

ARTUR QUEIROZ LANA

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

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2014

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

T

Lana, Artur Queiroz, 1985-

L243d                    Desenvolvimento e avaliação de uma fornalha metálica para  
2014                    combustão dos gases da carbonização da madeira / Artur Queiroz  
Lana. – Viçosa, MG, 2014.

vi, 61f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.51-61.

1. Gases estufa. 2. Monóxido de carbono. 3. Metano.  
4. Redução das emissões. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-  
graduação em Ciência Florestal. II. Título.

ARTUR QUEIROZ LANA

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

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

Aprovada: 18 de junho de 2014.

---

Benedito Rocha Vital  
(Coorientador)

---

Ana Márcia M. L. Carvalho  
(Coorientadora)

---

Daniel Camara Barcellos

---

Márcio Arêdes Martins

---

Angélica de Cássia O. Carneiro  
(Orientadora)

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio ao projeto.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior de Minas Gerais (SECTES), pelo financiamento do projeto.

À Embrapa Floresta, pela concessão da bolsa de iniciação científica aos estudantes de graduação do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM– DEF/UFV) que colaboraram na pesquisa.

À minha orientadora, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, pela orientação, pela compreensão e pelos ensinamentos durante mais esta etapa.

Aos meus pais, Soraya e Júlio, e aos meus irmãos, Gabriel e Túlio, por acreditarem em mim e pelo apoio.

À Ana Luiza, por todo amor, companheirismo, paciência e dedicação durante estes anos ao meu lado.

Aos meus amigos e familiares, pelo incentivo e pela ajuda.

Ao Polo de Excelência em Floresta, pelo apoio ao projeto.

Ao Engenheiro Daniel Camara Barcellos, pelas contribuições na elaboração do projeto e no desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores Benedito Rocha Vital, Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho e Márcio Arêdes Martins, pelos ensinamentos e pelas contribuições durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus amigos funcionários do LAPEM, em especial ao Salvio e Éder, pela ajuda, parceria e perseverança; e a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste experimento.

## BIOGRAFIA

ARTUR QUEIROZ LANA, filho de Soraya Santoro Queiroz e de Júlio César Bicalho Lana, nasceu em 29 de junho de 1985, na cidade de Ouro Preto, Minas Gerais.

Em 2008, ingressou no curso de Engenharia Florestal, na Universidade na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais.

Em janeiro de 2011, concluiu o curso de Engenharia Florestal e, em novembro de 2012, iniciou o curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal, em nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa.

Em junho de 2014, concluiu os requisitos necessários à obtenção do título de *Magister Scientiae*.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
3.1. Contexto nacional do carvão vegetal .....	5
3.2. Fornalhas para queima de gases da carbonização .....	6
3.3. Carbonização da madeira e combustão de gases .....	12
3.3.1. Fundamentação teórica .....	12
3.3.2. Combustão dos gases da carbonização .....	16
3.3.3. Composição dos gases ao longo da carbonização.....	18
3.4. Fornalhas para combustão dos gases da carbonização.....	19
3.5. Mitigação dos impactos ambientais .....	21
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
4.1. Forno .....	23
4.2. Transporte dos gases até a fornalha .....	24
4.3. Dimensionamento da fornalha metálica .....	24
4.3.1. Base de alvenaria da fornalha .....	24
4.3.2. Fornalha metálica .....	26
4.4. Carbonização da madeira.....	28
4.5. Funcionamento da fornalha .....	31
4.5.1. Instrumentação da fornalha.....	31
4.5.2. Operação da fornalha.....	31
4.5.3. Coleta e caracterização dos gases da carbonização .....	32
4.6. Propriedades do carvão vegetal .....	33
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>35</b>
5.1. Rendimento e propriedades do carvão vegetal .....	36
5.2. Perfil térmico do forno .....	39
5.3. Parâmetros da fornalha .....	40
5.4. Perfil térmico da fornalha .....	41
5.5. Análise dos gases da carbonização .....	43
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>49</b>
<b>7. RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>50</b>
<b>8. LITERATURA CITADA .....</b>	<b>51</b>

## RESUMO

LANA, Artur Queiroz, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2014. **Desenvolvimento e avaliação de uma fornalha metálica para combustão dos gases da carbonização da madeira.** Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Coorientadores: Benedito Rocha Vital e Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho.

Este estudo teve por objetivo desenvolver e avaliar o desempenho de uma fornalha metálica para combustão dos gases da carbonização da madeira, para a redução das emissões de gases poluentes e geradores do efeito estufa na produção de carvão vegetal. Foram realizadas cinco carbonizações, com faixas de temperatura de carbonização predefinidas, utilizando-se madeira de *Eucalyptus* sp., na Unidade Experimental de Carvão Vegetal da Universidade Federal de Viçosa - MG. O rendimento gravimétrico, as propriedades do carvão vegetal, os perfis térmicos do forno e da fornalha e os seus parâmetros de funcionamento foram determinados. Para caracterização dos gases não condensáveis, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, foram realizadas coletas com intervalo de 1 hora durante o processo. Por meio de um analisador de gases foram determinadas as concentrações antes e após a fornalha para averiguar a redução das emissões de gases tóxicos nocivos ao homem e ao meio ambiente. O rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal foram satisfatórios tanto para uso siderúrgico como para o uso doméstico. Concluiu-se que a fornalha funcionou adequadamente, ocorrendo em tempo médio de combustão dos gases de 42% do tempo total de carbonização, e com reduzido consumo de combustível auxiliar. A combustão dos gases na fornalha levou à redução média de 86% de monóxido de carbono e 88% de metano durante o período em que houve combustão, o que contribui para salubridade local e redução da emissão de gases tóxicos e geradores do efeito estufa.

## ABSTRACT

LANA, Artur Queiroz, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, June of 2014. **Development and evaluation of a metal furnace for combustion of wood carbonization gases.** Adviser: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Co-Advisers: Benedito Rocha Vital and Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho.

This study aimed to develop and evaluate the performance of a metal furnace for combustion of gases produced by wood the wood carbonization, for the reduction of pollutant and greenhouse gases emissions. Five carbonizations were performed, with temperature ranges predefined, using *Eucalyptus* sp. Wood, in the Charcoal Experimental Unit of the Federal University of Viçosa - MG. The gravimetric yield, the charcoal properties, the thermal profile of the kiln and the furnace, and the furnace operating parameters were measured. To characterize the non-condensable gases, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> were made collections with interval of one hour during the process. The gases concentrations before and after the furnace during carbonization were determined using a gas analyzer, checking the reduction of the harmful to humans and the environment toxic gas emissions. The gravimetric yield and quality of charcoal were satisfactory for ironmaster and domestic use. It was concluded that the furnace functioned properly, occurring an average gases burning time of 42% of the total carbonization time, and reduced consumption of auxiliary fuel. The gases combustion in the furnace resulted in a mean reduction of 86% carbon monoxide and 88% methane during the period in which the combustion occurred, contributing to the health of local and reduction in emission of toxic and greenhouse generators gases.

## 1. Introdução

A crescente pressão para redução dos impactos ambientais, aliada à necessidade de expansão do fornecimento de energia, vem gerando possibilidades de pesquisa e desenvolvimento de fontes energéticas alternativas aos tradicionais combustíveis fósseis. Dentre as diversas linhas de pesquisas, destacam-se as que envolvem o uso de biomassa. As biomassas são fontes renováveis que possuem potencial energético com menor grau de complexidade de utilização e de processos de beneficiamento.

Um dos setores de base da economia brasileira que demanda grandes quantidades energéticas é o de siderurgia, onde a utilização da biomassa carvão vegetal se destaca como importante insumo da cadeia produtiva. O carvão, além de ser agente redutor do minério de ferro, como fonte de carbono, também fornece energia para o processo, substituindo o coque de carvão mineral, fonte não renovável de energia e de maior potencial poluidor.

No Brasil, o carvão vegetal destina-se quase exclusivamente ao setor siderúrgico, para redução do minério de ferro para produção de ferro-gusa, aço e ferro-ligas. Um percentual menor é destinado às indústrias cimenteira e ceramista, ao uso comercial em churrasqueiras e padarias, além do uso residencial para cocção de alimentos e aquecimento (ABRAF, 2012). O plantio de eucalipto destinado à produção de carvão vegetal corresponde a 19,5% do total de áreas plantadas, ficando atrás apenas do setor de celulose e papel (ABRAF, 2013).

É importante destacar que a siderurgia a carvão vegetal a partir de florestas plantadas gera aproximadamente 21.531 empregos diretos, 226.080 indiretos e 828.961 por efeito de renda, totalizando 1.076.573 empregos (MTE, 2012).

Apesar de algumas empresas terem avançado no sentido de industrializar o processo de produção do carvão vegetal, a maior parte do carvão vegetal brasileiro é produzida em pequenos fornos de alvenaria, de forma muito empírica. Esses fornos possuem baixa capacidade volumétrica e baixo controle de qualidade do processo, culminando em um produto final com qualidade e rendimento variável e inferior ao desejável, diante da tecnologia já existente.

Além dos problemas tecnológicos referentes ao aumento da produtividade, a conversão da madeira em carvão vegetal emite grande

quantidade de gases poluentes na atmosfera, gerando um grande passivo ambiental. Junto com os gases é desprendida energia térmica em forma de calor, que é simplesmente dissipada no ambiente. Portanto, há importantes fatores relacionados à redução de emissões de poluentes e ao aproveitamento energético a serem pesquisados para melhor eficiência e qualidade do processo produtivo.

Percebe-se, então, que para redução das emissões de gases geradores de efeito estufa, melhoria das condições de salubridade das Unidades Produtoras de Carvão Vegetal (UPCs) e aproveitamento energético, o setor vem investindo e pesquisando fornalhas para combustão dos gases desprendidos durante a carbonização.

Nesse processo de combustão dos gases é desprendida grande quantidade de energia, que pode ter diferentes destinos. Entretanto existe uma forte tendência de essa energia ser aproveitada na secagem prévia da madeira, diminuindo sua umidade, o que reduz seu efeito negativo no rendimento gravimétrico e na qualidade do carvão vegetal, que conseqüentemente gera a diminuição de produtividade das UPCs. Contudo, para que essas tecnologias sejam implantadas, elas devem ser eficientes e de custo acessível.

Diferentes protótipos de fornalhas para combustão dos gases da carbonização da madeira estão sendo desenvolvidos e avaliados, sendo possível encontrar alguns em testes em UPCs de empresas que dispõem de recursos e que possuem maior nível de comprometimento ambiental, uma vez que ainda não existe lei ou regulamentação para queima dos gases do processo produtivo do carvão vegetal.

Apesar dos avanços na área de queima dos gases da carbonização e da implantação de algumas fornalhas pelas empresas, ainda são necessárias pesquisas para obter a melhor relação custo-benefício do sistema, pois existem barreiras técnicas a serem superadas. Algumas dificuldades encontradas são a heterogeneidade dos gases, o transporte dos gases, os materiais construtivos para as fornalhas, o dimensionamento, o sincronismo dos fornos, dentre outros. Ressalta-se também que o gás da carbonização tem baixo poder calorífico nas fases iniciais do processo, em relação às últimas fases, devido à grande concentração de vapor d'água advindo da secagem da madeira, o que faz com

que se tenha um elevado consumo de combustível auxiliar na fornalha para combustão dos gases.

Algumas fornalhas para combustão de gases da carbonização já foram desenvolvidas, no entanto são de alvenaria e fixadas próximas aos fornos, sem padrão definido, uma vez que se trata de uma tecnologia nova e ainda não completamente dominada, não se encontrando disponível no mercado.

As fornalhas metálicas são uma nova alternativa para atendimento a essa demanda, e após sua validação em campo podem ser replicadas em escala industrial, permitindo que sejam produzidas comercialmente. Essas fornalhas metálicas podem ser deslocadas para o aproveitamento em outros fornos, se necessário, o que não acontece com as fornalhas de alvenaria. Sua mobilidade e seu *design* compacto permitem que as fornalhas metálicas sejam utilizadas tanto em UPCs já existentes quanto em novos projetos. Além de contribuírem para a redução de gases tóxicos ao homem e geradores do efeito estufa, essas fornalhas geram também uma grande quantidade de energia térmica, que pode ser aproveitada para diferentes usos.

## 2. Objetivos

### **Principal:**

- Desenvolver e avaliar o desempenho de uma fornalha metálica para combustão dos gases da carbonização da madeira, para redução das emissões de gases poluentes na produção de carvão vegetal.

### **Específicos:**

- Avaliar o efeito do uso da fornalha metálica na redução das concentrações dos gases não condensáveis da carbonização da madeira, por meio de um analisador de gases.
- Avaliar o efeito do uso da fornalha metálica no rendimento gravimétrico do carvão vegetal e nas suas propriedades físicas e químicas.
- Obter os parâmetros de funcionamento da fornalha metálica.
- Obter o perfil térmico do forno durante as etapas de carbonização.
- 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.

### **3. Referencial teórico**

#### **3.1. Contexto nacional do carvão vegetal**

As constantes pressões socioambientais, políticas e econômicas vêm motivando diversas pesquisas no setor energético, em busca de fontes de energia mais sustentável para o mundo atual. A racionalização e a minimização dos gastos energéticos, aliadas ao aumento da eficiência de processos, são buscas constantes dos pesquisadores. Portanto, o aproveitamento de subprodutos e da energia dissipada é importante para atingir essas metas.

Com forte potencial energético, a energia da biomassa é uma fonte limpa, ambiental e socialmente aceita, sendo ainda uma maneira de aproveitamento indireto da energia solar, por meio da fotossíntese. Além disso, apresenta benefício ambiental devido à fixação de carbono, principal elemento componente dos gases de efeito estufa. Dentre as biomassas, o carvão vegetal destaca-se como fonte potencial substituta de derivados fósseis, como o coque de carvão mineral no setor de ferro-gusa, aço e ferro-ligas.

Atualmente o Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal (ABRAF, 2012). Os principais destinos são os setores de ferro-gusa e aço, que consomem 76% do carvão vegetal produzido; de ferro-ligas, que utiliza 10%; seguido do residencial, com 9,7% (cocção e aquecimento residencial), e do comercial e industrial (excluindo-se a siderurgia), com destaque para a produção de cimentos e para a indústria química e de alimentos (EPE, 2012).

Ressalta-se que a cadeia produtiva do carvão vegetal está ligada ao setor siderúrgico e que os polos da siderurgia concentram-se em estados com grandes reservas de minério de ferro e área de floresta plantada. As principais reservas de minério de ferro estão localizadas nos Estados de Minas Gerais (72,2%), Pará (22,3%), Mato Grosso do Sul (4,3%) e São Paulo (1,0%), onde estão cerca de 60% dos plantios de eucalipto. Os demais Estados contam com apenas 0,2% das reservas do minério do País (VITAL; PINTO, 2011).

No Brasil tem-se observado que a produção de carvão vegetal enfrenta inúmeros desafios, desde oscilações do mercado até problemas técnicos, de operação de fornos, baixa produtividade e qualidade variável de matéria-prima.

