay (2010), a temperatura final do processo de carbonização é o principal fator responsável pela emissão do gás metano.

Observa-se também, que a partir da trigésima hora do processo, caracterizado pelo início da combustão dos gases da carbonização, a concentração média desse gás no duto não seguiu o mesmo comportamento que a curva das concentrações da chaminé. Este fato pode ser explicado por prováveis apagamentos da câmara de combustão da fornalha, ocasionado pelas variações na concentração e vazão dos gases inflamáveis advindos do forno, ou até mesmo pelo seu limite de inflamabilidade. Segundo Pizzuti et al. (2016), os gases combustíveis queimam apenas quando a sua percentagem em volume está entre os limites (inferior e superior) de inflamabilidade para uma determinada temperatura e condição de pressão. De acordo com Law (2006), os limites de inflamabilidade do  $\text{CH}_4$  variam entre 5 e 15%.

Na Figura 6 é apresentado o poder calorífico dos gases ao longo do processo de carbonização.



**Figura 6** - Poder calorífico médio dos gases em função do tempo de carbonização.

Observa-se que a curva do poder calorífico dos gases não condensáveis da carbonização seguiu o mesmo perfil das curvas dos gases CO e CH<sub>4</sub>, ocorrendo o primeiro pico depois de 12 horas do processo, seguido por um aumento gradativo até atingir o pico máximo na trigésima hora, e logo após esse período ocorreu um declínio atingindo um pico invertido após a 41ª hora do processo de carbonização. Isso se deve pelo fato de que os gases mencionados acima serem inflamáveis, logo o aumento de suas concentrações ocasionou a elevação do poder calorífico dos gases, e vice versa.

De modo geral, o tempo de carbonização tem uma relação direta com o aumento da concentração dos gases e esses por sua vez apresentam ao longo do processo oscilações de suas concentrações, o que faz com que o poder calórico tenha a mesma tendência, visto que processo de carbonização não ocorre de forma simultânea, e sim no sentido da porta para o fundo do forno e de cima para baixo. Logo, a concentração e vazão desses gases são heterogêneas, ocasionando, portanto, variação em seu poder calorífico, conforme pode ser observado na Figura 6.

Observa-se que na saída da chaminé, a partir da fase exotérmica do processo, que os GNC ainda apresentam certa quantidade de energia. Isso é um indicativo de que ainda está sendo emitido gases inflamáveis, como o CO e o CH<sub>4</sub>, resultante da combustão incompleta, conforme já mencionado pelo percentual de redução obtido destes gases pela fornalha em estudo.

### 3.2. Concentração média dos gases não condensáveis da carbonização

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios da concentração de cada gás analisado, no duto e posteriormente na chaminé da fornalha, em função das fases da carbonização.

**Tabela 2** – Concentrações médias (%) dos gases em função das fases de carbonização.

Gás (%)	Fases da Carbonização							
	Fase 1		Fase 2		Fase 3		Fase 4	
	Duto	Chaminé	Duto	Chaminé	Duto	Chaminé	Duto	Chaminé
CO	2,45	0,81	5,96	2,08	6,99	2,12	2,95	1,09
CH <sub>4</sub>	0,14	0,03	0,29	0,08	0,49	0,15	0,36	0,11
CO <sub>2</sub>	2,43	2,81	6,35	5,06	12,38	6,97	7,22	5,14
O <sub>2</sub>	11,32	17,47	16,4	12,72	4,53	10,94	8,39	11,41

Observa-se, de modo geral, que as concentrações médias dos gases CO, CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> no duto foram superiores aos da chaminé, enquanto que o oposto foi verificado

para as concentrações de O<sub>2</sub>. Isso foi devido, provavelmente, pelo excesso de ar atmosférico admitido na câmara de combustão, o que ocasionou diluição e conseqüentemente o aumento da concentração de O<sub>2</sub>.

No entanto, observa-se que a concentração de CO<sub>2</sub> na Fase 1 e a de O<sub>2</sub> na Fase 2 não seguiram a mesma tendência das demais concentrações dos gases ao longo da carbonização. Em relação ao CO<sub>2</sub>, esse evento pode ser explicado devido ao abastecimento inicial da câmara de combustão da fornalha com 5 kg de material lignocelulósicos para auxiliar na ignição do forno, o que acabou resultando no aumentando da concentração desse gás na chaminé. Já para o gás O<sub>2</sub> provavelmente foi devido a alguma intervenção do carbonizador na abertura de “tatus” do forno para manter a sua temperatura interna de acordo com as faixas de temperatura estabelecidas nesse estudo, resultando no aumento da concentração desse gás.

A partir da Fase III do processo de carbonização (início da fase exotérmica do processo), houve redução significativa das concentrações CO na chaminé, devido ao início da combustão dos gases, com redução média de 66,5% na emissão desse gás. Coelho (2013) estudando dimensionamento de câmaras de combustão para gases de carbonização obteve redução de 74% de CO nesta mesma fase, além disso, o autor ressalta que esse gás é o responsável pela manutenção da chama dentro da fornalha, por ser o composto oxidável em maior abundância no sistema. Cardoso (2010) e Lana (2014), também, encontraram redução significativa nas concentrações de monóxido de carbono quando se procedeu a queima dos gases, evidenciando que a sua maior parte foi oxidada e liberada na forma de CO<sub>2</sub>.

Observa-se que a concentração do CH<sub>4</sub>, também, teve aumento significativo quando o processo de carbonização chega na fase exotérmica, tendo redução de 71 e 69%, na Fase 3 e 4, respectivamente. Cardoso et al. (2010) obtiveram uma redução de 96% de metano no processo de carbonização utilizando o sistema forno-fornalha MF1. Coelho (2013) observou uma redução de 99,8%; e Halouani e Farhat (2003) verificaram redução total, ou seja, de 100% das emissões de metano na carbonização, numa planta com quatro fornos metálicos acoplados a uma unidade de queima (fornalha).

O menor percentual de redução deste gás, no presente trabalho, pode ser explicado, pelo menos em parte, por meio do dimensionamento da fornalha, pois provavelmente, o estrangulamento do diâmetro da câmara de combustão da fornalha não foi suficiente para se obter o tempo de residência necessário para que ocorresse a oxidação completa dos gases inflamáveis.



Segundo Lopes (2002), para que ocorra uma combustão completa em uma câmara de combustão, deve ser levado em consideração os três princípios da combustão - temperatura, turbulência e tempo. Sendo que a temperatura deve ser suficiente para iniciar e manter a combustão do combustível; a turbulência necessária para que ocorra o contato entre agente oxidante e o combustível; e tempo suficientemente para a ocorrência da reação de combustão.

Segundo Ferreira (2004), para atender ao terceiro princípio da combustão, o tempo, a câmara de combustão deve ser projetada para permitir uma velocidade de propagação do gás em seu interior, com um tempo mínimo de residência para que ocorra a combustão completa. No entanto, ressalta-se que o estudo utilizou o tempo de residência de 2 segundos, visto que ainda desconhece esse tempo para os gases da carbonização. A dificuldade de se obter esse valor se deve a heterogeneidade dos gases e a vazão variável dos mesmos ao longo do tempo.

Observa-se que a concentração de  $\text{CO}_2$ , na saída da chaminé, aumentou no decorrer das fases da carbonização, tendo seu aumento mais pronunciado na Fase 3, como consequência da queima dos gases, evidenciando, com isso, que o  $\text{CH}_4$  e o  $\text{CO}$ , em sua maior parte foram oxidados e liberados na chaminé na forma de  $\text{CO}_2$ . Matovic (2011) ressalta-se que a combustão dos gases da carbonização reduzem as emissões a  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , e que o  $\text{CO}_2$  gerado é quase que totalmente sequestrado pelos povoamentos florestais, devido ao processo de fotossíntese.

A queima dos gases da carbonização no sistema forno-fornalha avaliado resultou na redução total de 244,65 kg de emissões de  $\text{CO}_2$  equivalente ( $\text{CO}_2\text{e}$ ), obtido a partir de 3,2 toneladas (t) de massa seca de madeira enforada. Logo, com base neste estudo, para cada 1 t de madeira carbonizada, tem-se uma redução de aproximadamente 76,45 kg de  $\text{CO}_2\text{e}$ . A obtenção dessa redução em larga escala tem forte impacto na diminuição de emissões de GEEs no segmento siderúrgico, além de tornar o carvão vegetal mais competitivo, se considerar apenas a produção de Minas Gerais, ano base de 2015, estima-se uma redução de 344.025 t de  $\text{CO}_2\text{e}$ .

### **3.3. Correlações entre as temperaturas do forno e as emissões dos gases da carbonização.**

Na Tabela 3 são apresentadas as correlações existentes entre as temperaturas médias na cúpula do forno e as emissões de gases da carbonização ao longo do processo.