Outro grande problema enfrentado pelo setor é a emissão de gases poluentes, resultantes da transformação da madeira em carvão vegetal.

O carvão vegetal é produto da carbonização, processo de degradação térmica da madeira, geralmente realizado em fornos de alvenaria, com baixo controle de processo e pouco eficientes. Segundo Brito (2010), 60% dos fornos utilizados são do tipo rabo-quente; 10% são fornos de superfície; 20% são fornos retangulares; e os 10% restantes utilizam outros tipos de tecnologias. Segundo Oliveira (2012), os fornos rabo-quente e de superfície apresentam, de modo geral, baixo rendimento mássico, cerca de 20 a 30% na conversão da madeira em carvão vegetal, e não possuem dispositivos que permitam o aproveitamento dos subprodutos gasosos e líquidos, que são perdidos durante o processo, como CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, etc., e as frações pirolenhosas, como alcatrões, ácido acético, álcool metílico, dentre outras.

A subjetividade empregada no controle do processo de carbonização da madeira pela experiência do operador, também chamado de carbonizador, e os variados formatos e tamanhos dos fornos tornam o processo irregular e de difícil controle, culminando em baixo rendimento. Nesses fornos rudimentares de alvenaria não existe a possibilidade de mecanização e de controle das emissões, sendo eles adotados pelos pequenos e médios produtores, responsáveis por cerca de 80% da produção total de carvão (OLIVEIRA, 2009).

Segundo Brito *et al.* (2013), recentemente tem-se observado o interesse pela rota da combustão em fornalhas dos gases gerados durante a produção do carvão vegetal. O aproveitamento desses gases visa à redução de emissões gasosas, o que por si só significaria uma grande contribuição ambiental, como também a possibilidade de obtenção de energia térmica, em uma primeira etapa, e talvez elétrica, em uma etapa mais avançada de desenvolvimento.

### **3.2. Fornalhas para queima de gases da carbonização**

Para diminuir as emissões geradas durante a carbonização, tem sido realizada a combustão em queimadores ou fornalhas, que são dispositivos projetados para obter maior eficiência da combustão e possibilidade de aproveitamento da energia térmica liberada durante o processo. 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<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. No caso de queima completa desses gases, as emissões seriam constituídas apenas de CO<sub>2</sub>, vapor d'água e energia na forma de calor (CARDOSO, 2010).

Cardoso (2010) e Costa (2012) afirmam que as fornalhas conferem aspecto salubre às unidades de produção de carvão vegetal e contribuem para o processo de carbonização, realizando a exaustão de gases do interior do forno, em função da pressão manométrica negativa gerada no sistema pela chaminé do queimador.

O desenvolvimento de uma câmara de combustão 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).

Ao longo dos últimos anos diferentes projetos de fornalhas foram elaborados para combustão dos gases da carbonização, iniciando-se com Barcellos (2002), que avaliou o desempenho de um forno tipo *container* com capacidade de 1,5st de lenha, dotado de fornalha para combustão dos gases, inovando tecnologicamente a ideia de “incineração da fumaça”. O projeto teve como base uma fornalha projetada para aquecimento direto de grãos, construída com tijolos comuns e refratários, areia lavada, terra, melão de açúcar, brita, cimento, ferragens e chapas metálicas (BARCELLOS *et al.*, 2004).

Posteriormente, a partir da produção do carvão vegetal em bateladas em fornos *containers*, originou-se o processo de carbonização em cilindros metálicos verticais (PCCMV). Nesse sistema os gases advindos da carbonização são canalizados para uma fornalha e, após a sua queima, o gás quente é utilizado para secagem da lenha (COLOMBO *et al.*, 2006).

A tecnologia de queima de gases da carbonização chegou às grandes empresas em 2006, e desde então estão em estudo para aumento de sua

eficiência, incluindo arquitetura, materiais, diferentes potenciais térmicos e sistemas de exaustão natural ou forçada (BARCELLOS, 2010). Além disso, buscam-se métodos para o aproveitamento da energia térmica gerada no processo, seja para secagem da madeira a ser introduzida nos fornos ou para cogeração de energia elétrica.

A ArcelorMittal BioFlorestas iniciou a implantação de fornalhas para queima de gases em 2006, na unidade produtora de carvão vegetal de Martinho Campos, Minas Gerais, e em novembro de 2010 iniciou um projeto, ainda em andamento, em parceria com a Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig. Este projeto inclui tecnologia é capaz de aproveitar as emissões liberadas no processo produtivo do carvão vegetal para gerar energia elétrica. O projeto consiste em transportar gases gerados pela carbonização da madeira até uma turbina de queima externa, responsável por fornecer a potência necessária para gerar eletricidade. Na unidade de produção de Martinho Campos, 12 fornos retangulares foram adaptados para enviar os gases de carbonização a um queimador central, onde se encontra a turbina. Se toda a produção de carvão vegetal da empresa, que atualmente gira em torno de 400 mil toneladas anuais, fosse adaptada para essa finalidade, estima-se que a energia gerada seria de até 30 MW. Para se ter uma ideia desse potencial, o município de Martinho Campos, com 12 mil habitantes, é abastecido com 2 MW (ARCELORMITTAL, 2013).

Em 2008 a Viena Siderúrgica S.A. interligou 16 fornos retangulares a um queimador central, com o objetivo de extinguir os gases poluentes provenientes do processo de carbonização e pleitear crédito de carbono. O modelo de fornalha foi adaptado de outro já existente no mercado, cujo projeto original foi desenvolvido no Rio Grande do Sul e adaptado para fornos retangulares, valorizados pelos ganhos ambientais, energéticos e econômicos (VIENA SIDERÚRGICA S.A., 2013).

A partir de então surgiram a tecnologia *container* em escala industrial, desenvolvida pela empresa Bricarbrás do grupo Hübner, e o sistema DPC (*Dry-Pyrolysis-Carbonization*), no qual as funções de secagem da madeira, carbonização e resfriamento do carvão vegetal se processam simultânea e independentemente em reatores de carbonização, onde os gases gerados são direcionados para uma fornalha para combustão. Posteriormente, a energia gerada é utilizada para secagem da madeira. Salienta-se que essas

tecnologias estão em fase de comprovação na escala industrial (SAMPAIO, 2008).

Cardoso (2008) constatou o desempenho de uma fornalha de alvenaria, avaliando a eficiência na redução de emissões em um sistema forno-fornalha, no rendimento e nas propriedades do carvão vegetal. O autor verificou que a queima dos gases na fornalha foi eficiente, pois reduziu em mais de 90% a emissão de metano e monóxido de carbono.

Oliveira *et al.* (2013) avaliaram um sistema de três fornos circulares de superfície conectados através de dutos a uma fornalha central, ambos construídos com tijolos maciços cerâmicos. Cada forno tinha capacidade de 12 estéreos de madeira. A fornalha adaptada aos fornos foi de formato cilíndrico, sendo composta por um sistema de alimentação dos gases, uma câmara de combustão, um sistema de admissão de ar primário e uma chaminé. Nessa configuração, a chaminé foi construída sobre a fornalha, que funcionou adequadamente, realizando a combustão dos gases durante um terço do tempo total de carbonização, sem a necessidade de abastecimento com resíduos lignocelulósicos.

Coelho (2013) construiu e avaliou o desempenho de uma fornalha dotada de câmara de combustão em alvenaria e chaminé em estrutura metálica, para queima dos gases da carbonização da madeira. Os resultados indicaram que a câmara de combustão mostrou-se eficiente, reduzindo em 99,8% a emissão de metano e em 74,14%, a emissão de monóxido de carbono. A queima dos gases não afetou o rendimento e as propriedades do carvão vegetal, que permaneceram dentro da faixa recomendada para uso siderúrgico. O desempenho da câmara de combustão foi considerado satisfatório, tendo em média queima contínua durante 32% do tempo total de carbonização. No entanto, foram recomendadas modificações para melhoria da câmara de combustão, para reduzir o consumo de resíduos que a alimentam, principalmente na fase inicial do processo de carbonização, quando os gases emitidos apresentam baixo poder calorífico.

Além dos sistemas apresentados, existem outras tecnologias para produção de carvão vegetal, como os sistemas de retortas verticais contínuas, que também fazem combustão de gases advindos da carbonização. Em 1986 foi instalado pela Acesita, atual Aperam Bioenergia, um sistema de carbonização contínua em Turmalina - MG. Esse sistema consistia de um forno

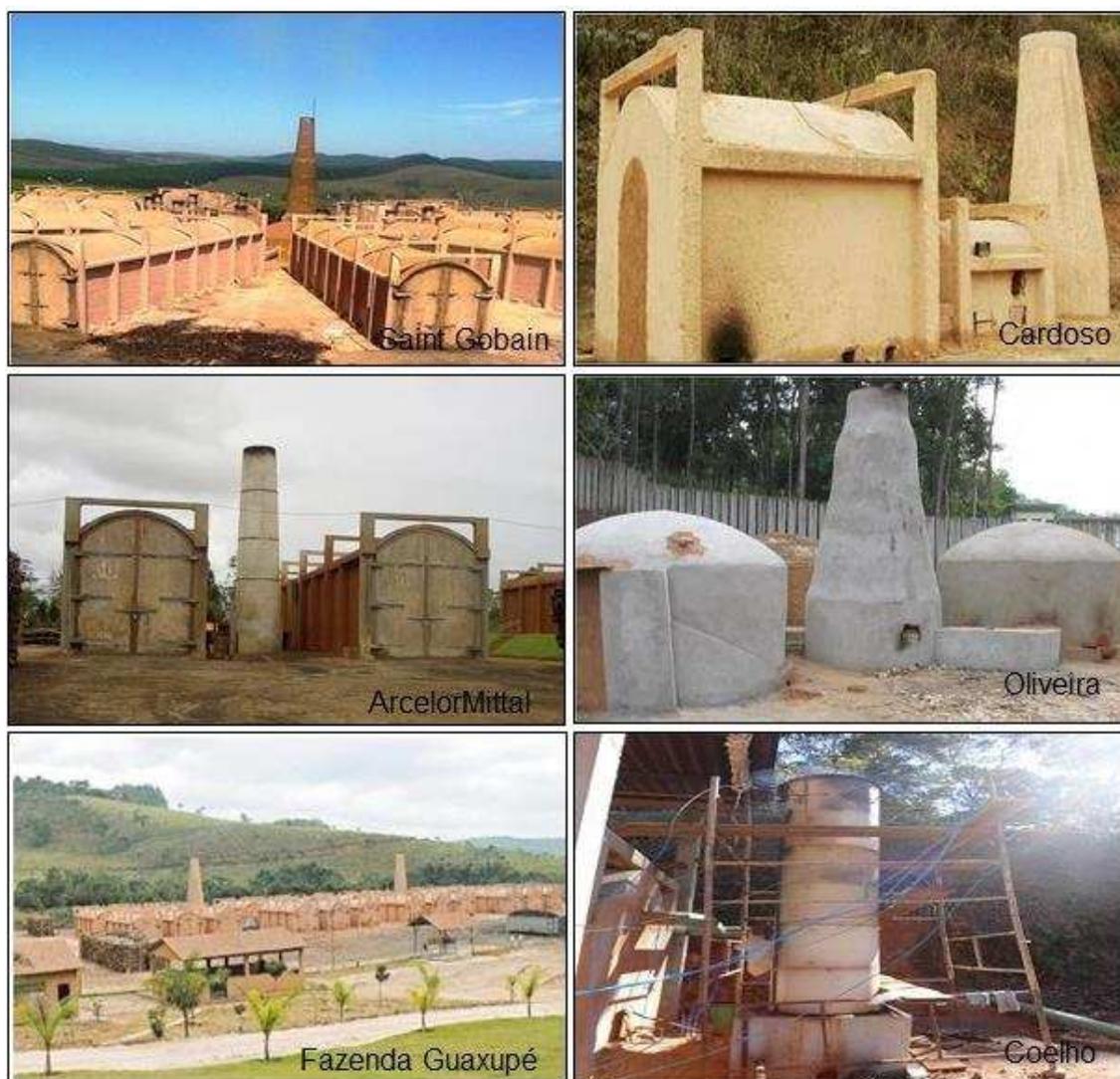
metálico cilíndrico e vertical, conhecido por retorta, que operou somente até 1993 (LATORRE; CUNHA, 2006). Segundo Pinheiro *et al.* (2006), a retorta tinha capacidade produtiva de 3.000 MDC (metros de carvão) por mês, tempo total de carbonização e resfriamento de cerca de 10 horas e rendimento em carvão entre 30 e 38%.

Hoje apenas uma retorta encontra-se em operação no Brasil, pertencente à empresa Vallourec, à qual se denominou de processo Carboval. Deve ser ressaltado que esse processo está em fase experimental na UPC de Paraopeba-MG, com pacote tecnológico francês, nomeado de sistema *Lambiotte Premery*. O sistema, que iniciou operação em abril de 2008, é mais avançado em termos de maior eficiência do balanço de massas, energia e melhor homogeneidade do carvão vegetal produzido (SCHOUT; MECCA, 2008).

Em maio de 2013, a Fazenda Guaxupé, localizada na Zona da Mata mineira, município de Divinésia, iniciou o processo de combustão dos gases gerados a partir de 23 fornos retangulares de carbonização da madeira, com o objetivo de controlar 100% das emissões, utilizando duas fornalhas de alvenaria (COSTA, 2013).

Atualmente diferentes configurações de sistemas para combustão de gases encontram-se em estudo em algumas empresas, como a Aperam Bioenergia, Gerdau e Plantar.

A Figura 1 ilustra alguns desses sistemas em desenvolvimento instalados nas empresas e também nas universidades.



**Figura 1** - Ilustração de sistemas para combustão de gases da carbonização da madeira (coluna esquerda indústrias e coluna direita experimentais).

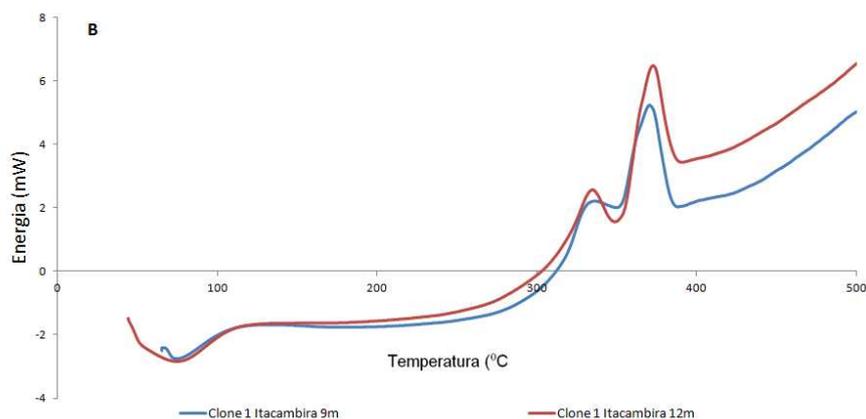
Vale salientar que a combustão dos gases da carbonização gera um adicional térmico que pode ser aproveitado na geração de energia elétrica, por meio de turbinas e geradores movidos a gás, ou acoplando-se a uma caldeira a vapor, ligada a uma turbina conectada a um gerador de eletricidade. Observa-se,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

### 3.3. Carbonização da madeira e combustão de gases

#### 3.3.1. Fundamentação teórica

Carbonização é a transformação térmica da madeira em carvão vegetal na ausência ou presença controlada de oxigênio ou ar, enquanto combustão é a transformação térmica em presença de oxigênio ou ar, em quantidade suficiente para promover sua decomposição completa (VALENTE; LELLES, 1983, citados por VITAL *et al.*, 1985).

Melo (2013) constatou para madeira de eucalipto, a partir da técnica de calorimetria diferencial exploratória, que o início da fase de liberação de energia se inicia em temperaturas próximas a 260 °C, passando o processo a ser exotérmico após 300 °C. O autor verificou que a temperatura do primeiro pico exotérmico foi próxima de 327 °C e do segundo pico próxima de 359°C, conforme a Figura 2.



**Figura 2** - Calorimetria diferencial exploratória (MELO, 2013).

Ainda de acordo com Mello (2013), até 100 °C ocorre grande absorção de energia devido à secagem da madeira, e posteriormente ocorre uma constância da curva até próximo de 260 °C. Somente a partir dos 300 °C que o processo de carbonização da madeira se torna exotérmico, liberando energia para o meio e acentuando o processo de degradação da madeira e a consequente liberação de gases.

Segundo Almeida e Rezende (1982), o objetivo maior da carbonização é aumentar o teor de carbono fixo na madeira, por meio de tratamento térmico. Para que isso aconteça é necessária a ocorrência de vários processos, tanto físicos como químicos. O processo de carbonização pode ser entendido ao estudar o comportamento dos três principais componentes da madeira, a

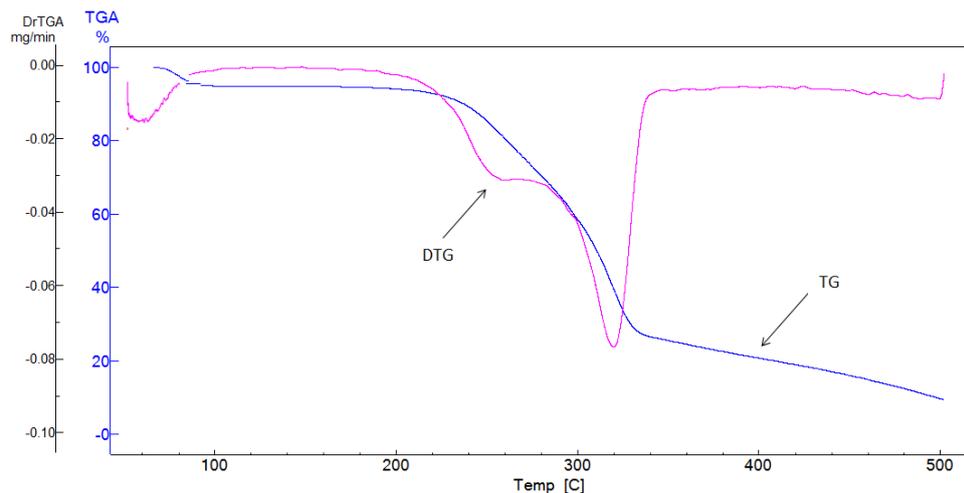
celulose, as hemiceluloses e a lignina. Quando se conhece o comportamento desses componentes é possível entender o processo da carbonização (OLIVEIRA *et al.*, 1982).

As hemiceluloses são os componentes menos estáveis à degradação térmica, devido à sua natureza amorfa, devendo ser ressaltado que sua degradação inicia-se em torno dos 250 °C, estando quase completa em torno dos 325 °C (OLIVEIRA, 1982). As hemiceluloses produzem mais gases não combustíveis e mais alcatrão do que a celulose, assim como a maior parte do ácido acético (BROWING, 1974; SHAFIZADEH; DeGROOT, 1976; LeVAN; WINANDY, 1990).

Já a celulose é o constituinte químico presente em maior quantidade na madeira e se decompõe a temperaturas entre 260 e 350 °C (SHAFIZADEH; DeGROOT, 1976), sendo responsável pela produção da maior parte dos voláteis inflamáveis (MARTINS, 1982).

Por fim a lignina, que contribui, predominantemente, para a formação de um resíduo sólido e rico em carbono. Possui estrutura altamente complexa e condensada e seu mecanismo de reação de degradação térmica é pouco conhecido. Embora a degradação da lignina se inicie em temperaturas mais baixas do que as observadas no caso das holoceluloses, o processo ocorre de uma forma mais lenta, por isso é o principal responsável pela formação do carvão residual, representando cerca de 50% da sua própria massa inicial, a uma temperatura final de 450 °C (SHAFIZADEH; DeGROOT, 1976).

A Figura 3 ilustra a degradação da madeira com a evolução da temperatura. As curvas termogravimétricas (TGA) indicam a perda de massa da madeira em função do tempo e da temperatura, e a curva termogravimétrica derivada (DTG) é a representação matemática da derivada primeira da curva termogravimétrica em função do tempo ou da temperatura. Ela permite definir com maior precisão o início e o final dos eventos térmicos e verificar a presença de eventos simultâneos, revelando o pico de degradação das hemiceluloses e posteriormente da celulose.



**Figura 3** - Representação das curvas termogravimétricas (TGA) e termogravimétrica derivada (DTG) (MELO, 2013).

O processo de degradação térmica dos elementos da madeira culmina não somente em carvão vegetal, mas também em diversos produtos contidos nos gases da carbonização, que podem ser classificados em três categorias: pós e partículas em suspensão, gases não condensáveis e compostos orgânicos condensáveis (MEZERETTE; GIRARD, 1996).

Da condensação da matéria volátil resultam o licor pirolenhoso e o alcatrão insolúvel. O licor pirolenhoso é composto de ácido pirolenhoso, definido como uma solução aquosa de ácidos acético e fórmico, metanol e alcatrão solúvel, além de outros constituintes menores. Os gases não condensáveis consistem de compostos gasosos de carbono  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$  (hidrocarbonetos de cadeia curta em geral) e hidrogênio. Tem-se então que os gases da carbonização são substâncias combustíveis ricas em carbono e hidrogênio, que em condições adequadas de temperatura e pressão, na presença de oxigênio, são capazes de sofrer reações químicas, ocorrendo liberação de energia sob a forma de luz e calor. Em uma queima completa, as emissões seriam constituídas apenas de  $\text{CO}_2$  e vapor d'água (BRITO, 1990).

As proporções entre os compostos produzidos na carbonização dependem do método de pirólise empregado, que variam em relação aos parâmetros do processo e das características específicas da biomassa empregada (COSTA, 2012). De modo geral, temperaturas e taxas de aquecimento elevadas maximizam o rendimento em gases.

O rendimento em gases não condensáveis aumenta linearmente com a elevação da temperatura, variando de 18 a 42%, para as temperaturas de 400 a 700 °C (SHEN *et al.*, 2010). Segundo Taccini (2011), esse comportamento reflete o fato de a formação dos gases da pirólise ser favorecida por reações térmicas como as de craqueamento, despolimerização, descarboxilação e oxidação, que são, portanto, favorecidas pelo aumento de temperatura da pirólise.

A emissão de gases não condensáveis foi dividida por González *et al.* (2003) em duas zonas distintas. A primeira ocorre entre 275 e 425 °C e se caracteriza pela ocorrência dos maiores picos de emissão de CH<sub>4</sub>, CO e CO<sub>2</sub>. A segunda zona ocorre a temperaturas acima de 450 °C, apresentando baixas concentrações de óxidos de carbono, metano e hidrogênio. Alguns autores relatam a emissão de gases não condensáveis como significativa acima de 150°C, no entanto a maior parte ocorre principalmente a temperaturas entre 200 e 500°C (TIHAY; GILLARD, 2003; GREENBERG *et al.*, 2006; FU *et al.*, 2009).

A liberação de CO<sub>2</sub> a baixas temperaturas ocorre principalmente pela quebra das ligações C=O, C-O e C-C das ramificações da cadeia principal das hemiceluloses, com pico em torno de 280 °C. Já em altas temperaturas, com máximo próximo aos 500 °C, sua emissão está relacionada ao craqueamento e à reforma de ligações COOH, C=O, C-C e OH situadas nas cadeias alifáticas de fenilpropano da lignina (YANG *et al.*, 2007).

A emissão de CO também está relacionada com as quebras dos grupos presentes nas ramificações e na cadeia principal das hemiceluloses e da celulose até os 450 °C. Acima dessa temperatura, o CO decorre da quebra de unidades monoméricas da lignina (ligações aril-éter), e após os 600 °C também é formado pelo craqueamento do alcatrão. A emissão de H<sub>2</sub> também está relacionada a essa reação (WANG *et al.*, 2009).

A lignina é o componente que mais contribui para a emissão de CH<sub>4</sub>. Abaixo dos 500 °C ocorre a quebra de seus grupos metoxila (O-CH<sub>3</sub>) e metileno (CH<sub>2</sub>), e a temperaturas elevadas há ruptura de seus anéis aromáticos (YANG *et al.*, 2007; FU *et al.*, 2010). Além disso, o CH<sub>4</sub> é formado pela ocorrência de reações secundárias entre os componentes gasosos, notadamente as de metanopiranólise, em torno dos 700°C (TIHAY; GILLARD, 2003).

### 3.3.2. Combustão dos gases da carbonização

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

Segundo Pennise (2014), a utilização de fornalhas para combustão dos gases diminui consideravelmente o aspecto visual e o efeito tóxico da emissão, cuja inalação pode desencadear doenças respiratórias e carcinomas, o que contribui positivamente para as condições de trabalho nas proximidades. Além disso reduzem os teores de gases nocivos ao ambiente, como o CH<sub>4</sub>, gás de efeito estufa (GEE) com grande potencial de aquecimento global, e o CO, que afeta indiretamente esse processo por participar de reações fotoquímicas que alteram os níveis de GEE na atmosfera. Outra vantagem é a liberação de energia térmica em sua reação, com grande potencial de aproveitamento.

Já redução de metano na produção do carvão promove uma adicionalidade ambiental aos projetos de créditos de carbono, tornando-os elegíveis como projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL). Costa (2012) afirmou que o aumento do nível de CO<sub>2</sub> resultante da reação de combustão não é negativo nesse aspecto, pois, muito embora ele seja um importante GEE, não está representado nas emissões líquidas da carbonização, uma vez que os plantios florestais promovem o sequestro desse gás, atingindo, no balanço geral, um saldo positivo de remoção.

A combustão dos gases da carbonização é uma alternativa viável para a sustentabilidade do setor produtivo de carvão vegetal, pois, além das vantagens já expostas, gera um adicional de calor suficiente para a secagem da lenha, diminuindo a necessidade de madeira para obtenção da mesma quantidade de carvão. Esse ganho em rendimento gravimétrico é mais um fator que, por si só, já contribui para a redução das emissões, uma vez que há relação linear negativa entre as emissões de CH<sub>4</sub> e o rendimento gravimétrico na produção de carvão vegetal (COLOMBO 2006; COSTA, 2012).

Segundo Duboc *et al.* (2007), a redução nas emissões de CH<sub>4</sub> decorrentes do processo de carbonização pode se dar por meio da implementação de melhorias tecnológicas e operacionais no projeto dos fornos e na operacionalização do sistema, que aumentem a eficiência do processo,

resultando em maior rendimento, menor custo de produção e menor impacto ambiental.

Atualmente as tecnologias que promovem a combustão dos gases liberados na carbonização demandam a instalação de fornalhas. De acordo com Magalhães (2007), elas são projetadas para assegurar a queima completa do combustível de modo eficiente e contínuo, visando ao aproveitamento da energia liberada, com o maior rendimento térmico possível. O projeto de uma fornalha deve ser baseado nos três Ts da combustão: temperatura, turbulência e tempo, para propiciar uma mistura ar-combustível homogêneos, na dosagem ideal e no tempo correto, permitindo o aquecimento do combustível até a sua ignição autossustentável e combustão completa (LOPES, 2002; MELO, 2003). Segundo os autores, as reações nas quais aparece monóxido de carbono nos produtos são incompletas e trazem prejuízos quanto ao aproveitamento energético do combustível em cerca de 70%.

A combustão dos gases no interior da fornalha só se efetiva depois de transcorrida a etapa inicial da carbonização, na qual há grande liberação de vapor d'água em função da secagem da madeira. À medida que a temperatura de carbonização se eleva, reduz-se a liberação de vapor e aumenta a de gases com alto poder calorífico, fornecendo, portanto, gás combustível para o processo da queima (COSTA, 2012).

A combustão ideal, designada de combustão completa, ocorre quando todo o carbono no combustível é oxidado para dióxido de carbono, todo o hidrogênio para água e todo o enxofre para dióxido de enxofre (CARVALHO JR.; MCQUAY, 2007).

As principais reações químicas que ocorrem devido à oxidação de um combustível constituído essencialmente por carbono, hidrogênio, enxofre e oxigênio são apresentadas nas equações da Figura 4.

Reagentes		Produtos da Reação	Entalpia da Reação (kJ.kg <sup>-1</sup> )
C + O <sub>2</sub>	→	CO <sub>2</sub>	- 33.613
C + ½ O <sub>2</sub>	→	CO	-10.004
CO + ½ O <sub>2</sub>	→	CO <sub>2</sub>	-23.609
2H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	→	2 H <sub>2</sub> O (líquida)	-143.000

**Figura 4** - Principais reações químicas envolvidas na oxidação dos elementos combustíveis C, H e entalpia da reação (LOPES, 2002).

Lopes (2002) acrescenta que além dos três elementos-chave da combustão (temperatura, combustível e oxigênio) deve-se garantir o equilíbrio entre eles para que ocorram as oxidações.

A quantidade ideal de ar para combustão de um sistema é definida estequiometricamente, que é a reação de oxidação teórica que determina a quantidade exata de moléculas de oxigênio necessária para efetuar a completa oxidação de um combustível (MAGALHÃES, 2007).

Além disso, no caso da queima de gases da carbonização, outro fator importante é a temperatura do gás liberado no forno de carbonização durante o processo, uma vez que para que ocorra sua combustão com eficiência e a chama permaneça dentro da câmara de combustão é preciso que esse gás atinja a temperatura de autoignição, sendo de 605 °C para o CO, 537 °C para o CH<sub>4</sub> e 571,2 °C para o H<sub>2</sub> (CARDOSO, 2010).