**Tabela 3.** Correlações entre as Temperaturas médias do forno e as emissões de gases da carbonização.

	Tempo	Temperatura	CO <sub>c</sub>	CO <sub>d</sub>	CO <sub>2c</sub>	CO <sub>2d</sub>	CH <sub>4c</sub>	CH <sub>4d</sub>	H <sub>2c</sub>	H <sub>2d</sub>	O <sub>2c</sub>	O <sub>2d</sub>	Pcu <sub>c</sub>	Pcu <sub>d</sub>
Tempo	-													
Temperatura	0,91	-												
CO <sub>c</sub>	0,01	0,32	-											
CO <sub>d</sub>	-0,04	0,32	0,94	-										
CO <sub>2c</sub>	0,27	0,53	0,59	0,74	-									
CO <sub>2d</sub>	0,40	0,67	0,72	0,75	0,76	-								
CH <sub>4c</sub>	0,52	0,73	0,74	0,66	0,62	0,84	-							
CH <sub>4d</sub>	0,39	0,67	0,69	0,77	0,88	0,87	0,85	-						
H <sub>2c</sub>	0,31	0,58	0,64	0,74	0,97	0,77	0,69	0,93	-					
H <sub>2d</sub>	0,44	0,71	0,68	0,75	0,83	0,93	0,85	0,98	0,87	-				
O <sub>2c</sub>	-0,48	-0,69	-0,56	-0,67	-0,93	-0,77	-0,69	-0,92	-0,96	-0,88	-			
O <sub>2d</sub>	-0,37	-0,67	-0,75	-0,80	-0,85	-0,94	-0,88	-0,95	-0,87	-0,96	0,83	-		
Pcu <sub>c</sub>	0,26	0,57	0,94	0,91	0,73	0,87	0,87	0,86	0,78	0,87	-0,74	-0,91	-	
Pcu <sub>d</sub>	0,14	0,49	0,88	0,97	0,85	0,84	0,74	0,90	0,86	0,88	-0,81	-0,91	0,93	-

\*Correlações em vermelho são significativas à 95% de probabilidade pelo teste *t*.

\* Pcu = poder calorífico útil; c = concentração do gás na saída da chaminé; e d = concentração do gás na saída do duto.

Observa-se que o poder calorífico dos gases teve correlação alta e significativa com os gases CO e CH<sub>4</sub>. Observa-se que as correlações do gás CO teve coeficiente de correlação superior aos demais, indicando ser o composto gasoso que mais contribuiu com a energia no processo, corroborando com Coelho (2013), que verificou que o monóxido de carbono é o gás combustível responsável pela manutenção da chama. Segundo resultados obtidos por Jesus (2016), os gases não condensáveis da carbonização que mais contribuem com a energia do processo são o monóxido de carbono, metano, etano, etileno e o gás hidrogênio, nessa ordem.

De forma geral, o aumento da temperatura de carbonização, proporcionou um aumento gradativo na produção dos GNC, conforme constatado pelo grande número de correlações significativas na Tabela 3. Isso, como já mencionado ao longo do texto, ocorre em função da degradação térmica dos constituintes da madeira, entretanto, a degradação destes ocorre em faixas específicas de temperatura ao longo do processo, promovendo uma maior ou menor emissão de determinado gás em diferentes intervalos de tempo.

Observa-se que o gás CO não teve correlação significativa com a temperatura. Isso é explicado pelo fato de que o principal componente da madeira responsável por sua formação, as hemiceluloses, é degradada em sua maior parte, na fase endotérmica do processo, entre temperaturas de 150 a 270 °C. Segundo Frederico (2009) e Yang et

al., (2007), nas reações de degradação térmica das hemiceluloses, a temperatura na qual ocorre pico máximo de liberação de energia e perda de massa é a 275 °C. Logo, a partir deste intervalo de tempo em que ocorre o pico de máxima concentração deste gás, ainda ocorra a emissão deste gás, no entanto, em uma menor proporção que o intervalo de temperatura mencionado.

Já os demais GNC tiveram uma correlação significativa em relação a temperatura do forno, sendo positiva para os gases CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>; indicando que com aumento de temperatura tem-se um incremento na concentração desses gases. Segundo Canal et. al (2016) com o aumento de temperatura do processo de carbonização constata-se um aumento progressivo das emissões de gases hidrogenados como o metano e o hidrogênio.

O gás O<sub>2</sub> também teve uma correlação significativa, porém negativa, conforme esperado, indicando que este foi consumido nas reações de oxidação com aumento da concentração dos gases combustíveis.

Sendo assim, a variação das vazões e concentrações dos gases inflamáveis da carbonização ao longo do processo, assim como as condições de temperatura e pressão com que os gases são capazes de reagir na presença de oxigênio, liberando energia, é um dos principais desafios técnicos da queima dos gases da carbonização.

#### **4. Conclusão**

Conclui-se que a fornalha avaliada neste estudo proporcionou uma redução média na emissão de gases poluentes ao longo da fase exotérmica do processo de carbonização de 66,5 para o CO e de 70% para o gás CH<sub>4</sub>.

A eliminação dos gases poluentes por meio de sua combustão proporcionou uma redução de 244,65 kg de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente.

#### **5. Referências**

ARRUDA, T. P. M.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D. ; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. 2011. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 35, n.4, p. 949-955, 2011.

BECIDAN, M.; SKREIBERG, O.; HUSTAD, J. Products distribution and gas release in pyrolysis of thermally thick biomass residues samples. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 78, p. 207–213, 2007.

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELLOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. 2010. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 115-124, 2010.

CARDOSO, M. T. **Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira**. 2010. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 2010.

Canal, W. D.; Carvalho, A. M. M. L.; Carneiro, A. C. O.; Vital, B. R.; Pereira, B. L.C.; Donato, D. B. Efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases de efeito estufa no processo de carbonização. **Scientia Forestalis**, volume 44, n. 112 p.831-840, dezembro de 2016.

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.

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**. 2012. 71p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG - 2012.

ELK, A. G. P. Van. **Mudanças climáticas, lixo, energia**. São Paulo, 2010. Disponível em: <[http://www.ecosdasardenha.com.br/palestras/palestrantes/05\\_Ana\\_Ghislane\\_Van\\_Elk.pdf](http://www.ecosdasardenha.com.br/palestras/palestrantes/05_Ana_Ghislane_Van_Elk.pdf)>. Acesso em: 31 jun. 2010.

FERREIRA, W.P.M. **Avaliação de uma fornalha a carvão vegetal para aquecimento de aviário**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG; 2004. p. 134.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86 p. Dissertação MSc. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

GERBER, S.; BEHRENDT, F.; OEVERMANN, M. “An Eulerian modeling approach of wood gasification in a bubbling fluidized bed reactor using char as bed material”. **Fuel**. 2010, Vol. 89, pp. 2903-2917.

GONZÁLEZ J. F, ENCINAR JM, CANITO JL, SABIO E, CHACÓN M. Pyrolysis of cherry stones: energy uses of the different fractions and kinetic study. **J Anal Appl Pyrolysis** 2003;67:165–90.

GREENBERG, J.P.; FRIEDLI, H.; GUENTHER, A.B.; HANSON, D.; HARLEY, P.; KARL, T. Volatile organic emissions from the distillation and pyrolysis of vegetation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Kreissparkasse Northeim, v. 6, p. 81–91, 2006.

HALOUANI, K; FARHAT, H. Depollution of atmospheric emissions of wood pyrolysis furnaces. **Renewable Energy**, v.28, n.1, pp. 129-138, 2003.

JESUS, M. S. **Balço de massa e energia na pirólise da madeira de *Eucalyptus* em escala macro**. 2016. 88p. Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG – 2016.

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.

LAW, C. K. **Combustion Physics**. Cambridge University press, 2006. p. 347.

LOPES R. P. **Desenvolvimento de um sistema gerador de calor com opção para aquecimento direto e indireto de ar**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG; 2002. p. 220.

MATOVIC, D. Biochar as a viable carbon sequestration option: Global and Canadian perspective. **Energy**. 2011, Vol. 36, pp. 2011-2016.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A. P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.3, p.557-566, 2013.

PIZZUTI L, MARTINS C. A, LACAVA P. T. **Laminar burning velocity and flammability limits in biogas: a literature review**. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;62:856–65.

SAROFIM, A.F.; FLAGAN, R.C., 1976, NO<sub>x</sub> Control for Stationary Combustion Sources, **Progress in Energy and Combustion Science**, 2, 1-25.

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 MSc. Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 2011.

TIHAY, V.; GILLARD, P. Pyrolysis gases released during the thermal decomposition of three Mediterranean species. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, n. 88, p. 168-174, 2003.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis, **Fuel**, Amsterdam, n. 86, p. 1781– 1788, 2007.

WANG, S.; WANG, K.; LIU, Q.; GU, Y.; LUO, Z.; CEN, K.; FRANSSON, T. Comparison of the pyrolysis behavior of lignins from different tree species. **Biotechnology Advances**, Amsterdam, n. 27, p. 562–567, 2009.

## CAPÍTULO IV

### INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DA MADEIRA DE EUCALIPTO NA PRODUTIVIDADE E NAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO EM SISTEMA FORNO-FORNALHA

**RESUMO** – As propriedades do carvão vegetal não são dependentes apenas das características intrínsecas da madeira, mas, também, de outros fatores como a condução do processo, o sistema de produção, o teor de umidade e o diâmetro da madeira. Nesse sentido, o objetivo principal deste trabalho foi estudar a influência do diâmetro da madeira na produtividade e nas propriedades do carvão vegetal produzido em sistema forno-fornalha. Os objetivos específicos foram: avaliar a influência da classe de diâmetro no rendimento gravimétrico em carvão vegetal, geração de finos e atíço e avaliar a variação na qualidade do carvão vegetal em três posições equidistantes no interior forno. Para proceder à carbonização da madeira foi utilizado um forno circular de alvenaria com capacidade volumétrica de 12 st, acoplado a uma fornalha para combustão dos gases. Para as carbonizações utilizou-se madeira de *Eucalyptus* sp., em duas classes de diâmetro, de 7 a 12 cm e 13 a 18 cm. Para a determinação das propriedades do carvão vegetal foram coletadas amostras em três posições equidistantes do forno, com distância de 1 metro entre os pontos de coleta, no sentido da porta ao fundo do mesmo. As carbonizações realizadas com madeira de menor classe de diâmetro tiveram uma redução de 14,86% do tempo total de carbonização. Os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal para as classes de menor e maior diâmetro foram de 33,62% e 31,67%, respectivamente. No entanto, as carbonizações realizadas com toras de menor diâmetro tiveram menor massa de madeira enforada (4,45%). Os valores obtidos para análise química imediata do carvão produzido para ambas as classes foram condizentes com o que é desejável para uso siderúrgico. Os valores de friabilidade para ambas as classes de diâmetro foram satisfatórios, sendo classificados como pouco friáveis. No entanto, o carvão produzido com a madeira de menor diâmetro teve menor percentual de geração de finos. Conclui-se que a carbonizações utilizando madeira de menor diâmetro obteve uma maior produtividade em carvão vegetal.

**Palavras-Chave:** Rendimento; tempo de carbonização; produtividade.

## CHAPTER IV

### INFLUENCE OF THE WOOD DIAMETER IN THE PROPERTIES OF CHARCOAL VEGETABLE

**ABSTRACT** – The properties of charcoal are not only dependent on the intrinsic characteristics of the wood, but also on other factors such as process conduction, production system, moisture content and wood diameter. In this sense, the main objective of this work was to study the influence of wood diameter on the productivity and properties of charcoal in Kiln-furnace system. And as specific objectives evaluate the influence of the diameter class on the gravimetric yield in charcoal, fines and ash; And to evaluate the charcoal quality in three equidistant positions in the kiln. To proceed with the carbonization of the wood, a circular masonry furnace with a volumetric capacity of 12 st was used, coupled to a furnace for the combustion of gases. *Eucalyptus* sp. Wood was used for carbonizations in two diameter classes, 7-12 and 13-18 cm. For the determination of charcoal properties, samples were collected in three positions equidistant from the kiln, with a distance of 1 meter between the collection points, towards the door at the bottom. The carbonizations carried out with wood of smaller diameter class had a reduction of 14.86% of the total carbonization time. The gravimetric yields of charcoal for the smaller and larger diameter classes were 33.62 and 31.67%, respectively. However, the carbonizations carried out with smaller diameter logs had a lower wood mass (4.45%). The values obtained for immediate chemical analysis of the coal produced for both grades were consistent with what is desirable for steel use. The friability values for both classes of diameter were satisfactory, being classified as little friable. However, the coal produced with the smaller diameter wood had a lower percentage of fines generation. It is concluded that the carbonization using wood of smaller diameter obtained a greater productivity in charcoal.

**Keywords:** Yield; carbonization time; productivity.

## 1. Introdução

A produção de carvão vegetal é uma atividade de grande importância para o Brasil, em especial para o estado de Minas Gerais, que detém o maior parque siderúrgico a carvão vegetal do mundo e tem se destacado como o maior produtor e consumidor desse insumo energético (IBÁ, 2015). Entretanto, a maior parte do carvão vegetal produzido atualmente no Brasil, é proveniente de fornos rudimentares de baixo rendimento gravimétrico, sem controle das características da madeira, do processo de carbonização e das emissões atmosféricas, tendo como consequência, um produto final com propriedades físicas e químicas variáveis, o que compromete a sua qualidade e produtividade.

A qualidade da madeira é fator de extrema importância quando o objetivo é a produção de carvão vegetal com alto rendimento, baixo custo e elevada produtividade. Entretanto, as propriedades do carvão vegetal não são dependentes apenas das características intrínsecas da madeira, mas, também, de outros fatores como a condução do processo, as dimensões do forno, o diâmetro da madeira e o seu teor de umidade.

Assim, um dos grandes problemas enfrentados pelas indústrias siderúrgicas é a heterogeneidade das propriedades do carvão vegetal, ocasionadas pelo grande número de variáveis que influenciam o processo, destacando-se o teor de umidade e a variabilidade da classe diamétrica da madeira enforada.

Salienta-se que a variação diamétrica da madeira é o parâmetro que mais está presente em todas as etapas do processo de produção do carvão vegetal (RAAD, 2004). Devendo ressaltar que além de influenciar nas propriedades e nas etapas do processo de produção do carvão vegetal, o diâmetro da madeira exerce forte influência no custo da madeira, diluído ao tempo de estocagem em campo, no transporte e também no ciclo de carbonização.

Portanto, devido aos custos de produção do carvão vegetal aliado a perdas em rendimento e qualidade influenciadas por essa variável, é importante que os produtores busquem parâmetros adequados para uma determinada finalidade, em busca a uma maior produtividade, em menores tempo e custo.

Nesse sentido, o objetivo principal deste trabalho foi estudar a influência do diâmetro da madeira na produtividade e nas propriedades do carvão vegetal em sistema forno-fornalha. Os objetivos específicos foram: avaliar a influência da classe de diâmetro no rendimento gravimétrico em carvão vegetal, geração de finos e atijo e



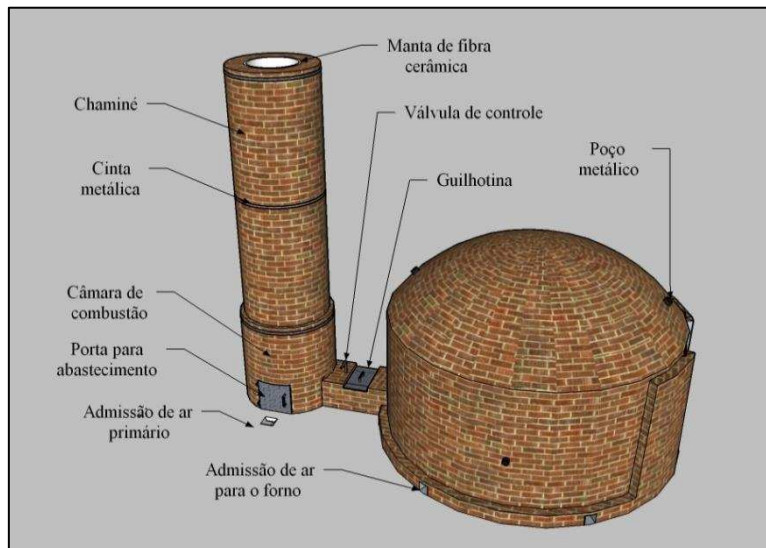
avaliar a variação na qualidade do carvão vegetal em três posições equidistantes no interior forno.

## 2. Material e Métodos

Este trabalho foi desenvolvido na unidade de pesquisa de produção de carvão vegetal do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM, da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa – MG.

### 2.1. Descrição do sistema utilizado para as carbonizações

Para proceder à carbonização da madeira foi utilizado um forno circular de alvenaria com capacidade volumétrica de 12 st, acoplado a uma fornalha para combustão dos gases. Optou-se por esse tipo de forno por ser de baixo custo, fácil construção e bastante difundido entre os pequenos e médios produtores de carvão vegetal, principalmente no Estado de Minas Gerais. Na Figura 1 é apresentada uma vista em perspectiva do sistema construído.



**Figura 1** - Vista em perspectiva do forno de alvenaria circular.

O forno utilizado possui 6 aberturas equidistantemente distribuídas no seu perímetro, conhecida popularmente como “Tatus”, cujas dimensões foram de 10 x 15 cm, para admissão de ar no sistema. A abertura e o fechamento dessas entradas

controlavam a entrada de ar para o sistema e, conseqüentemente, as temperaturas do forno, auxiliando na condução da carbonização.

Utilizou-se uma fornalha para queima dos gases da carbonização, construída de tijolos de alvenaria com revestimento interno em manta cerâmica para melhorar o isolamento térmico do meio externo. A câmara de combustão da fornalha foi construída em formato cilíndrico e altura de 100 cm, diâmetro interno de 65 cm e externo de 110 cm.

Na lateral da câmara de combustão foi instalada uma janela basculante metálica revestida internamente por manta cerâmica, de 40 x 40 cm, para alimentação de combustível auxiliar (resíduos lignocelulósicos), responsável por aquecer a câmara de combustão e proceder à ignição dos gases advindos da carbonização.

No centro da base da fornalha foi instalada uma grelha metálica de 15 x 15 cm, responsável pela admissão de ar primário para o interior da fornalha, advindo do meio externo, através de um duto subterrâneo de seção quadrangular.

Logo após a construção da câmara de combustão da fornalha foi feito um estrangulamento de 15 cm de diâmetro para aumentar o tempo de residência dos gases da carbonização na câmara de combustão e conseqüentemente aumentar a eficiência de combustão dos mesmos.