É importante salientar que o gás combustível responsável pela manutenção da chama é o monóxido de carbono, devido ao seu maior percentual. Segundo Gerber *et al.* (2010), nos processos de pirólise de madeira, em condições altamente controladas com baixa concentração de oxigênio e elevadas temperaturas, o CO é um dos constituintes principais do gás gerado, com concentrações acima de 27%. Já o CH<sub>4</sub>, altamente inflamável, apresenta concentrações de no máximo 5%. Segundo Law (2006), os limites de inflamabilidade do CO a 1 atm e 25 °C variam entre 12,5 e 74%, enquanto os limites do CH<sub>4</sub> variam entre 5 e 15%. Esses limites, no entanto, se alargam com o aumento da temperatura, o que reforça a necessidade do pré-aquecimento da câmara de combustão para possibilitar a ignição, queima e manutenção de chama com esses gases (COELHO, 2013).

### **3.3.3. Composição dos gases ao longo da carbonização**

A carbonização é discutida por vários autores como um fenômeno que acontece por fases, caracterizadas por regiões bem distintas 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.

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.

Na Tabela 1 estão as etapas do processo de carbonização da madeira e os principais produtos liberados.

**Tabela 1** – Etapas do processo de carbonização (QUIRINO, 2002)

Faixa de Temperatura (°C)	Pirólise
Até 200	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Processo endotérmico.</li> <li>✓ Liberação de H<sub>2</sub>O, traços de CO<sub>2</sub>, HCOOH, CH<sub>3</sub>COOH e glioxal.</li> </ul>
200 a 280	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Processo endotérmico.</li> <li>✓ Liberação de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, HCOOH, CH<sub>3</sub>COOH e glioxal e um pouco de CO.</li> </ul>
280 a 500	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Processo exotérmico.</li> <li>✓ Ocorrem reações secundárias com os produtos da pirólise primária.</li> <li>✓ Liberação de CO, CH<sub>4</sub>, HCHO, CH<sub>3</sub>COOH, CH<sub>3</sub>O.</li> </ul>
Acima de 500	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Reações de H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> com o carvão, formando CO, H<sub>2</sub> e HCHO.</li> <li>✓ Reações de pirólise dos gases efluentes.</li> </ul>

### 3.4. Fornalhas para combustão dos gases da carbonização

Lopes (2002) afirma que a fornalha projetada para um determinado objetivo deve apresentar dimensionamento adequado para garantir a combustão eficiente do combustível com o mínimo de excesso de ar para um ótimo funcionamento. Volumes pequenos de gases podem implicar combustão incompleta, levando à presença de componentes combustível nos gases que deixam a fornalha. Por outro lado, volumes grandes, por apresentarem maior superfície de irradiação, podem resultar em menor temperatura na câmara de combustão, podendo dificultar o processo de ignição do combustível.

O combustível auxiliar queimado na câmara de combustão da fornalha é fundamental para realizar a ignição do forno de carbonização, pois ocasiona um diferencial de temperatura necessário para gerar pressão manométrica negativa ao longo da chaminé que fará a exaustão dos gases de dentro do

forno, indispensável para o iniciar o processo. Também possui a função de servir como ignitor/chama-piloto para queima dos gases (COELHO, 2013).

Cardoso (2010) construiu e testou um sistema de forno-fornalha projetado para carbonização de 10 estéreos de madeira. A fornalha, posicionada entre o forno e a chaminé, foi construída em alvenaria e recebeu revestimento de manta cerâmica no interior. O sistema apresentou bom funcionamento, com redução das emissões de metano e monóxido. O autor constatou que as concentrações de metano foram reduzidas a valores próximos de zero com a combustão dos gases pela fornalha, passando de 0,293% para 0,015%, tendo redução de 96,95%.

Oliveira (2012) avaliou uma fornalha construída em tijolos cerâmicos maciços, adaptada ao forno de superfície. O autor obteve bons resultados com o sistema, e obteve uma média de 32% em rendimento gravimétrico de carvão vegetal, com a queima dos gases na fornalha ocorrendo durante 36 horas. Houve necessidade de abastecer a fornalha com material lignocelulósico durante as primeiras fases, até que o volume de gases com alto poder calorífico fosse suficiente para manutenção da chama. A queima de gases da carbonização ocorreu durante 24 horas, sem a necessidade de abastecimento, o equivalente a 34% do tempo total de carbonização.

Costa (2012), utilizando uma fornalha de alvenaria/metálica, encontrou rendimento gravimétrico do carvão vegetal próximo de 30,86% para combustão dos gases da carbonização. A autora verificou que a emissão de metano na carbonização reduziu o equivalente a 99,8% de emissão em massa, quando houve a queima dos gases. Sem a combustão dos gases a emissão foi de 7,58 kg/t de madeira seca, enquanto com a queima dos gases foi apenas de 0,01 kg/t de madeira seca.

Coelho (2013) utilizou um forno com as mesmas proporções reportadas por Cardoso (2010). A câmara de combustão foi projetada em formato cilíndrico, para minimizar o consumo de materiais e maximizar a eficiência de queima. Foi construída em tijolos cerâmicos maciços convencionais e revestida por uma manta cerâmica em seu interior, para melhor isolamento térmico. Ela também possuía uma entrada de ar de seção quadrada na base da câmara, para admissão de ar primário. A chaminé foi construída sobre a câmara de combustão com módulos metálicos cilíndricos e também com manta cerâmica revestindo seu interior, tendo o conjunto um total de 4,6m de altura. Verificou-

se nesse sistema que a combustão dos gases resultou na redução de 74,14 e 99,8% das emissões médias de monóxido de carbono e metano, respectivamente, devido à maior quantidade oxidada pela utilização da fornalha. Na Tabela 2 estão os resultados das emissões médias sem combustão e com combustão de gases.

**Tabela 2** – Comparação entre os resultados obtidos sem queima e com queima de gases (COELHO, 2013)

Carbonização	Concentrações Médias na Saída da Chaminé (%)				Vazão Mássica Média kg. h <sup>-1</sup>	Emissões em kg de CO <sub>2</sub> Equivalente
	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>		
Sem queima	1,16	0,29	3,08	19,23	9,6	279,64
Com queima	0,30	0,03	5,85	16,25	12,36	216,12

### 3.5. Mitigação dos impactos ambientais

O dióxido de carbono e o metano são os dois gases que mais contribuem para o efeito estufa. O resultado global das emissões de gases do efeito estufa pelo segmento da produção de carvão vegetal, no ano de 2006, foi de 12 Mt de CO<sub>2</sub>, o que representou 3,61% do total de emissões da matriz energética brasileira no mesmo ano, que foi de 332,42 Mt de CO<sub>2</sub>e (*INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA*, 2010).

A carbonização contribui para a emissão de ambos os gases, o que torna o processo potencialmente poluente. A redução do efeito negativo dos gases da carbonização pode ser por duas rotas: recuperando os gases condensáveis através de condensadores ou incinerando os gases combustíveis em câmara de combustão. Além da secagem prévia da madeira também existem possibilidades de utilização da energia liberada na secagem de grãos, no aquecimento de aviários e, até mesmo, na geração de energia elétrica.

Algumas experiências conduzidas no início da década de 1980 recuperaram o alcatrão vegetal dos gases da carbonização e aproveitaram-no como combustível em substituição ao óleo combustível de petróleo. Porém, a inevitável geração de licor pirolenhoso associada à obtenção de alcatrão tornou-se um ponto crítico, visto a inexistência de uma 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).

O Protocolo de Quioto, ao estabelecer as reduções de gases geradores do efeito estufa – GGE, instituiu o MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) entre os princípios de flexibilização, propondo a comercialização de toneladas de carbono que deixassem de ser emitidas. Assim, as empresas que não reduzirem suas emissões podem comprar Certificados de Emissões Reduzidas (CERs) dos países em desenvolvimento, para atingir suas obrigações com relação ao Protocolo de Quioto (COSTA, 2012).

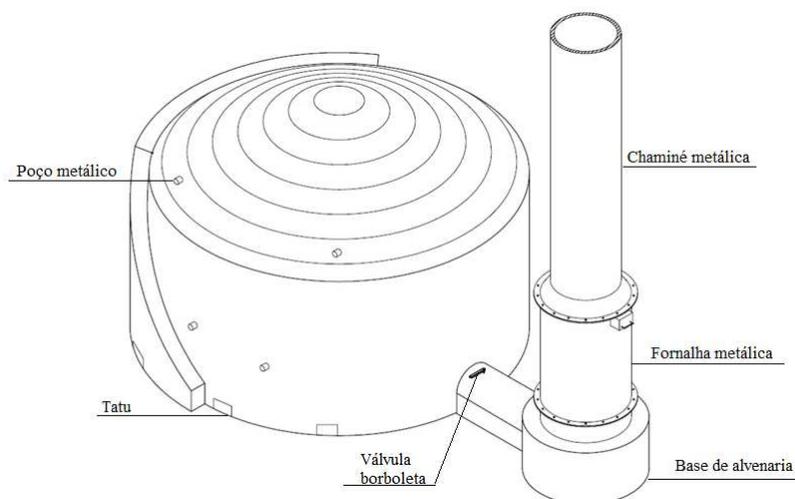
Ressalta-se então que a atividade de carbonização efetua emissão de gases que tornam o processo potencialmente inserível nos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo - MDL, contabilizando a liberação do metano, gás com potencial de aquecimento 25 vezes maior que a do CO<sub>2</sub>. Portanto, as unidades produtoras de carvão vegetal dotadas de fornalhas podem pleitear a metodologia - AMSIIIK - *Avoidance of methane release from charcoal production by shifting from traditional open-ended methods to mechanized charcoaling process*. Esta metodologia é aplicável a projetos que evitem a liberação de CH<sub>4</sub>, substituindo os métodos convencionais de produção de carvão por novas unidades de produção equipadas com sistemas de captura e queima do gás gerado no processo (UNFCCC, 2008).

#### **4. Material e Métodos**

Este trabalho foi executado 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, no período de setembro a dezembro de 2013.

Para proceder à combustão dos gases foi adotada uma fornalha metálica acoplada a um forno circular de alvenaria, através de um duto metálico para condução dos gases. Optou-se por esse tipo de forno para receber a fornalha

metálica 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. A Figura 5 mostra uma vista em perspectiva do sistema adotado.



**Figura 5** - Vista em perspectiva do sistema forno-fornalha.

#### 4.1. Forno

O forno possuía capacidade de 12 st, aproximadamente 8,5 m<sup>3</sup> de madeira. Foi construído em 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 piso no interior do forno haviam seis aberturas de 10 x 15 cm, uniformemente distribuídas em suas duas laterais, para entrada de ar. A abertura e o fechamento das entradas controlavam a oxigenação do sistema e, conseqüentemente, as temperaturas, auxiliando a condução da 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 infravermelho, pirômetro, marca “Minipa” modelo “MT-350”, com capacidade de aferir temperaturas entre - 30 e 550°C.

#### **4.2. Transporte dos gases até a fornalha**

A condução dos gases do forno até a fornalha foi realizada por um duto metálico dotado de uma válvula borboleta, para controle de carbonização.

Entre o local de saída de gases do forno e o início do duto foi instalada uma guilhotina de chapa de ferro de 55 x 50 cm e 3 mm de espessura, para fechamento do forno ao final da carbonização. A guilhotina foi instalada de modo a ser guiada por duas cantoneiras laterais de ferro.

O duto metálico para condução dos gases possuía 38 cm de diâmetro interno e 80 cm de comprimento, revestido externamente por 3 cm de manta cerâmica, envolvida por tijolos cerâmicos maciços e argamassa de argila, para dar sustentação ao duto e evitar perdas térmicas para o ambiente.

O duto tinha, também perpendicularmente, um tubo de cobre de 0,5 cm de diâmetro, localizado próximo ao forno, para inserção do termopar para obtenção da temperatura de saída dos gases. Um segundo tubo de cobre foi inserido no duto metálico, para coleta dos gases da carbonização e sua análise. Utilizou-se cola de silicone em gel para aderir e vedar os pontos de conexão com o termopar e também a mangueira coletora de gases.

A vazão dos gases do forno foi controlada pela operação da válvula borboleta, operada manualmente, instalada no início do duto próximo ao forno, aproximadamente a 20 cm de distância da parede do forno.

O duto e a válvula borboleta estão exemplificados nas Figuras 6 e 7, apresentadas no tópico 4.3.1.

#### **4.3. Dimensionamento da fornalha metálica**

##### **4.3.1. Base de alvenaria da fornalha**

A base da fornalha foi construída em alvenaria com formato cilíndrico e altura de 50 cm, diâmetro interno de 60 cm e externo de 100 cm. Foi construída

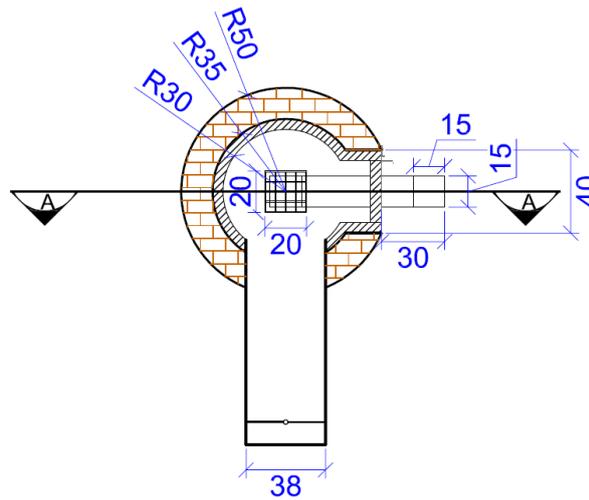
de tijolos maciços de cerâmica e argamassa de argila, em parede dupla, com revestimento de 5 cm em manta cerâmica, para garantir o isolamento do meio externo e a sustentação da parte metálica. A base de alvenaria da fornalha, denominada antecâmara, permitiu não somente a mistura entre os gases da carbonização e o ar ambiente, como também o início da combustão dos gases.

Na lateral da base foi instalada uma janela basculante metálica isolada por manta cerâmica, de 40 x 40 cm, para alimentação de combustível auxiliar (resíduos lignocelulósicos), responsável por aquecer a antecâmara de mistura e todo o sistema subsequente, e principalmente para proceder à ignição dos gases advindos da carbonização.

No centro da base da fornalha foi instalada uma grelha metálica de 20 x 20 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 15 x 15 cm de dimensão. Na extremidade do duto utilizou-se um tijolo comum para controle da entrada de ar atmosférico, localizada a 30 cm externamente à base e de frente à porta de admissão de combustível auxiliar.

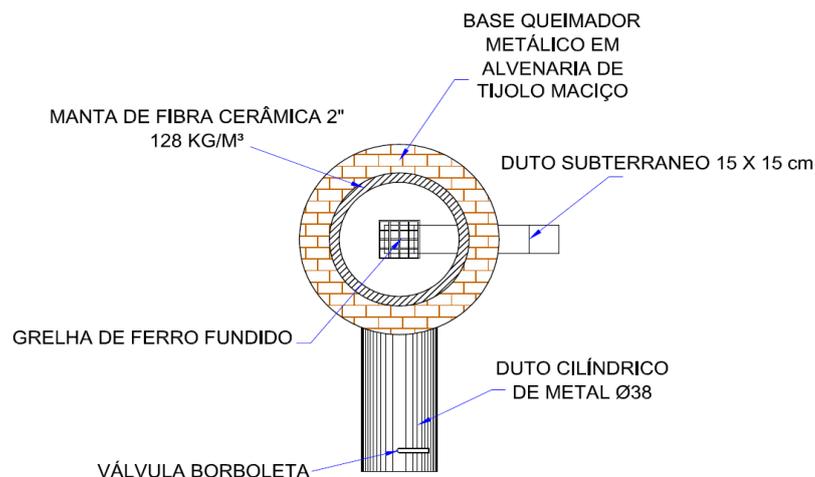
Na construção da base de alvenaria da fornalha instalou-se um perfil metálico sobre a porta basculante de 10 cm de largura, e um outro foi instalado sobre o duto metálico condutor dos gases da carbonização, para distribuir melhor a pressão exercida da massa da fornalha sobre esses locais, auxiliando na sustentação e na durabilidade do sistema.

Na Figura 6 e 7 tem-se a planta baixa da antecâmara (base), do duto metálico, da grelha, do duto de admissão de ar primário e da janela metálica basculante para admissão de ar, em que R corresponde aos raios e os números correspondem às cotas, em centímetros.



**Figura 6** - Planta baixa da base da fornalha e duto metálico.

Na Figura 7 estão os componentes da base da fornalha (antecâmara) e do duto de transporte dos gases.



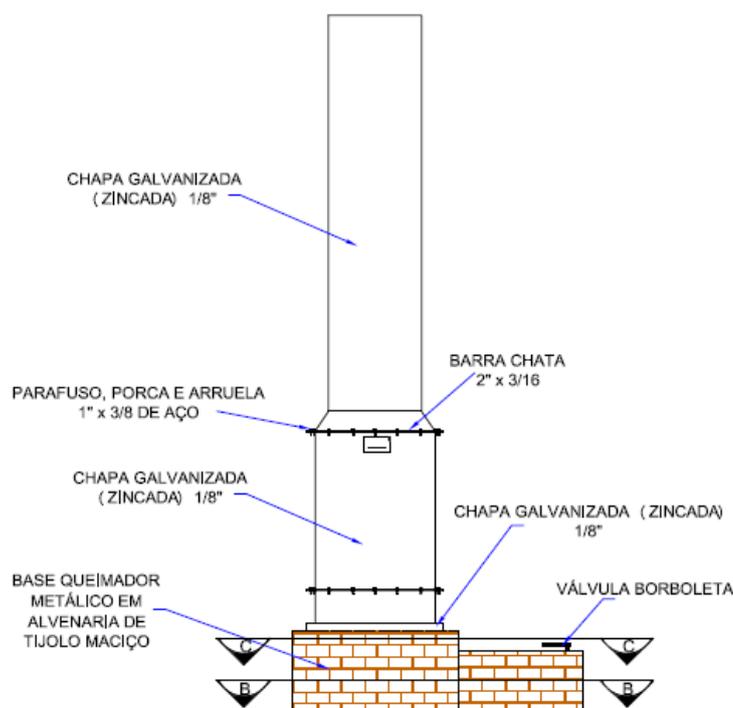
**Figura 7** - Componentes do duto e da base da fornalha (antecâmara).

#### 4.3.2. Fornalha metálica

A parte metálica da fornalha foi construída em chapa galvanizada e zincada de 1/8" de espessura, revestida internamente por uma manta cerâmica, com espessura média de 2" (5,08 cm) e densidade de 128 kg/m<sup>3</sup>. A partir de 183 cm de altura em relação ao piso até a altura total do sistema (423 cm) a manta cerâmica tinha 3 cm de espessura e 128 kg/m<sup>3</sup> de densidade, revestindo internamente a chaminé do sistema. A chaminé da fornalha, também constituída de chapa galvanizada e zincada de 1/8", foi construída sobre a

câmara de combustão, com altura total de 240 cm e diâmetro interno de 50 cm (Figuras 8 e 9).

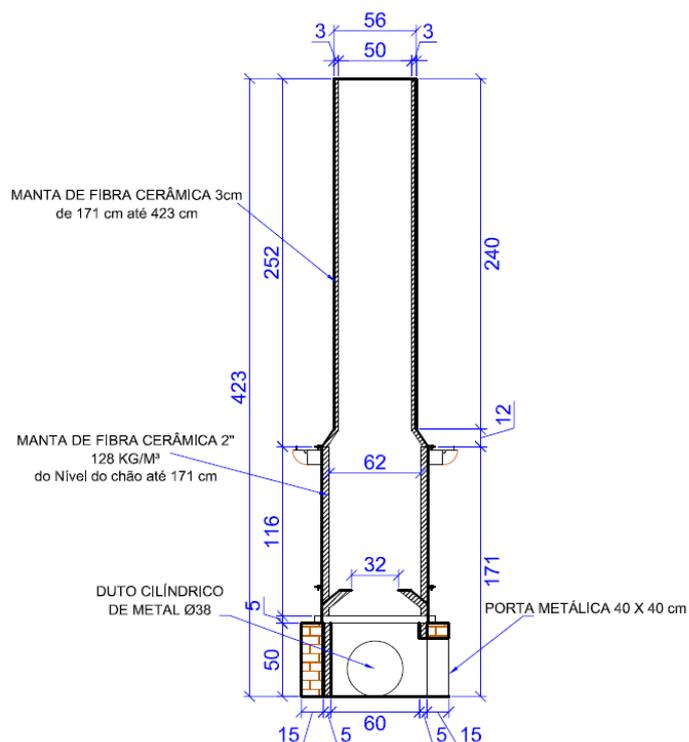
Na Figura 8 está a vista lateral do sistema, evidenciando os componentes do duto, da base e da fornalha metálica.



**Figura 8** - Detalhes da vista lateral da fornalha metálica.

A câmara de combustão metálica da fornalha foi construída com diâmetro interno de 62 cm, revestida internamente por manta cerâmica de 5,08 cm de espessura e densidade de  $128 \text{ kg/m}^3$ . Para elevar o tempo de residência dos gases no interior da fornalha, realizou-se um estrangulamento no interior da câmara de combustão, a 55 cm da altura do piso, reduzindo-se o diâmetro interno de 62 cm para 32 cm, sendo constituído de um anel circular metálico a  $45^\circ$  de inclinação em relação à parede da fornalha, recoberto em ambas as faces por manta cerâmica (Figura 9).

Esse estrangulamento é um diferencial em relação aos demais protótipos de fornalha para combustão dos gases da carbonização da madeira já desenvolvidos, pois a redução do diâmetro interno aumenta a turbulência no interior da fornalha, favorecendo a melhor mistura dos gases advindos do forno e do ar atmosférico contendo oxigênio e aumentando o contato entre combustível e comburente para garantir melhor combustão.



**Figura 9** - Vista em corte lateral com dimensões dos componentes da fornalha. Detalhes do estrangulamento do diâmetro interno a 55 cm da altura do piso.

A fornalha teve altura total de 4,23 m, para garantir a exaustão dos gases da carbonização e também para assegurar um tempo de residência dos gases na câmara e combustão em seu interior do sistema.

Foram instalados quatro termopares tipo “K” na fornalha, para obtenção das temperaturas: o primeiro foi instalado no duto para transporte de gases; o segundo foi instalado na base da fornalha (antecâmara), a 50 cm de altura, inserindo-se 25 cm para o interior da antecâmara de alvenaria; o terceiro foi instalado no interior da câmara de combustão, à altura de 1,35 m, inserido até aproximadamente 30 cm no interior; e o quarto foi instalado na chaminé, inserido até a metade do diâmetro, a 80% da altura total da fornalha, a 3,38 m, para evitar interferências externas da atmosfera.

#### 4.4. Carbonização da madeira

Nas carbonizações da madeira foram adotados alguns critérios, para garantir a qualidade do processo. Cada carbonização foi dividida em quatro etapas, baseadas em esquema proposto por Oliveira *et al.* (2013), porém o tempo de duração das fases foram diferentes, assim como as temperaturas máximas, que foram reduzidas (Tabela 3).

**Tabela 3** – Faixas estipuladas de temperatura média na cúpula do forno para controle da carbonização

Fase	Faixa de Temperatura	Tempo de Duração	Fenômenos
1	120-150 °C	24 horas	Secagem da madeira, fase endotérmica. Caracterizada pela grande liberação de vapor d'água.
2	150-275 °C	12-16 horas	Degradação das hemiceluloses, eliminação de gases, fase endotérmica, ainda com grande presença de vapor d'água.
3	275-375 °C	24 horas	Degradação da celulose, grande produção de gases, fase exotérmica. Formação do carvão vegetal.
4	375-400 °C	10-18 horas	Redução da emissão de gases, fase exotérmica. Aumento da concentração de carbono no carvão vegetal.

A primeira fase de secagem da madeira, com temperatura máxima de 150 °C, foi para efetuar a retirada de parte da umidade de forma mais lenta e evitar colapsos intercelulares e intracelulares por pressão de vapor, propiciando um carvão menos friável e quebradiço, ou seja, com maior resistência mecânica. O tempo de permanência na fase de secagem foi determinado de acordo com o teor de umidade da madeira a ser carbonizada.

A segunda fase consistiu na elevação da temperatura do forno até 275 °C, iniciando o processo de degradação térmica da madeira, com duração de 12 horas.

Na terceira fase elevou-se a temperatura até 375 °C, acentuando-se a degradação térmica da madeira, com duração de 24 horas.

Na quarta e última fase a temperatura máxima final foi fixada em 400 °C, evitando ultrapassar essa temperatura, adotada para garantir a carbonização de toda massa de lenha enfiada e o aumento da concentração de carbono no carvão vegetal. Essa fase teve duração variável, finalizando o processo de acordo com a redução do volume de gases e com a inspeção visual dos controladores de ar.

O término da carbonização e a vedação do forno foram determinados pela chegada da frente de carbonização nas últimas entradas auxiliares de ar do

forno, localizadas mais próximas ao ponto de retirada de gases. Mesmo com a chegada da frente de carbonização, as entradas de ar foram mantidas por algum tempo, com aberturas reduzidas para garantir a carbonização nas imediações, até ser constatada a redução do volume dos gases da carbonização, que é acompanhada pela redução da temperatura no interior da fornalha. Depois as entradas de ar foram vedadas, dando início ao processo de resfriamento.

Para esse experimento utilizou-se madeira de *Eucalyptus* spp., com idade aproximada de 6 anos, comprimento de 1,5 m, diâmetro entre 12 e 20 cm e densidade variando entre 400 e 430 kg/m<sup>3</sup>, verificada de acordo com as normas da ABNT NBR 11941. Antes de cada carbonização determinou-se inicialmente a umidade da madeira, selecionando-se 12 toras representativas das classes diamétricas da madeira enfornada. De cada tora foram retirados discos entre 5 e 10 cm de espessura aproximadamente, 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 ± 2 °C, até massa constante.

Foram realizadas cinco carbonizações, devendo ser ressaltado que nas três primeiras avaliou-se o funcionamento do sistema forno-fornalha, obtendo as temperaturas, o tempo de queima e o consumo de combustível auxiliar. Nas duas últimas carbonizações, além dessas variáveis, realizou-se a coleta de gases para determinar as reduções das emissões.

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

As temperaturas do forno foram monitoradas a partir dos oito poços metálicos descritos anteriormente, utilizando-se um sensor infravermelho de temperatura, apropriado para temperaturas entre o intervalo de - 30 °C e 550 °C.

## **4.5. Funcionamento da fornalha**

### **4.5.1. Instrumentação da fornalha**

As temperaturas dos gases foram medidas por meio de termopares tipo K, com capacidade de aferir temperaturas entre  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $1.050\text{ }^{\circ}\text{C}$ : o primeiro termopar foi instalado no começo do duto metálico, próximo ao forno, obtendo a temperatura de saída de gases do forno; o segundo foi instalado na parte superior da base de alvenaria; o terceiro foi instalado 10 cm acima do estrangulamento da fornalha, na câmara de combustão; e o quarto termopar foi instalado a 80% da altura total do sistema, localizado na chaminé, para obter a temperatura de saída dos gases.

Foram coletados, também, dados diários de temperatura e umidade relativa do local onde foi instalado o sistema forno-fornalha.

### **4.5.2. Operação da fornalha**

Concomitantemente à ignição do forno, realizou-se a queima de resíduos lignocelulósicos na fornalha, previamente abastecida, que funcionou durante as duas fases iniciais apenas como chaminé para exaustão do gás da carbonização, que nessas fases apresenta alta concentração de vapor d'água.

Quando os gases gerados durante a carbonização da madeira atingiram temperaturas superiores a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  na saída do forno, concomitante à temperatura de copa superior a  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , realizou-se um segundo abastecimento e queima de resíduos na fornalha, promovendo o aquecimento do sistema e a ignição nos gases. A partir dos experimentos conduzidos por Cardoso (2010), Costa (2012), Oliveira (2012) e Coelho (2013), estima-se que a essas temperaturas o gás já possui poder calorífico para perpetuação da chama no interior da fornalha, ou seja, existem concentrações de gases combustíveis suficientes para que não haja necessidade de abastecimentos de resíduos lignocelulósicos na fornalha.

A entrada de ar primário na fornalha permaneceu parcialmente fechada, restringindo a entrada ar atmosférico, para propiciar melhor balanço entre combustível e comburente, favorecendo a permanência da chama e a obtenção de uma combustão completa.

A abertura e o fechamento da válvula borboleta permitiram um fluxo de gases que propiciaram a manutenção da chama na fornalha e também da temperatura no interior do forno.

#### **4.5.3. Coleta e caracterização dos gases da carbonização**

Para avaliar a qualidade e a quantidade dos gases emitidos durante a carbonização da madeira, utilizou-se um analisador de gás. A coleta de gases foi realizada continuamente durante as carbonizações, em intervalos regulares de 1 hora.

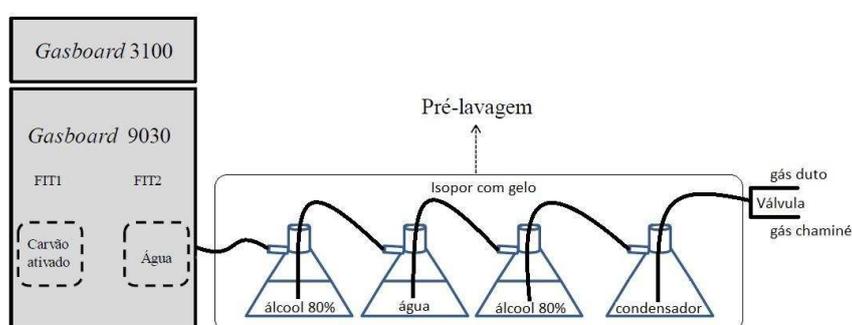
A coleta dos gases foi realizada por tubos de cobre inseridos até a metade do diâmetro interno de dois diferentes locais do sistema. O primeiro ponto de coleta foi no duto de condução dos gases do forno para fornalha, próximo ao forno, para evitar interferências de combustões da fornalha. O segundo ponto de coleta foi feito a 80% da altura total da fornalha, para evitar efeito da atmosfera na composição dos gases.