A chaminé foi construída sobre a câmara de combustão, com 55 cm de diâmetro interno e altura total de 4 m.

A conexão entre o forno e a fornalha para condução dos gases foi feita por um duto que possuía 38 cm de altura por 38 de largura e 70 cm de comprimento. O controle da vazão dos gases da carbonização para a fornalha foi realizado por meio da válvula de controle, operada manualmente, instalada ao centro do duto, aproximadamente a 40 cm de distância da parede do forno (Figura 1).

Para o controle da carbonização foram inseridos oito poços metálicos (cilindros metálicos com fundo fechado): quatro localizados na copa a 1,70 m e quatro laterais a 60 cm em relação ao solo, distribuídos entre as aberturas para admissão de ar (tatus).

## **2.2. Carbonização da madeira**

Para as carbonizações utilizou-se madeira de *Eucalyptus* sp., com idade aproximada de 6 anos, comprimento de 1,5 m, em duas classes de diâmetro, de 7 -12 e de 13 - 18 cm. Foram realizadas seis carbonizações, sendo três para cada classe de diâmetro.

As carbonizações da madeira foram conduzidas utilizando as faixas teóricas de temperatura obtidas na copa do forno, conforme proposto por Oliveira *et al.* (2013), para madeira com teor de umidade entre 30 e 40%. Sendo que o tempo final de carbonização foi adaptado em função da classe de diâmetro da madeira enforada, de modo a não comprometer a qualidade do carvão vegetal produzido.

Antes de cada carbonização determinou-se a umidade da madeira, selecionando-se inicialmente uma amostra de toras representativas das classes diamétricas da madeira a ser enforada, conforme estabelecido por Donato (2013). De cada tora foram retirados discos de aproximadamente 7 cm de espessura, nas posições de 25, 50 e 75% do comprimento total da tora. Utilizou-se o método gravimétrico, com secagem em estufa com circulação de ar forçado e temperatura de  $103 \pm 2$  °C, até massa constante.

Foi determinado também a densidade da madeira para ambas as classes de diâmetros de acordo a norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003) e Vital (1984).

O controle da carbonização foi realizado pelo monitoramento da temperatura, e controle das entradas de ar (oxigênio) para o interior do forno, por meio da abertura ou do fechamento dos “tatus”, e também pela “válvula borboleta”, que controlava a vazão de saída dos gases do forno.

As temperaturas do forno foram monitoradas nos oito cilindros metálicos com o auxílio de um sensor infravermelho, pirômetro, marca “Minipa” modelo “MT-350”, com capacidade de aferir temperaturas entre - 30 e 550°C.

O término da carbonização e a vedação do forno foram determinados pela chegada da frente de carbonização nos “Tatus” próximos ao duto, seguido também pela redução do volume dos gases.

Logo após o resfriamento do forno foi realizado o seu descarregamento, de forma manual, com o auxílio de um garfo metálico apropriado, o qual consegue separar o carvão granular dos finos. O carvão vegetal foi pesado e separado das porções de finos e atíços (madeira parcialmente carbonizada), determinando-se os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGCV), rendimento gravimétrico em atíços (RGT) e o rendimento gravimétrico em finos (RGF).

### **2.3. Propriedades do carvão vegetal**

Para a determinação das propriedades do carvão vegetal foram coletadas amostras em três posições equidistantes do forno, com distância de 1 metro entre os

pontos de coleta, no sentido da porta ao fundo do mesmo, correspondendo as amostras obtidas nas posições 1, 2 e 3, respectivamente.

A densidade a granel do carvão vegetal foi determinado conforme a norma ABNT NBR 6922 (ABNT, 1981), sendo realizada simultaneamente ao descarregamento do forno.

Para a realização dos ensaios físicos e químicos, seguiu-se a preparação da amostra, baseada na norma ABNT NBR 6923 (ABNT, 1981), com homogeneização e quarteramento de uma amostra de carvão vegetal representativa do forno e retirada de uma alíquota de 20 litros, para cada posição do forno amostrada.

A densidade relativa aparente foi determinada conforme os procedimentos da norma ABNT NBR 9195 (ABNT, 1985).

Para determinação do poder calorífico superior e da composição química imediata, as amostras de carvão vegetal foram preparadas conforme a norma NBR 6923 (ABNT, 1981). O poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal foi determinado por meio da bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a norma ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984). A determinação dos teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) seguiram os procedimentos preconizados na norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

A determinação da friabilidade do carvão vegetal, foi realizada por meio do teste de tamboramento, que consistiu em dispor uma amostra de 0,5 kg de carvão, classificado entre 60 e 20 mm, em um tambor rotativo de aço com 30 cm de diâmetro e aplicar 500 rotações a 30 rpm. A massa final da amostra, que se encontrava entre 60 e 20 mm foi medida. Após o teste, obteve-se a porcentagem com granulometria inferior a 20 mm, que foi comparada à escala de classificação sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec), para carvão vegetal, citado por Oliveira et al. (1982).

#### **2.4. Delineamento experimental**

Para avaliar o efeito do diâmetro da madeira nos rendimentos gravimétricos (carvão, finos e atíço) e nos parâmetros da carbonização (quantidade de madeira enfornada e tempo de carbonização), o experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com duas classes de diâmetro da madeira, e três repetições (carbonizações), totalizando seis unidades amostrais.

As propriedades do carvão vegetal foram analisadas segundo fatorial 3 x 2 (posição no forno e classe de diâmetro da madeira), com 3 repetições, totalizando 18 unidades amostrais.

Para ambos os casos, os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors e Cochran para testar a normalidade e homogeneidade das variâncias, respectivamente. Em seguida, realizou-se a análise de variância e quando houve efeito dos tratamentos as médias foram comparadas pelo teste Tukey, a 95% de probabilidade.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Parâmetros e rendimentos gravimétricos das carbonizações

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios dos parâmetros e rendimentos gravimétricos das carbonizações, bem como os seus respectivos desvios-padrão por classes de diâmetro.

**Tabela 1** – Parâmetros e rendimentos gravimétricos das carbonizações, em função das classes de diâmetro da madeira.

Parâmetros	Diâmetro da Madeira	
	7-12 cm	13-18 cm
Massa seca de madeira enfiada (kg)	3061,43 A ( $\pm 32,48$ )	3203,92 B ( $\pm 45,22$ )
Teor de umidade da Madeira (%)	34,28 A ( $\pm 1,92$ )	39,35 B ( $\pm 2,36$ )
Tempo de carbonização (horas)	63,0 A ( $\pm 1,00$ )	74,0 B ( $\pm 0,82$ )
Rendimento Gravimétrico em carvão vegetal (%)	33,62 A ( $\pm 0,96$ )	31,67 B ( $\pm 0,17$ )
Rendimento Gravimétrico em finos (%)	1,89 A ( $\pm 0,27$ )	1,96 A ( $\pm 0,36$ )
Rendimento Gravimétrico em atíço (%)	0,23 A ( $\pm 0,17$ )	0,46 A ( $\pm 0,12$ )

\* Médias seguidas da mesma letra entre as classes de diâmetro para um mesmo parâmetro não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste F. Os valores entre parênteses indicam o desvio padrão.

Observa-se que as carbonizações utilizando toras de menor diâmetro tiveram menor massa seca de madeira enfiada, tendo enfiado em média 4,45% a menos que a madeira de diâmetro maior. Isso se deve ao fato de que ao enfiar com madeiras de menores dimensões tem-se uma maior quantidade de espaços vazios dentro do forno, sendo essa quantidade ainda maior quando o carregamento for mecanizado, gerando uma menor a massa de madeira enfiada. Vale ressaltar que quanto menor a

quantidade de madeira enfornada, menor será a produtividade do forno em carvão vegetal.

Observa-se que as carbonizações realizadas com madeira de menor diâmetro tiveram menor tempo de condução (63 horas), ou seja, 14,86% a menos que as realizadas com madeira de maior. Vale ressaltar que a madeira de maior diâmetro apresentou maior teor de umidade, e esse tem grande influência sobre o tempo final de carbonização, pois quanto mais elevado esse teor, maior será o tempo necessário para eliminação desta água, no início da carbonização, aumentando o tempo da fase endotérmica, e consequentemente o tempo total de carbonização.

Segundo Cardoso (2015) a degradação térmica da madeira ocorre da superfície para o seu interior na proporção que o calor é transferido de uma região para outra. Logo, conforme observado toras de maior diâmetro necessitaram de mais tempo para sua completa transformação em carvão.

Raad (2004) menciona que quanto maior for o teor de umidade da madeira, maior será a fase de secagem do processo, consequentemente, menor será o tempo de carbonização, reduzindo-se a produtividade do forno.

De acordo com Pereira et al. (2016), as variáveis relacionadas ao controle do processo, e as características da matéria-prima, como diâmetro e teor de umidade, influenciam no tempo total de carbonização e na qualidade e o fluxo de gases.

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal, independente da classe de diâmetro da madeira, foi considerado satisfatório, uma vez que a média nacional do rendimento gravimétrico é de 26% de acordo com os dados do CGEE (2015), evidenciando a importância da técnica de pirometria para o controle adequado da temperatura de carbonização. Logo o controle do processo com auxílio de um pirômetro torna-se possível uma melhor conversão da madeira em carvão sem sua excessiva degradação, promovendo aumento de produtividade por fornada em função do maior rendimento gravimétrico, visto que esse é um dos fatores que mais influenciam a produtividade dos fornos na carbonização da madeira.

Observa-se que o rendimento gravimétrico médio em carvão vegetal para a madeira de menor diâmetro foi significativamente maior e isso se deve, além do menor teor de umidade, ao fato desta ter também, uma maior área superficial, o que promoveu uma carbonização mais homogênea, assim como uma maior taxa de aquecimento nas fases inicial e final do processo, resultando em uma menor degradação térmica em função do menor tempo de exposição da madeira ao calor nestas fases.

Observa-se que para ambas as classes de diâmetro os valores de rendimento em finos foi baixo, provavelmente, devido ao controle adequado da temperatura de carbonização por pirometria. Segundo Damásio et al. (2015) a temperatura elevada de carbonização pode ocasionar maior degradação da madeira, elevando o teor de carbono fixo, e conseqüentemente tem-se um carvão vegetal menos resistente, refletindo na maior geração de finos.

Apesar de não observar diferença significativa, a geração de finos nas carbonizações realizadas com madeira de menor diâmetro foi numericamente menor, isso provavelmente foi devido ao menor teor de umidade e menor proporção de cerne. Segundo Pereira (2012) quando maior a proporção de cerne, maior será o caminho obstruído a ser percorrido pelos gases, conseqüentemente, maior o número de células rompidas e maior também, o teor de finos gerado.

Os valores médios de rendimento gravimétrico em atíço, independente da classe de diâmetro podem ser considerados baixos, o que demonstra que, quase, toda madeira foi convertida em carvão vegetal, evidenciando que o processo de carbonização procedeu-se de maneira adequada, de acordo com as faixas teóricas de temperatura previstas para condução do processo.

### **3.2. Propriedades do carvão vegetal**

Não houve efeito dos tratamentos na densidade a granel e aparente do carvão vegetal, sendo os valores médios iguais a 156,41 e 355 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. De acordo com Santos (2008) estes valores são inferiores ao desejado para uso siderúrgico. O autor menciona que os valores desejáveis para densidade a granel e a aparente são respectivamente de 200 Kg/m<sup>3</sup> e 400 Kg/m<sup>3</sup>. Estes resultados podem ser explicados pelo menos em parte pela densidade média da madeira utilizada, 460 kg/m<sup>3</sup> para toras de 7-12 cm e de 470 kg/m<sup>3</sup> para as de 13-18 cm.

Os valores médios do poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal em função dos tratamentos são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** – Valores médios do poder calorífico superior (kcal/kg) do carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus sp* em função da posição no forno e classe de diâmetro.

Diâmetro da madeira	Posição no forno			Média
	Porta	Meio	Fundo	
7 – 12 cm	7307 aA	7446 aA	6946 bA	
13 – 18 cm	7032 aB	6909 abB	6808 bB	

Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste Tukey, a 95% de probabilidade. Letras minúsculas referem-se ao mesmo diâmetro nas diferentes posições; e letras maiúsculas aos diferentes diâmetros para uma mesma posição no forno.

Observava-se que os valores do poder calorífico superior (PCS) foram significativamente diferentes para as diferentes classes de diâmetro. Não houve interação significativa entre as posições porta e meio para ambas as classes de diâmetro, sendo a posição fundo do forno estatisticamente diferente, apresentando menor valor de PCS do carvão.

Essa diferença provavelmente se deve aos maiores valores de carbono fixo obtido para as toras de menor diâmetro e também nas posições porta e meio do forno (Tabela 3). De acordo com Neves et al. (2011), Trugilho e Silva (2001), e Vale et al. (2001), o poder calorífico tem uma relação diretamente proporcional com o teor de carbono fixo.

Os valores médios do teor de carbono fixo (CF) e materiais voláteis do carvão vegetal em função dos tratamentos são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

**Tabela 3** – Valores médios do teor de carbono fixo (%) do carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus sp* em função da posição no forno e classe de diâmetro.

Diâmetro da madeira	Posição no forno		
	Porta	Meio	Fundo
7 – 12 cm	84,25 aA	78,66 bA	74,82 cB
13 – 18 cm	82,28 aA	76,20 cA	78,84 bA

Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste Tukey, a 95% de probabilidade. Letras minúsculas referem-se ao mesmo diâmetro nas diferentes posições; e letras maiúsculas aos diferentes diâmetros para uma mesma posição no forno.

**Tabela 4** – Valores médios do teor de voláteis (%) do carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus sp* em função da posição no forno e classe de diâmetro.

Diâmetro da madeira	Posição no forno		
	Porta	Meio	Fundo
7 – 12 cm	14,90 cB	20,69 bB	23,38 aA
13 – 18 cm	17,08 cA	23,06 aA	20,44 bB

Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste Tukey, a 95% de probabilidade. Letras minúsculas referem-se ao mesmo diâmetro nas diferentes posições; e letras maiúsculas aos diferentes diâmetros para uma mesma posição no forno.



Observa-se que os teores de carbono fixo (CF) dos carvões produzidos com madeira de menor diâmetro foram significativamente diferentes ao longo das posições do forno. No entanto, o mesmo não foi observado para as toras de maior diâmetro em relação as posições meio e fundo.

Ressalta-se que a carbonização de madeira no sistema forno-fornalha utilizado, cuja tiragem dos gases é feita de forma inversa, ou seja, inicia-se no sentido da porta do forno para o fundo, sendo que à medida que a frente de carbonização avança, a madeira vai degradando termicamente, e seus constituintes primários vão sendo eliminados, principalmente hemiceluloses e celulose, resultando em uma maior concentração de carbono. Sendo assim, espera-se que os valores dessa variável sejam maiores na posição da porta em relação às demais.

Observa-se que os teores médios de CF para ambas as classes de diâmetro foram próximos, e condizentes com as exigências para utilização do carvão vegetal na siderurgia. Segundo Rosillo-Calle e Bezzon (2005), o carvão vegetal usado na fabricação de aço e ferro-gusa deve ter teor de carbono fixo superior a 75%, uma vez que valores inferiores afetam o consumo específico de redutor e, conseqüentemente, a produção de ferro- gusa.

Observa-se que os teores médios obtidos de CF para as diferentes classes de diâmetro nas posições porta e meio não tiveram diferença estatística; sendo verificada diferença estatística na posição fundo do forno. Isso se deve, provavelmente, ao maior tempo de exposição à temperatura final do processo (420°C) para as toras de diâmetro maior, acarretando em um maior teor de CF. Segundo Trugilho e Silva (2001), a temperatura final de carbonização é o principal fator que influencia o teor de carbono fixo do carvão vegetal.

Observa-se que os valores médios obtidos para materiais voláteis (MV) foram inversamente proporcionais aos teores de CF (Tabela 4). Esses teores, para ambas as classes de diâmetros foram condizentes com os valores desejáveis para uso siderúrgico. Segundo Santos (2008), os valores do teor de materiais voláteis no carvão vegetal desejáveis para uso siderúrgico situam-se entre 20 e 25%; valores esses próximos aos encontrados nesse estudo.

Os valores médios do teor de cinzas do carvão vegetal em função dos tratamentos são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5** – Valores médios do teor de cinzas (%) do carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus* sp em função da posição no forno e classe de diâmetro.

Diâmetro da madeira	Posição no forno		
	Porta	Meio	Fundo
7 – 12 cm	0,85 aA	0,65 bA	0,58 cB
13 – 18 cm	0,74 aB	0,64 bA	0,72 aA

Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste Tukey, a 95% de probabilidade. Letras minúsculas referem-se ao mesmo diâmetro nas diferentes posições; e letras maiúsculas aos diferentes diâmetros para uma mesma posição no forno.

Observa-se que os valores médios obtidos para os teores de cinzas, independente do tratamento, foram próximos e dentro dos limites desejáveis para carvão vegetal. Segundo Cortez et al. (2009), um bom carvão vegetal deve ter um conteúdo de cinzas inferior a 3%.

Na literatura são relatados teores de cinzas inferiores a 1% para o carvão vegetal de várias espécies de *Eucalyptus* (Lima et al., 2011; Neves et al., 2011; Santos et al., 2011; Oliveira et al., 2010; Botrel et al., 2007; Trugilho et al., 2005), corroborando com os valores encontrados nesse estudo.

Ressalta-se que o teor de cinzas, relaciona-se com a madeira e não é influenciada pelo processo de carbonização, e sim pela espécie, quantidade de casca e principalmente por contaminação por terra e/ou areia na madeira. Logo, os maiores teores de cinzas obtidos na posição da porta do forno para ambas classes de diâmetro, provavelmente, foi devido a vestígios de barro que podem ter caído sobre a massa de carvão ao abrir a porta do forno.

Os valores médios de friabilidade do carvão vegetal em função dos tratamentos são apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6** – Valores médios da friabilidade (%) do carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus* sp em função da posição no forno e classe de diâmetro.