Os gases coletados foram tratados por um sistema de pré-lavagem, constituído por quatro 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 10). 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 para lavagem em álcool 80%, novamente.

Após a pré-lavagem, os gases não condensados foram conduzidos até o sistema de condicionamento de gases do tipo *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. Então 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>. A vazão média de sucção dos gases pelo equipamento foi de 1L/minuto.

Utilizou-se um sistema de válvulas para alternar o fluxo de gases da saída do forno e da chaminé, o que permitiu que a concentração dos gases não condensáveis nos dois pontos fosse obtida em intervalos muito próximos. Para o estabelecimento de um equilíbrio completo na porcentagem dos gases dentro do analisador considerou-se um tempo mínimo de 10 minutos, após alternar o fluxo de gases. Esse tempo mínimo, associado à vazão de sucção dos gases de 1L/minuto, impediram leituras de concentração equivocadas com mistura dos gases advindos de locais diferentes no interior do sistema. A Figura 10 ilustra os sistemas descritos anteriormente.



**Figura 10** - Sistema de lavagem, condicionamento e análise dos gases.

#### 4.6. Propriedades do carvão vegetal

Os procedimentos para determinação da densidade a granel do carvão vegetal, conforme a norma ABNT NBR 6922 (ABNT, 1981), foram realizados simultaneamente à sua pesagem durante o descarregamento.

Para composição dos demais ensaios, físicos e químicos, seguiu-se a preparação da amostra geral, baseada na norma ABNT NBR 6923 (ABNT, 1981), com homogeneização e quarteamento de uma porção de carvão vegetal representativa do forno e retirada de uma alíquota de 20 litros.

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) seguiu os procedimentos preconizados na norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

Também foi determinada a friabilidade média do carvão vegetal de cada carbonização. Foram feitas três repetições para cada carbonização, utilizando-se uma amostra de 500 gramas de carvão, classificado entre 60 e 20 mm em cada repetição. A amostra foi introduzida em um tambor rotatório de aço, de 30 cm de diâmetro, e submetida a 500 rotações a 30 rpm. O percentual de finos, que corresponde a partículas de carvão vegetal com granulometria inferior a 13 mm, foi comparado com a tabela de classificação sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC, 1982) para teste de friabilidade.

## 5. Resultados e Discussão

Na Figura 11 estão as imagens do projeto implantado.



**Figura 11** - Sistema forno fornalha implantado.

Na Tabela 4 estão os dados de precipitação total e umidade relativa média do ar nos meses de outubro a dezembro de 2013.

**Tabela 4 – Precipitação e umidade relativa média do ar** (Instituto Nacional de Meteorologia, 2014)

<b>Mês</b>	<b>Precipitação Total (mm)</b>	<b>Umidade Relativa Média (%)</b>
Outubro	82,9	76,73
Novembro	113,3	76,77
Dezembro	389,6	84,19

Altos índices de pluviosidade e umidade relativa contribuem para o aumento da concentração de vapor d'água no sistema, advindo do forno ou da admissão de ar primário na fornalha, reduzindo a inflamabilidade dos gases. Além disso, a água é um ótimo condutor térmico, promovendo o resfriamento do sistema, acentuando as perdas térmicas e a diminuição da temperatura no interior da fornalha e afetando negativamente a combustão dos gases que ocorrem em altas temperaturas.

Portanto, provavelmente em períodos mais secos ao longo do ano, o tempo de combustão dos gases na fornalha, os apagamentos e o consequente consumo de resíduo lignocelulósico serão reduzidos, aumentando a eficiência do sistema.

Ressalta-se que mesmo com os altos índices de pluviosidade e a alta umidade relativa do ar, característicos do local na época do ano, durante o

período experimental os resultados encontrados para combustão dos gases e consumo de resíduo pela fornalha metálica foram satisfatórios, mostrando que a fornalha funcionou eficientemente mesmo em condições adversas.

### 5.1. Rendimento e propriedades do carvão vegetal

Na Tabela 5 estão os valores médios dos rendimentos gravimétricos das carbonizações e o teor de umidade médio da madeira, bem como os seus respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação.

**Tabela 5** – Valores médios dos rendimentos gravimétrico das carbonizações

<b>Parâmetro</b>	<b>Rendimento Gravimétrico (%)</b>	<b>Desvio-Padrão</b>	<b>Coeficiente de Variação (%)</b>
<b>Carvão</b>	33,13	2,87	9
<b>Finos</b>	2,92	0,38	13
<b>Atiço</b>	3,27	1,39	42
<b>Umidade da Madeira (%)</b>	37,5	6,06	16

O rendimento gravimétrico é um dos fatores que mais influenciam a produtividade dos fornos na carbonização da madeira. O controle de temperaturas nos fornos melhora a conversão da madeira em carvão sem sua excessiva degradação, promovendo aumento de produtividade de carvão vegetal por fornada em função do maior rendimento.

O rendimento em carvão é um dos itens responsáveis por toda a logística de produção, visto que, a partir dele, faz-se o planejamento da quantidade de madeira a ser comprada ou da área de plantio florestal necessária, o armazenamento e a logística de estoque para suprir a demanda, dentre diversos outros aspectos relevantes da cadeia.

Observa-se que o rendimento gravimétrico médio em carvão vegetal foi de 33%, superior aos valores obtidos nos tradicionais fornos de alvenaria denominados rabo-quente, nos quais o rendimento médio não ultrapassa 26% de rendimento mássico, além da exposição insalubre dos trabalhadores aos gases tóxicos da carbonização. Valores próximos de rendimento gravimétrico foram obtidos em experimento conduzido por Oliveira *et al.* (2013) e Coelho (2013) em sistema de forno-fornalha, 33,18 e 33% respectivamente. Deste modo, deve-se ressaltar que o funcionamento da fornalha não interferiu negativamente no rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Salienta-se que o valor obtido para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal não considerou a massa de resíduo gasta na fornalha, que ao ser quantificada junto com a madeira enforada reduz a média do rendimento gravimétrico de 33,13 para 32,35%, uma diminuição de 0,78% na produtividade.

Os valores médios de rendimento gravimétrico para finos e atijo gerados ficaram abaixo dos 3 e 4%, respectivamente. Esses valores são considerados baixos em relação à massa total de madeira enforada, o que demonstra que praticamente toda a madeira foi convertida em carvão vegetal, evidenciando que o processo de carbonização procedeu-se de maneira adequada, não tendo interferências da fornalha.

Na Tabela 6 estão os valores médios das propriedades do carvão vegetal e os respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação.

**Tabela 6 – Propriedades do carvão vegetal**

Parâmetro	Densidade a Granel (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	PCS (kcal/kg)	Teor de Carbono Fixo %	Materiais Voláteis (%)	Cinzas (%)	Friabilidade (%)
Valores Médios	175,04	351,67	7781,12	79,04	20,69	0,86	11,11
Desvio-Padrão	5,20	13,84	53,87	2,38	2,06	0,17	1,28
Coeficiente Variação (%)	3	4	1	3	10	20	11

As características do carvão vegetal produzido estão intrinsecamente relacionadas aos índices de qualidade da madeira, como umidade e densidade, e também ao processo de carbonização. A baixa qualidade da madeira, no que diz respeito à conversão em carvão vegetal, é um fator crítico na cadeia produtiva do carvão vegetal, ocasionando perda em produtividade e qualidade.

Em termos práticos, com relação à operação dos fornos de redução de minério de ferro, a propriedade mais importante é a densidade a granel, pois determina o espaço útil a ser ocupado dentro deles, além de estar correlacionada à resistência mecânica do carvão vegetal.

Os valores médios de densidade a granel e aparente neste trabalho ficaram abaixo do desejado para uso siderúrgico. Santos (2008) considera que para esse uso a densidade a granel do carvão deve estar acima de 200 kg/m<sup>3</sup>. Esta baixa densidade do carvão está diretamente correlacionada com a baixa densidade da madeira. De acordo com Brito *et al.* (1982), a densidade da

madeira é um dos parâmetros mais importantes para determinar a qualidade do carvão: quanto maior a densidade, melhor será a qualidade do carvão.

O poder calorífico superior (PCS) médio foi igual a 7.781 kcal/kg, próximo aos valores desejados normalmente encontrados na literatura para uso siderúrgico e doméstico. Vale salientar que além de agente redutor o carvão vegetal também é responsável por fornecer energia térmica para o processo siderúrgico.

Segundo Assis *et al.* (1982), o controle da composição química, principalmente do carbono fixo, é importante porque reflete na utilização de altos-fornos siderúrgicos por unidade de volume. Considerando-se um determinado alto-forno e as mesmas condições operacionais à medida que se aumenta o teor de carbono fixo do carvão, maior é a utilização volumétrica do altoforno, elevando-se a produtividade. O teor de carbono fixo médio deste experimento foi igual a 79%. Rosillo-Calle e Bezzon (2005) afirmam que o carvão vegetal usado na fabricação de aço e ferro-gusa deve ter teor de carbono fixo superior a 75%, uma vez que o teor de carbono fixo afeta o consumo específico de redutor e, conseqüentemente, a produção de ferro-gusa.

Ressalta-se que a relação entre carbono fixo no carvão vegetal e sua resistência mecânica, e também o rendimento em massa, é inversamente proporcional. Quanto maior o teor de carbono fixo menor a resistência mecânica e o rendimento mássico, pois para alcançar altos teores de carbono fixo é necessário degradar muito a madeira. Teores de carbono fixo acima de 80% acarretam baixa resistência mecânica do carvão, podendo elevar a geração de finos e a problemas em altos-fornos.

Portanto, deve haver um balanço das características do carvão ideal para cada destino. Para o uso siderúrgico, altos valores tanto de teor de carbono fixo e de resistência mecânica seriam ideais, então a escolha da matéria-prima, a madeira, é fundamental, uma vez que ela reflete diretamente nas propriedades do carvão.

O valor médio de materiais voláteis obtido neste experimento foi igual a 21%, sendo considerado satisfatório tanto para seu uso doméstico como siderúrgico. Santos (2008) afirmou que o teor de materiais voláteis no carvão situa-se entre 20 e 25% e que porcentagens inferiores a 25% são desejadas para o uso siderúrgico. Altos teores de voláteis ocasionam a produção de muita

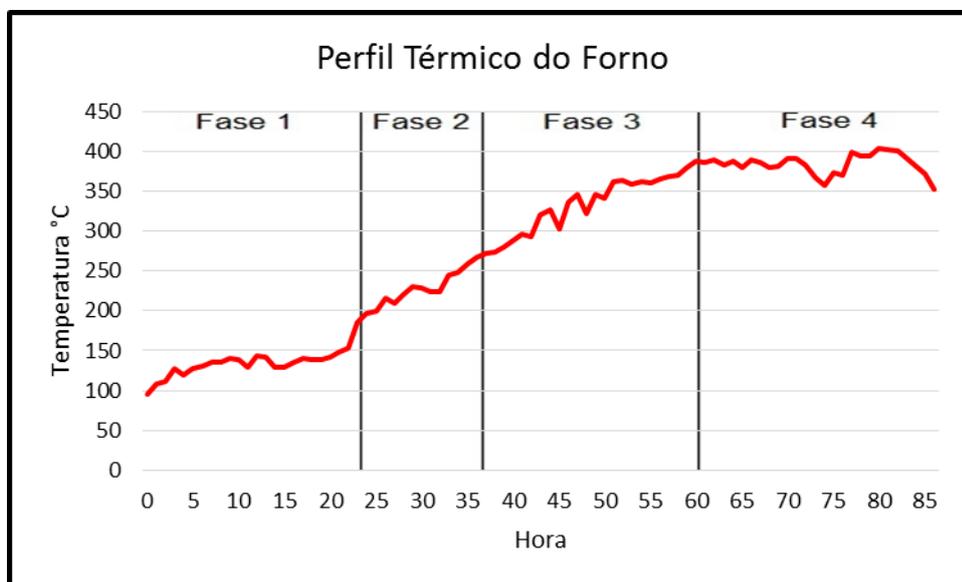
fumaça, além da menor eficiência energética, o que não seria desejável para o carvão, visando ao uso doméstico (FREDERICO, 2009).

O teor de cinzas desejável no carvão vegetal siderúrgico deve ser baixo, pois altos teores de minerais contribuem para redução do poder calorífico, uma vez que eles não participam do processo de combustão, além de ocasionar perda de resistência do ferro-gusa. A média do teor de cinzas deste experimento foi igual a 0,86%, valor já esperado para madeiras comerciais do gênero *Eucalyptus*, uma vez que a própria madeira já apresenta baixos percentuais de cinzas.

O índice de friabilidade média dos carvões foi de 11%, classificado como pouco friável, segundo a tabela do CETEC (1982). A baixa friabilidade do carvão reduz as perdas nas carvoarias, no carregamento, no transporte, no armazenamento e no peneiramento, que podem ultrapassar os 25% (OLIVEIRA, 1982b).

## 5.2. Perfil térmico do forno

Na Figura 12 é apresentado o perfil térmico médio do forno para as carbonizações, dado pela média das temperaturas obtidas na copa do forno.



**Figura 12** – Perfil térmico médio do forno.

Constatou-se que as temperaturas obtidas ao longo das carbonizações foram próximas às faixas estipuladas de temperatura para cada fase, indicando que houve adequada condução do processo de carbonização, respeitando os limites propostos.

### 5.3. Parâmetros da fornalha

Os valores médios obtidos para os parâmetros da fornalha estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 – Valores médios dos parâmetros da fornalha**

Parâmetros	Valores Médios por Fase			
	Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV
Tempo total de queima dos gases (%)	0	0	98	81
Temperatura dos gases no duto (°C)	45	76	216	322
Temperatura da antecâmara (°C)	39	44	551	549
Temperatura da câmara de combustão (°C)	40	46	684	633
Temperatura dos gases na saída da chaminé (°C)	46	64	663	555
Temperatura dos gases início de queima (°C)	-	-	120	-
Temperatura da copa do forno (°C)	126	228	353	364
Massa seca combustível auxiliar (kg)	7,5	0	69,5	0

O tempo médio de combustão dos gases foi igual a 42% do tempo total de carbonização, e apesar da combustão não ter ocorrido ininterruptamente, pouco combustível auxiliar foi utilizado, em média de 77 Kg por carbonização.

Verificou-se que a ignição e a combustão dos gases iniciaram-se na terceira fase da carbonização da madeira, caracterizada pelo pico de degradação das holoceluloses e principalmente da celulose, presente em maior percentual na madeira, promovendo o aumento do volume de gases gerados. Nessa fase ocorre também a redução da quantidade de vapor d'água presente, permitindo que ocorra sua combustão na fornalha, em função do aumento de componentes oxidantes e, conseqüentemente, do poder calorífico.