Diâmetro da madeira	Posição no forno		
	Porta	Meio	Fundo
7 – 12 cm	11,69 cB	12,74 aB	12,41 bB
13 – 18 cm	12,54 cA	14,36 aA	13,79 bA

Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste Tukey, a 95% de probabilidade. Letras minúsculas referem-se ao mesmo diâmetro nas diferentes posições; e letras maiúsculas aos diferentes diâmetros para uma mesma posição no forno.

Os valores de friabilidade para ambas as classes de diâmetro foram satisfatórios, e tiveram a mesma classificação de acordo com o CETEC (1982), sendo classificados

como pouco friáveis, ou seja, a porcentagem de perda na forma de finos variaram de 10 a 15% em relação a massa inicial de carvão vegetal.

Observa-se que os valores de friabilidade nas diferentes posições no forno para ambas classes de diâmetro tiveram uma interação significativa. Sendo que os menores valores foram obtidos na posição da porta do forno. Isso se deve ao fato de a madeira carbonizada na porta ter uma maior degradação térmica, tendo um maior teor de carbono fixo e conseqüentemente uma menor resistência mecânica.

Observa-se também que os valores médios de friabilidade para as toras de menor diâmetro tiveram uma maior resistência. Segundo Coutinho e Ferraz (1988), o índice de friabilidade, mantendo-se fixa a temperatura de carbonização, em carvões originados de árvores de diâmetro maior produzem maior quantidade de finos.

Isso é se deve principalmente ao maior teor de umidade e diâmetro da madeira carbonizada, pois a carbonização da madeira ocorre da superfície para o interior da tora, e a liberação dos gases durante o processo percorre o caminho inverso, sendo assim, quanto maior os valores dessas variáveis, maior será a pressão de vapor d'água no interior da tora e também a distância percorrida pelos gases liberados durante o processo, podendo acarretar o rompimento de algumas células, principalmente as parenquimáticas por serem menos resistentes, o que acaba influenciando em um carvão com menor resistência mecânica.

Outra característica que está relacionada ao diâmetro da tora e tem influência direta nas propriedades do carvão vegetal é a relação cerne/alburno, uma vez que a maior proporção de cerne promove uma maior geração de finos, devido a impermeabilidade do mesmo.

Raad (2004) menciona que quando uma peça de madeira é submetida ao processo de carbonização, o alburno desta seca rapidamente e a retirada de umidade do cerne encontra uma certa dificuldade, devido à sua menor permeabilidade, podendo ocorrer nestas condições a ruptura das células fibrosas com desenvolvimento de trincas.

Segundo Pereira et al. (2013), a madeira com maior proporção de cerne proporciona um menor rendimento gravimétrico em carvão. Tal afirmação se deve ao fato de que a madeira de cerne ser praticamente impermeável e conseqüentemente gera mais finos.

De acordo com Silva e Trugilho (2003), quanto mais elevada for a relação C/A, maior será a dificuldade para liberação dos gases e maior será o número de células

rompidas, gerando um carvão vegetal mais friável e, portanto, produzindo maior porcentagem de finos.

#### 4. Conclusões

Conclui-se que a carbonizações utilizando madeira de menor diâmetro obteve uma produtividade em carvão vegetal.

As carbonizações com madeiras de menor diâmetro tiveram redução no tempo de carbonização em 14,86% em comparação com a de maior, reduzindo o tempo médio em aproximadamente 11 horas.

De modo geral, os valores obtidos para análise química imediata do carvão produzido para ambas classes de diâmetro foram condizentes com o que é desejável para uso siderúrgico.

O carvão vegetal produzido com toras de menor classe de diâmetro teve uma maior resistência a friabilidade.

#### 5. Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941** Madeiras: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 8112** Carvões vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 9165** Carvões vegetal: determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985. 8 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633** Carvões vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6922** Carvões vegetal: Determinação da massa específica (densidade a granel). Rio de Janeiro, 1981. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6923** Carvões vegetal: amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro, 1981. 15p.

BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELLOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. 2010. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 115-124, 2010.

CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. Na madeira e carvão vegetal**. 2011. 97p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE, “**Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia**”. Brasília, 2015.

CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Produção e Utilização de Carvão Vegetal. Séries Técnicas **CETEC**, Belo Horizonte, 393 p. 1982.

COUTINHO, A. R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em Função do diâmetro das árvores e temperatura de Carbonização. **IPEF**, n.38, p.33-37, abr.1988.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2009.

DONATO, B. D. **Métodos de amostragem e de determinação do teor de umidade da madeira em tora**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS/CETEC. **Carvão vegetal; destilação, propriedades e controle de qualidade**. Belo Horizonte, 1982. Iv. (Série de Publicações Técnicas, 6).

IBÁ. INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Anuário Estatístico 2016, ano base 2015. Brasília, 2016. 100p.

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 65, p. 09-17, 2011. DOI: 10.4336/2010.pfb.31.65.09

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.319

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A. P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.3, p.557-566, 2013.

PEREIRA, E. G.; MARTINS M. A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A. C. O.; Pyrolysis gases burners: Sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews (2016).**

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, L. C. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, volume 41, n. 98 p.217-225, junho de 2013.

R. A. P. DAMÁSIO ET AL. Perfil térmico e controle da carbonização em forno circular por meio da temperatura interna. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)** 6(1): 11-22, 2015.

RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização do *Eucalyptus* spp.** 2004. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) -Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

ROSILLO-CALLE, F.; BEZZON, G. Produção e uso industriais do carvão vegetal. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para a produção de energia na indústria brasileira.** Campinas, SP: Unicamp, 2005. 447 p.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, jun. 2011.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: Fórum nacional sobre carvão vegetal, 1., 2008, Belo horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2008.

SILVA, D. A.; TRUGILHO, P.F. Comportamento dimensional da madeira de cerne e alburno utilizando-se metodologia de análises de imagem submetida a diferentes temperaturas. **Revista Cerne**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 56-65, 2003.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, MG, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 2, n. 1-2, p. 45-53, 2001.

VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALES, J. C.; NOGUEIRA, M. Relações entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 25, n. 89, p. 89-95, jan./fev. 2001.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira.** Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21 p.

## **CONCLUSÕES GERAIS**

A câmara de combustão da fornalha funcionou adequadamente como queimador de gases, promovendo a queima dos gases durante 42 % do tempo total do processo nas carbonizações que utilizaram toras de maior diâmetro e 35% nas de menor.

O gasto de combustível auxiliar para abastecimento da câmara de combustão foi considerado pequeno para ambas as classes de diâmetro avaliadas nesse estudo.

A determinação do perfil térmico da fornalha permitiu o reconhecimento de algumas falhas de dimensionamento da câmara de combustão, além de ter indicado a evolução da temperatura em seu interior ao longo do processo, auxiliando em sua operação.

As temperaturas médias medidas durante o funcionamento da câmara de combustão evidenciaram o grande potencial energético que pode ser aproveitado a partir da queima dos gases oriundos da carbonização.

Houve redução da concentração de metano e monóxido de carbono emitidos durante com a combustão dos gases na fornalha avaliada, tendo conseguido uma redução de média de 76,45 kg de CO<sub>2</sub>e por tonelada de carvão produzido.

Outros estudos para verificar as dimensões corretas, bem como as melhores características construtivas do sistema de combustão devem ser conduzidos para melhorar o desempenho da fornalha, e conseqüentemente o aproveitamento da energia gerada no processo.

A utilização da madeira de menor classe de diâmetro avaliada nesse estudo teve maior rendimento em carvão vegetal e um menor tempo de carbonização, refletindo em uma maior produtividade para o sistema de carbonização utilizado. No entanto, em termos de produtividade deve-se levar em consideração além dessas variáveis, outras relacionadas ao processo de produção de carvão vegetal.