Observa-se que o tempo de combustão dos gases da carbonização na terceira e quarta fase foi 98 e 81%, respectivamente, evidenciando que a combustão dos gases aconteceu durante quase todo o tempo que se propôs. O menor percentual de tempo de combustão na quarta fase foi ocasionado pela finalização do processo de carbonização, onde ocorre a diminuição da produção de gases, ocasionando redução da temperatura na câmara de combustão pelo cessar da combustão.

A temperatura do gás no duto progrediu gradativamente, assim como a temperatura na copa do forno, delineada pelas faixas estipuladas de carbonização, descritas anteriormente. A elevação da temperatura do gás no duto também foi ocasionada pela chegada da frente de carbonização na parte

posterior e mais baixa do forno próxima à saída dos gases de dentro do forno, ficando em média de 322 °C na última fase.

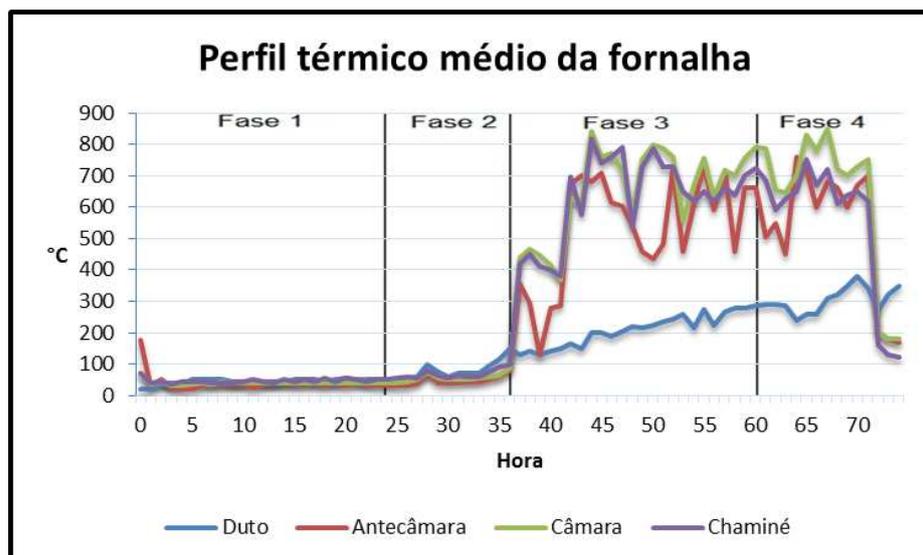
Vale ressaltar que as temperaturas na antecâmara, na câmara de combustão e na chaminé aumentaram abruptamente quando se iniciou a terceira fase da carbonização. No início dessa fase ocorreu a ignição da fornalha com combustível auxiliar, resíduo lignocelulósico, para elevar a temperatura interna da câmara e iniciar o processo de combustão dos gases que já continham volume de compostos oxidáveis suficientes para manutenção da chama no interior da fornalha.

Quando a temperatura média de saída dos gases atingiu 120 °C e a temperatura média na copa do forno estava a 297 °C, procedeu-se à queima de resíduos lignocelulósicos na fornalha, para elevar a temperatura em seu interior a mais de 650 °C, e conseqüentemente ocorreu a ignição dos gases da carbonização. Estima-se que, a estas temperaturas de duto e copa, o gás esteja com menor quantidade de vapor d'água e maior concentração de componentes combustíveis, o que eleva seu poder calorífico e permite sua combustão mais eficientemente. Melo (2013), estudando a decomposição térmica da madeira de diferentes clones de *Eucalyptus* por meio da análise de calorimetria exploratória diferencial, constatou que, em média, a partir de 300 °C ocorre o início do processo exotérmico na carbonização da madeira, com altas taxas de sua degradação térmica e conseqüentemente aumento da quantidade de gases gerados.

Observa-se que foram consumidos, em média, 77 kg de resíduos lignocelulósicos, correspondeu a apenas a 0,78% em relação massa de madeira enforada, valor considerado baixo quando comparado com o de outros sistemas forno-fornalha testados, como os de Oliveira (2012) e Coelho (2013), que consumiram, em média, 1.100 kg e 460 kg de resíduos por carbonização, respectivamente. Vale salientar que esses autores realizaram a queima dos gases também durante as fases endotérmicas da carbonização.

#### **5.4. Perfil térmico da fornalha**

Na Figura 13 está o perfil térmico médio da fornalha em função das fases de carbonização.



**Figura 13** – Perfil térmico da fornalha.

Observa-se que as temperaturas da fornalha permanecem abaixo dos 70 °C, até a 36ª hora, início da terceira fase estipulada. Ocorreram, então, a ignição do combustível auxiliar na fornalha e sua queima, ocasionando o aumento da temperatura no interior da fornalha e iniciando a combustão dos gases. Verificou-se também que as temperaturas na câmara de combustão ficaram acima das temperaturas registradas na antecâmara e na chaminé, o que evidencia ser essa a região de maior concentração das reações de oxidação dos gases. O duto teve somente sua temperatura elevada além dos 300 °C no final da carbonização, quando ocorreu a aproximação da frente de carbonização da madeira dentro do forno.

Os picos invertidos de temperaturas observados na antecâmara foram devido ao apagamento da chama no seu interior, causados provavelmente pelo excesso de volume de gases advindos do forno, sendo necessários o controle de sua vazão e a realização de pequenos reabastecimentos com resíduos lignocelulósicos para retomada da combustão.

Observou-se que em alguns momentos houve diminuição abrupta da temperatura no interior da antecâmara, porém a temperatura na câmara e na chaminé não foram afetadas. Este fato indica que a combustão dos gases não foi interrompida, e apenas com a adequação do volume de gases e ar atmosféricos admitidos retomou-se a combustão dos gases já na antecâmara. Essa diminuição brusca no interior da antecâmara é justificada pela localização do termopar no seu interior, acima da entrada de ar atmosférico, que com o apagar da chama no local, resfriou o termopar rapidamente. Ressalta-se que

mesmo com o rápido resfriamento do termopar a antecâmara, construída de alvenaria, ainda permanecia a temperaturas elevadas, o que contribuiu para a inércia térmica do sistema, ou seja, liberou parte do calor absorvido anteriormente.

Ao final do processo observou-se uma queda brusca da temperatura, em todos os pontos, devido ao apagamento da chama no interior da fornalha, ocasionada pela redução do volume de gases, uma vez que a madeira se encontrava quase em sua totalidade carbonizada, indicando o final do processo de carbonização. Excepcionalmente, o duto permaneceu com temperatura maior que nas demais partes da fornalha, devido à proximidade do braseiro com a região onde estava ocorrendo a termo degradação da madeira e consequentemente a liberação de energia.

### 5.5. Análise dos gases da carbonização

Na Tabela 8 estão os valores médios percentuais de cada gás analisado, no duto, ou seja, na saída do forno e posteriormente na chaminé, em função das fases da carbonização.

**Tabela 8 – Valores médios (%) dos gases da carbonização**

Gás (%)	Fases da Carbonização							
	Fase 1 (25-150 °C)		Fase 2 (150-275 °C)		Fase 3 (275-375 °C)		Fase 4 (375-400 °C)	
	Duto	Chaminé	Duto	Chaminé	Duto	Chaminé	Duto	Chaminé
CO	2,72	1,92	6,14	3,75	7,33	1,38	4,24	0,37
CO <sub>2</sub>	10,68	8,25	24,11	16,09	21,16	18,13	10,65	15,78
CH <sub>4</sub>	0,34	0,23	0,68	0,44	1,47	0,27	2,64	0,15
O <sub>2</sub>	10,30	12,35	4,33	9,39	4,03	5,80	4,11	7,10
H <sub>2</sub>	1,03	0,72	2,60	1,62	2,54	1,69	2,58	1,40

Observa-se que houve diferença entre as concentrações médias dos gases no duto e na chaminé durante as primeiras fases, devido à entrada de ar atmosférico no sistema, principalmente pela antecâmara, ocasionando sua diluição e a consequente redução dessa concentração, pois na primeira e na segunda fase não houve combustão dos gases na fornalha e as médias das temperaturas não ultrapassaram 100 °C.

Verificou-se também que a concentração média de oxigênio no duto é mais alta na primeira fase, 10,30%, e depois se estabiliza em média de 4,16%,

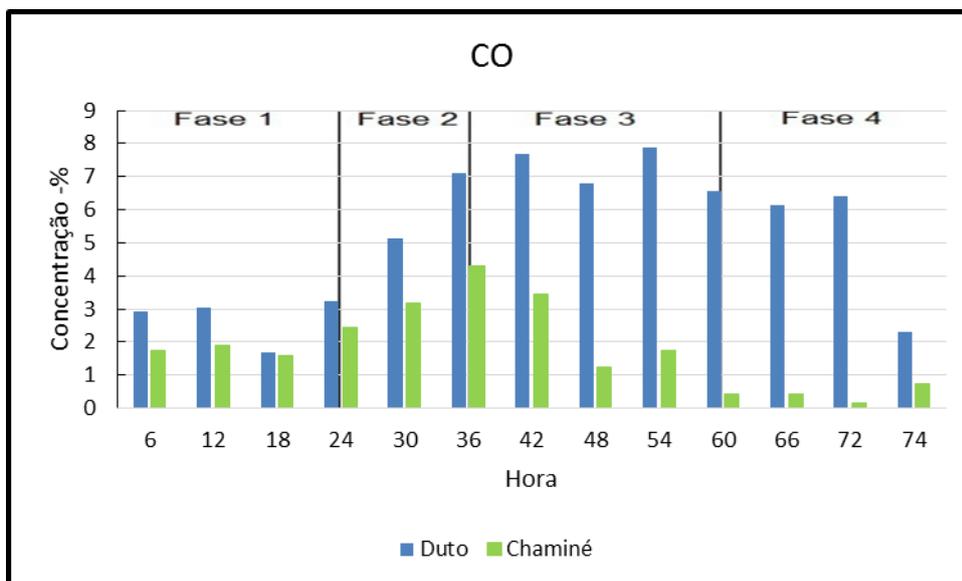
nas três últimas fases, demonstrando que parte do oxigênio para as reações de combustão na fornalha foi proveniente do forno. A concentração média de oxigênio na chaminé foi reduzida na terceira e na quarta fase em relação à primeira e à segunda, quando ocorreu a combustão dos gases na fornalha. No entanto verificou-se uma concentração sendo liberada, devido ao excedente de oxigênio necessário para favorecer a combustão completa dos gases, com maior admissão de ar primário na câmara de combustão. Coelho (2013) também encontrou redução nos níveis de oxigênio na chaminé em cerca de 15%, associado à elevação da concentração de CO<sub>2</sub>, indicando a oxidação dos combustíveis.

Também constatou-se que a concentração de hidrogênio foi menor que a dos demais gases no duto. Deve ser ressaltado que o percentual de hidrogênio no duto é importante, pois ele é um gás inflamável e de alto poder calorífico superior, de aproximadamente 33.900 kcal/kg, enquanto o metano é de aproximadamente 12.249 kcal/kg. Pela Tabela 8 pode-se constatar que na terceira e quarta fase houve uma sensível redução do hidrogênio na chaminé em relação ao duto, evidenciando que parte desse gás entrou em combustão na fornalha. A redução média foi de 39,44 % nas concentrações de H<sub>2</sub>, menor que a do metano e monóxido de carbono. Isto acontece porque H<sub>2</sub> também provém de craqueamento secundário, por exemplo, do alcatrão (WANG *et al.*, 2009).

Constatou-se que os valores médios de monóxido e dióxido de carbono obtidos no duto aumentaram entre a primeira e a segunda fase, permanecendo com valores próximos na terceira fase. Na quarta fase houve redução desses gases. Este fato pode ser explicado porque nas fases endotérmicas da carbonização é necessário que parte da carga de madeira enforada sofra combustão, principalmente nas regiões próximas aos “tatus”, para prover energia para secagem e carbonização do restante da madeira. Essas combustões parciais ocasionam maior degradação da madeira e conseqüente maior volume de gases, elevando os níveis de CO<sub>2</sub> e CO.

Verificou-se redução média de 86% nas concentrações do CO nas duas últimas fases, período em que a fornalha esteve acesa, evidenciando sua oxidação. Coelho (2013) obteve redução de 74% desde gás e o considera responsável pela manutenção da chama dentro da fornalha, por ser o composto oxidável em maior abundância no sistema.

Nas Figuras 14, 15 e 16 estão as concentrações médias, de 6 em 6 horas, dos gases CO, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, respectivamente, nas carbonizações.



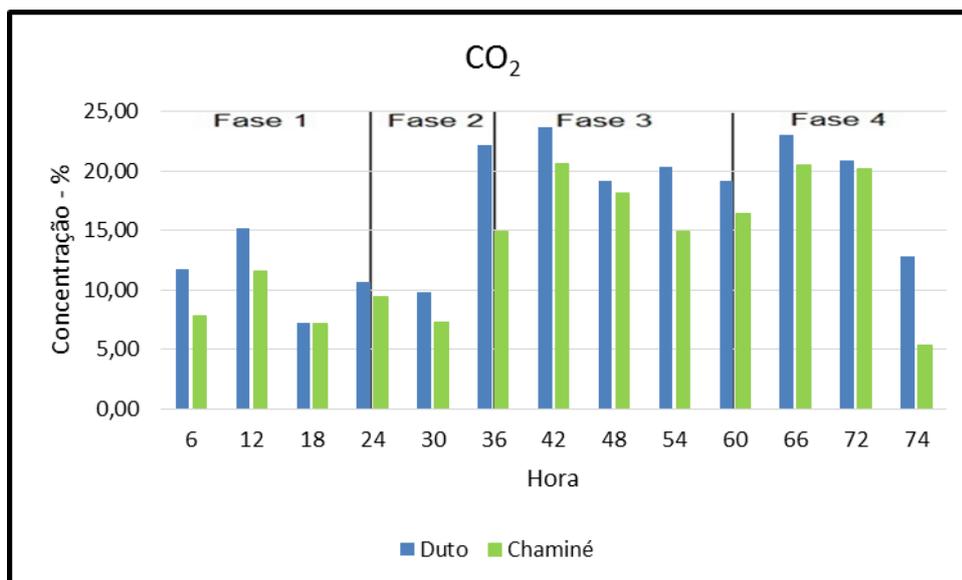
**Figura 14** - Concentração média de CO em função do tempo de carbonização.

Observou-se que a quantidade de monóxido de carbono se elevou no duto com o aumento da temperatura do forno. Somente no final da última fase, quando o processo de carbonização é finalizado, ocorreu a diminuição da concentração, pois a carga de madeira enforada já se encontrava em quase sua totalidade convertida em carvão, diminuindo o volume de gases gerados pela degradação da madeira.

Também observou-se que as quantidades de CO liberadas para o ambiente foram reduzidas entre as duas primeiras e as duas últimas fases da carbonização, o que foi evidenciado pela diferença das alturas das barras do gráfico nas duas últimas fases, representando as concentrações de CO no duto e na chaminé, devido à sua combustão na câmara de combustão.