## **RECOMENDAÇÕES**

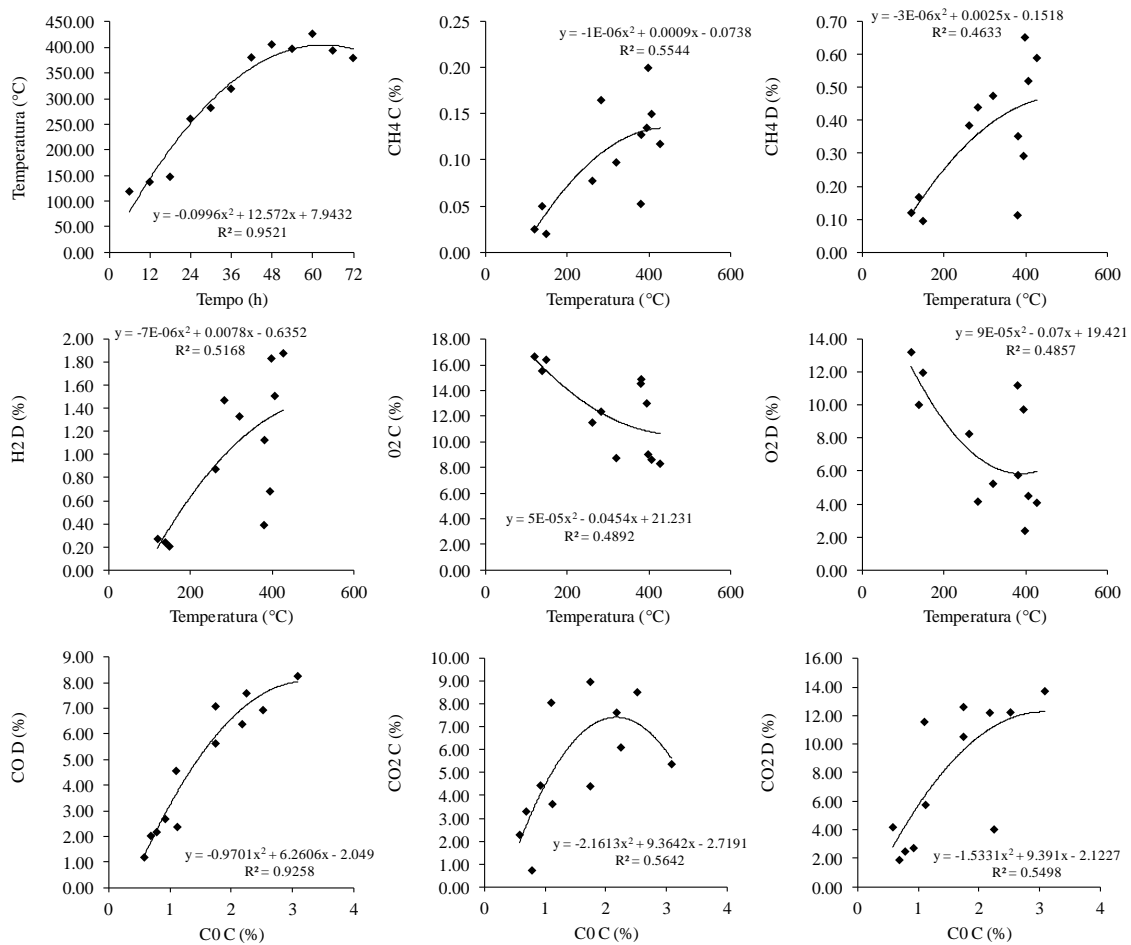
Recomenda-se outros estudos para o redimensionamento do estrangulamento da câmara de combustão da fornalha, a fim de conseguir o tempo de residência dos gases da carbonização adequado para que as reações de oxidação dos gases se concentre na câmara de combustão.

O consumo de combustível auxiliar para manter a temperatura interna da câmara de combustão será menor a partir do momento em que se utilize mais fornos acoplados a uma mesma fornalha, carbonizando de modo sincronizado, com o intuito de aumentar a sua eficiência de queima dos gases combustos da carbonização.

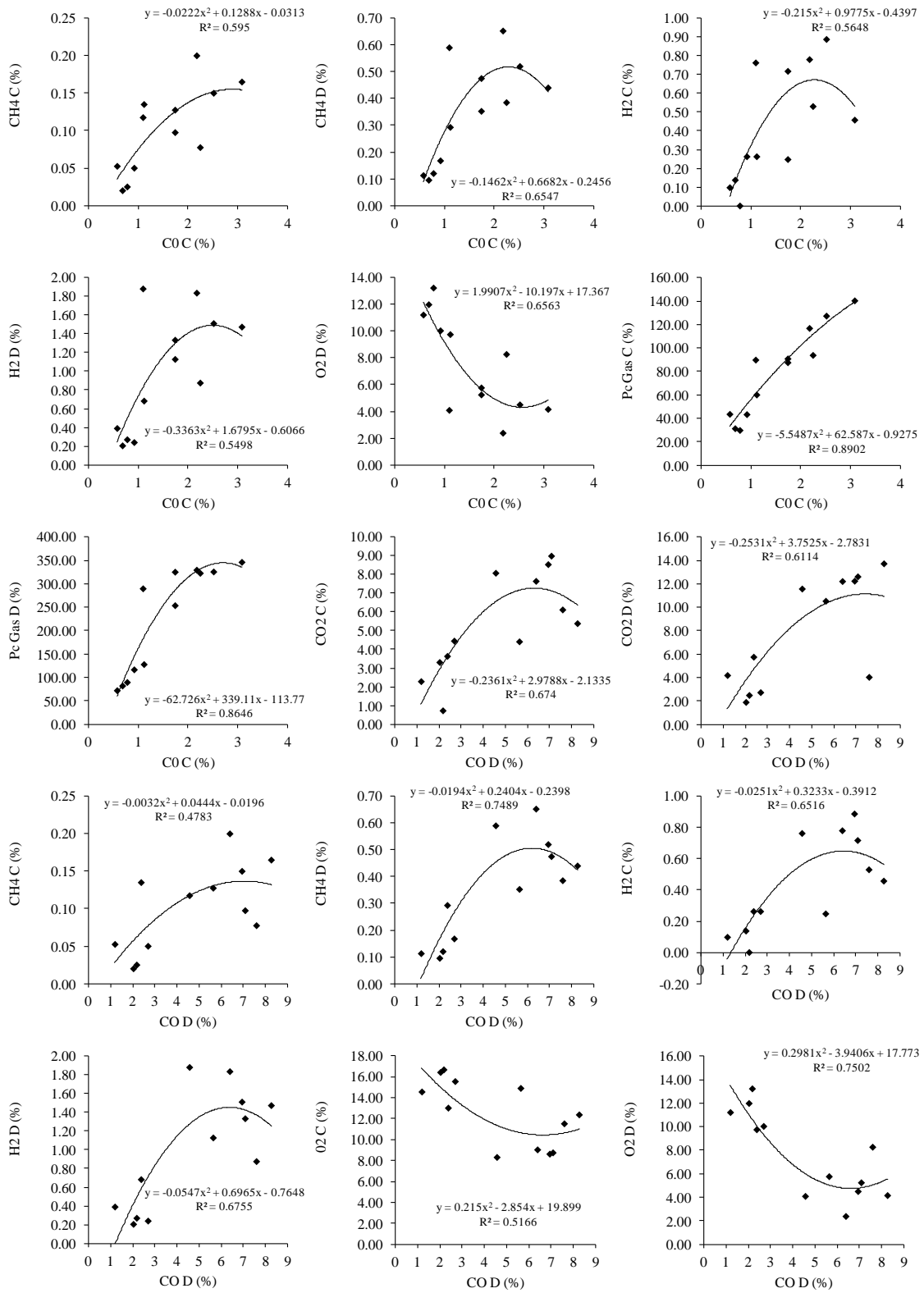
Recomenda-se novos estudos do sistema avaliado que visem o aproveitamento da energia térmica gerada na fornalha durante a combustão dos gases da carbonização.

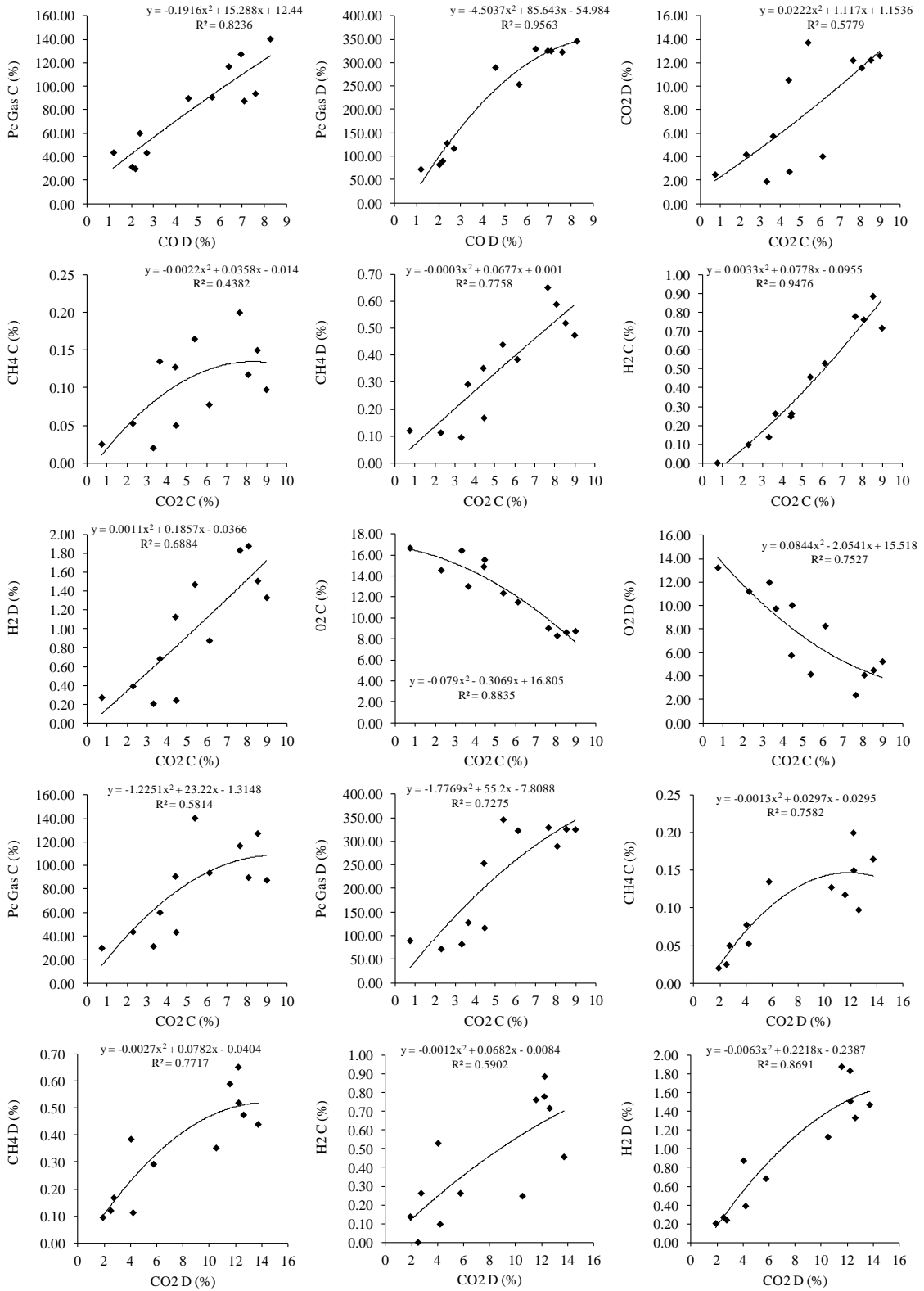
Recomenda-se que, para se obter um carvão vegetal com características desejáveis para os diferentes fins, é necessário além da correta condução do processo, que a madeira a ser carbonizada não tenha uma alta amplitude de classe diâmetro, evitando assim uma produção de carvão com propriedades heterogêneas. Essa maior amplitude também dificulta o arranjo das peças dentro do forno, aumenta o tempo de enchimento, e conseqüentemente aumenta os custos de produção.

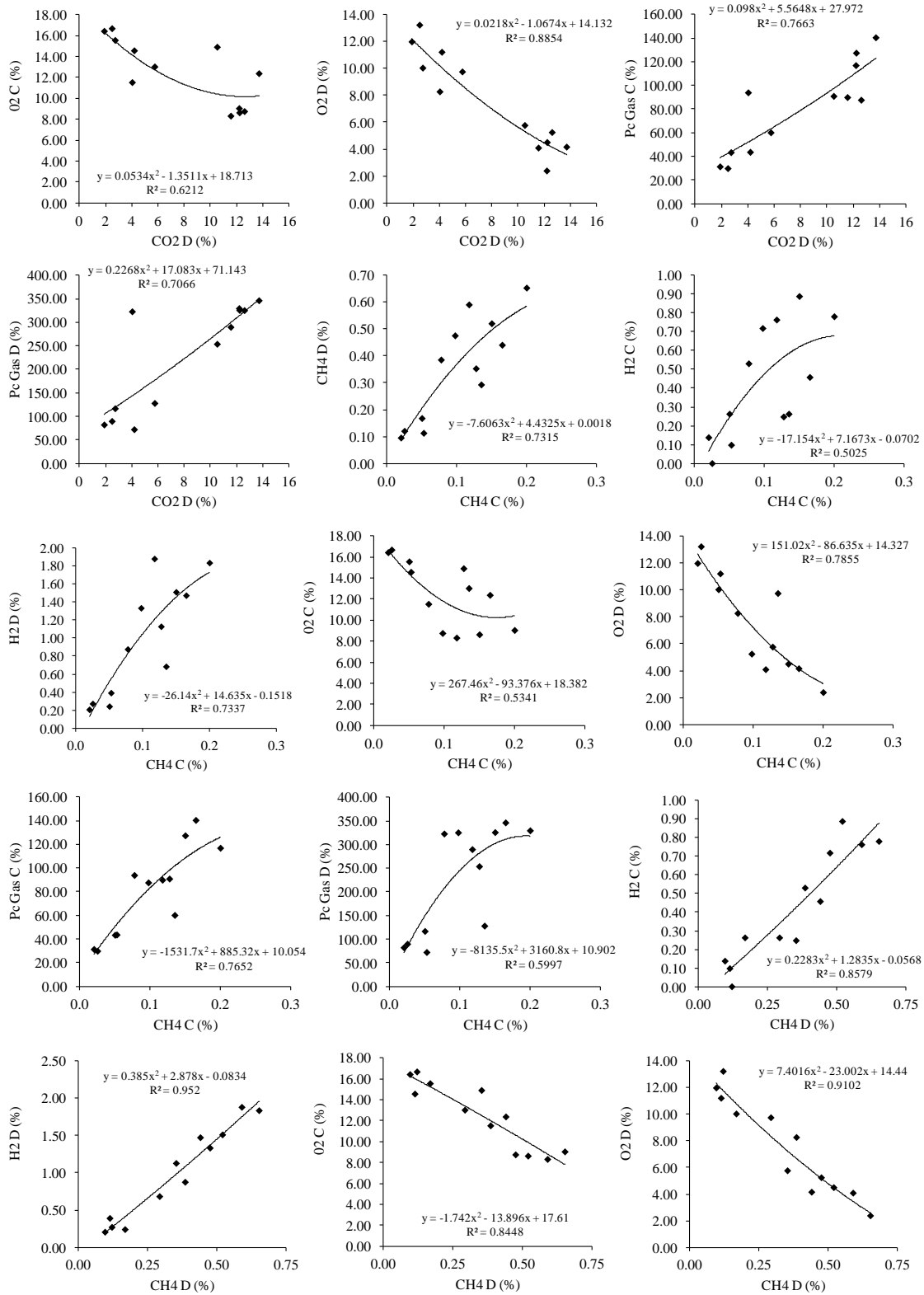
## ANEXO

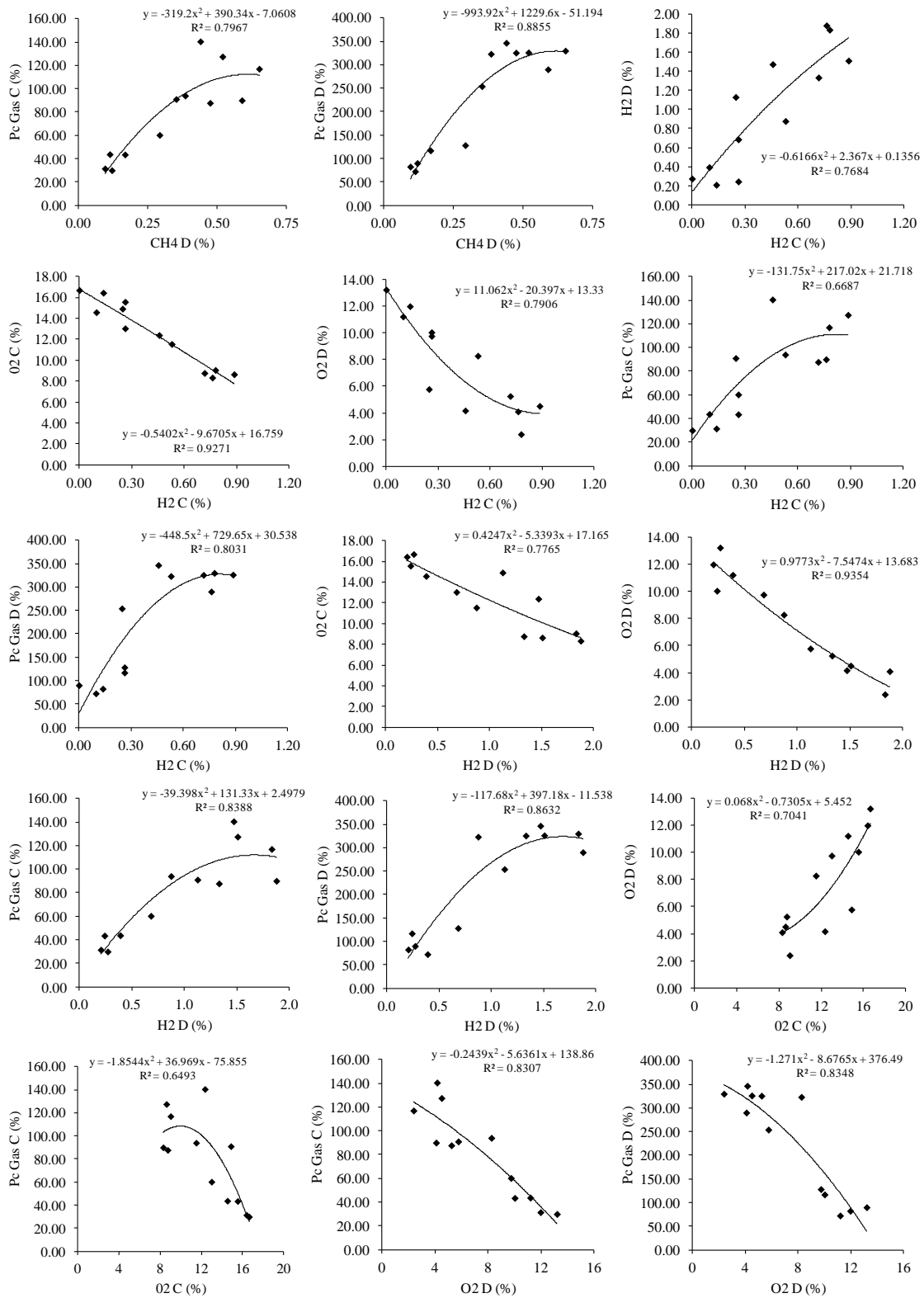












**Figura 1.** Relação entre as temperaturas médias do forno e as emissões de gases da carbonização.