Verificou-se aumento na concentração de monóxido de carbono na chaminé na 54<sup>a</sup> hora, devido ao apagamento da fornalha, provavelmente pela redução da concentração de gases combustíveis e pelo excesso de oxigênio. Então, procedeu-se novamente à queima de resíduos lignocelulósicos na fornalha, que se manteve acesa até o final do processo.

Na Figura 15 é apresentada a concentração de dióxido de carbono no duto e na chaminé, em função do tempo de carbonização.



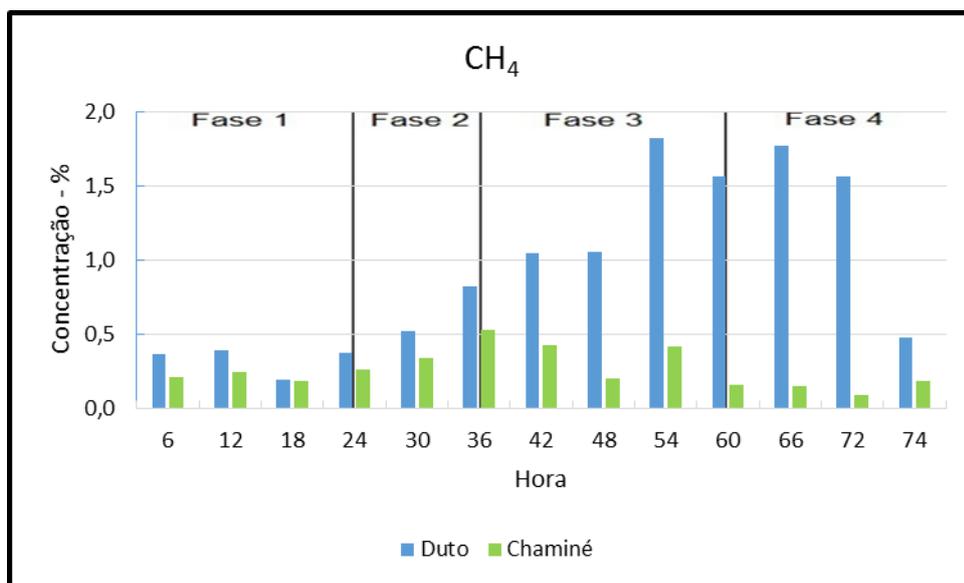
**Figura 15** - Concentração média de CO<sub>2</sub> em função do tempo de carbonização.

Observa-se que as concentrações médias de dióxido de carbono na chaminé e no duto tiveram valores próximos, ao contrário do que se esperava na terceira e na quarta fase, pois a combustão dos gases na fornalha resultaria em sua maior concentração na chaminé. Este fato pode ser explicado pela diluição do CO<sub>2</sub> pelo ar atmosférico, uma vez que a abertura da entrada de ar auxiliar da antecâmara foi aumentada para garantir oxigênio suficiente para ocorrência das reações, visto que nessas fases ocorre maior formação de gases no forno, demandando maior quantidade de oxigênio.

É importante ressaltar que o ar atmosférico possui aproximadamente 78% de nitrogênio, praticamente inerte nas reações de oxidação até as temperaturas observadas na fornalha. A taxa de formação de NO<sub>x</sub> térmico é significativa somente para temperaturas superiores a 1526,8 °C (SAROFIM; FLAGAN, 1976), devido à alta energia de ativação exigida. Lefebvre (1995) também relatou que pouca quantidade de NO<sub>x</sub> térmico é formada com temperaturas abaixo de 1576,8 °C.

É importante ressaltar que a elevação do gradiente de temperatura aumenta a pressão manométrica negativa exercida pela chaminé, como também o poder de exaustão dos gases de dentro do forno e o poder de succionar o ar atmosférico, fonte do fornecimento de oxigênio para as reações no interior da fornalha, tendo como consequência a diluição da concentração de CO<sub>2</sub>.

Na Figura 16 é apresentada a concentração média de metano em função do tempo de carbonização da madeira.



**Figura 16** - Concentrações médias de CH<sub>4</sub> em função do tempo de carbonização.

De modo geral, verificou-se o aumento gradativo das concentrações médias de metano no duto com o aumento da temperatura do forno, que apesar de não ultrapassar em média os 2% é bastante expressiva, pois ele é considerado 25 vezes potencialmente mais causador do efeito estufa do que o CO<sub>2</sub>.

Observa-se que houve redução das emissões de metano na terceira e na quarta fase, da ordem de 88,03%, evidenciando sua combustão na fornalha. Valores superiores foram encontrados por Cardoso *et al.* (2010) relataram redução de 96% do metano após a queima dos gases e por Coelho (2013), de 99,8%. A baixa concentração de metano explica a não ocorrência de 100% de redução desse gás. Segundo Law (2006), o limite de inflamabilidade do CH<sub>4</sub> varia entre 5 e 15%, a 1atm e 25 °C, no entanto, estes limites se alargam com o aumento da temperatura.

Observa-se na Figura 16 que houve um pico de emissão de metano na chaminé, assim como o de monóxido, na 54<sup>a</sup> hora de carbonização, também devido ao apagamento da fornalha, ocasionado pelo grande volume de gases advindos do forno. Em seguida, constatou-se que a concentração de metano volta a ser reduzida, devido à nova ignição da fornalha e também em função do melhor equilíbrio e da melhor estabilidade do forno, obtidos com o controle dos

gases de saída pela válvula borboleta e pela admissão de ar primário na fornalha.

Na Tabela 9 estão os valores percentuais médios de redução alcançada pela fornalha para o CO, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub> na terceira e na quarta fase e a redução média nessas duas fases, comparando-se as concentrações obtidas no duto e na chaminé.

**Tabela 9** - Redução das concentrações na chaminé em relação ao duto

<b>Redução nas Concentrações (%)</b>			
<b>Gases</b>	<b>3ª Fase</b>	<b>4ª Fase</b>	<b>Média</b>
<b>CO</b>	81,18	91,31	86,24
<b>CH<sub>4</sub></b>	81,71	94,36	88,03

Observa-se que a fornalha, quando operante, conseguiu reduzir grande parte da emissão dos gases nocivos para atmosfera.

No entanto, melhores resultados poderiam ser obtidos com a utilização de materiais construtivos refratários para promover o amortecimento térmico e o isolamento do sistema. Além disso, a sincronia de vários fornos acoplados a uma única fornalha, faz com que cheguem até a fornalha gás com poder calorífico suficiente para manter a temperatura da câmara alta o suficiente, realizando a combustão dos gases durante todas as etapas da carbonização, evitando o apagamento da chama no seu interior.

Deste modo, ressalta-se a necessidade de pesquisas sobre sincronia de fornos acoplados a uma mesma fornalha para estudo da possibilidade da combustão contínua dos gases durante toda a carbonização, o que minimiza o uso de combustível auxiliar e resulta em maiores reduções de monóxido de carbono e metano, tornando as unidades produtoras de carvão mais salubres para os operadores e melhorando da qualidade do ar das comunidades do entorno das UPCs.

## 6. Conclusões

- A utilização da fornalha metálica para combustão dos gases da carbonização não prejudicou o desempenho da carbonização da madeira, mantendo valores médios satisfatórios de rendimento e qualidade do carvão vegetal.

- O consumo de combustível auxiliar (77 kg) foi minimizado pelo estrangulamento da câmara de combustão, correspondendo apenas a 0,78% da madeira enfiada, o que é considerado baixo se comparado ao consumo dos fornos de alvenaria já avaliados.

- A fornalha metálica promoveu a combustão dos gases da carbonização da madeira em 98% do tempo total da terceira fase e em 81% do tempo total da quarta fase, mantendo-se acesa em média por 42% do tempo total das carbonizações.

- A utilização da fornalha metálica para combustão dos gases reduziu significativamente as concentrações de CO e CH<sub>4</sub> na massa de gás expelida pela chaminé, em média 86 e 88%, respectivamente, o que contribui para a mitigação do efeito estufa.

- A fornalha não apresentou avarias ou quaisquer alterações físicas significativas visíveis ao longo de sua utilização, apesar do registro de temperaturas elevadas em seu exterior, em torno de 180 °C, evidenciando a necessidade de maior isolamento térmico.

- A fornalha metálica para combustão dos gases da carbonização pode ser considerada uma alternativa às fornalhas convencionais de alvenaria, pois realiza eficientemente a combustão dos gases da carbonização e tem potencial de ser produzida em escala comercial, adaptando-se a novas e a UPCs já existentes e atendendo a pequenos, médios e grandes produtores de carvão vegetal.

## **7. Recomendações**

Recomenda-se melhor isolamento da fornalha metálica, pois ocorreram altas temperaturas em seu exterior, cerca de 180 °C, o que representa um risco para o operador, além de perdas térmicas para o meio.

Recomenda-se o estudo do uso de materiais refratários na antecâmara para o amortecimento térmico, favorecendo a inércia térmica do sistema, ou seja, a manutenção das altas temperaturas no interior da fornalha.

Recomendam-se, ainda, futuros estudos sobre o arranjo e a sincronia de fornos para se acoplarem à mesma fornalha, no intuito de se manter constante a chama em seu interior, propiciando, assim, a combustão dos gases durante todo o processo de carbonização.

## 8. Literatura Citada

ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. A. **O Processo de carbonização contínua da madeira: produção e utilização do carvão vegetal**. Belo Horizonte, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC, 1982. p. 143-156.

ASSIS, P. S.; MARINHO, L. Z. A.; PORTO, F. M. **Utilização do carvão vegetal na siderurgia**. Belo Horizonte: CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 286-288.

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.

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-ABNT. **NBR 8112** Carvões vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 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. **NBR 11941** Madeiras: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF: ano base 2012**. Brasília, 2013. 148 p.

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

ARCELORMITTAL BIOFLORESTAS. **Energia para gerar sustentabilidade**.

Disponível em:

<<http://www.arcelormittalbioflorestas.com.br/index.asp?Grupo=30&SubGrupo=76&ID=87>>; acesso em 10 de setembro, 2013.

BARCELLOS, D.C. Avanços tecnológicos da produção de carvão. **II Fórum Nacional sobre produção de carvão vegetal**. Sete Lagoas, MG, out 27-29, 2010.

BARCELLOS, D. C. **Forno Container para produção de carvão vegetal: desempenho, perfil térmico e controle da poluição**. 2002. 72p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2002.

BARCELLOS, D. C.; VITAL, B. R.; SILVA, J. S.; PIMENTA, A. S.; COUTO, L. C. FORNALHA CELULAR COMO FONTE DE CONTROLE DA POLUIÇÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA NO PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO UTILIZANDO FORNO CONTAINER. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 4, p. 335-342, 2004.

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.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L.E.G.; MURAMOTO, M.C.; COUTO, H. T. Z. do. Estimativa da densidade a granel do carvão vegetal a partir de sua densidade aparente. **IPEF: CIRCULAR TÉCNICA**. n.150, 1982.

BRITO, J. O; CARNEIRO, A. C; TRUGILHO, P. F & RODRIGUEZ, A. V.

**Produção de Carvão Vegetal no Brasil e o Atual Estágio das Tecnologias para aproveitamento dos Gases do Processo**. Disponível em:

<http://www.ciflorestas.com.br/download.php?tabela=documentos&id=987&leitura=s>. Acesso em: 06 de setembro de 2013.

BRITO, J. O. Carvão Vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais. **Estudos Avançados**; vol. 4, 9p 221-227. Agosto 1990.

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

BRITO, J. O. Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. **IPEF: CIRCULAR TÉCNICA**. Nº 181, 1993.

BROWING, B. L. The composition and chemical reactions off wood. In: BROWING, B. L. **The chemistry of wood**. Wincosin, Academic Press, p.57-102, 1974.

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.

CARNEIRO, A. C. O. **Treinamento sobre Produção de Carvão Vegetal**. Apostila Técnica. Universidade Federal de Viçosa – MG. 05 a 07 de jun. 2013.

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.

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.

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

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

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

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

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.

COSTA, K. Sebastião e sua ideia visionária: a primeira refinaria ecológica do Brasil. **EcoD**. 28 de julho de 2013. Disponível em: <[http://www.ecodesenvolvimento.org/posts/2013/julho/a-primeira-refinaria-de-carvao-ecologica-do-brasil/popup\\_impresao](http://www.ecodesenvolvimento.org/posts/2013/julho/a-primeira-refinaria-de-carvao-ecologica-do-brasil/popup_impresao)>; acessado em: 02/11/2013.

DUBOC, E.; COSTA, C. J.; VELOSO, R. F.; OLIVEIRA, L. dos S.; PALUDO, A. **Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e no Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 37p. (Documentos, 197).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. 2011. **Balanco Energético Nacional 2012: Ano Base 2011**. Rio de Janeiro, 2012. 282p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. 2013. **Balanco Energético Nacional 2013: Ano Base 2012**. Rio de Janeiro, 2013. 284p.

FLORESTAL ACESITA S.A. (1982) **“State of the Art Report on Charcoal Production in Brazil”**. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

FU, P.; HU, S.; XIANG, J.; SUN, L.; YANG, T.; ZHANG, A.; ZHANG, J. Mechanism study of rice straw pyrolysis by fourier transform infrared technique.

**Chinese Journal of Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 3, n. 17, p. 522-529, 2009.

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.

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWING, C. H. (Eds) **Lignins**. New York: Wiley Interscience, p. 241-266. 1971.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. 1986. **O Papel**, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

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

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Share of total primary energy supply in 2008: **energy statistics**, 2010. Disponível em: <[http://www.iea.org/textbase/stats/pdf\\_graphs/29TPESPI.pdf](http://www.iea.org/textbase/stats/pdf_graphs/29TPESPI.pdf)>. Acessado em: 01 set. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Banco de dados**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home2/index>>, acessado em 02 de maio de 2014.

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.

LATORRE, F.L., CUNHA, W.L.P. **Evolução da produção e utilização de energia renovável na Acesita Energética**. Seminário: Prática, Logística, Gerenciamento e Estratégias para o Sucesso da Conversão da Matéria Lenhosa em Carvão Vegetal para Uso na Metalurgia e Indústria. Belo Horizonte, nov. 27-28, 2006.

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

LEFEBVRE, A.H. Gas Turbine Combustion. U.S.A.: Hemisphere Publishing Corporation, 1983. The Role of Fuel Preparation in Low-Emission Combustion. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**. U.S.A., v. 117, pp. 617-654, october 1995.

LEPAGE, E.S.; OLIVEIRA, A.M.F.; LELIS, A.T.; LOPEZ, G.A.C.; CHIMELO, J.P.; OLIVEIRA, L.C.S.; CAÑEDO, M.D.; CAVALCANTE, M.S.; IELO, P.K.Y.; ZANOTTO, P.A.; MILANO, S. **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, 1986. v. 1, 342 p.

LeVAN, S. L.; WINANDY, J. E. Effects of fire retardants treatment on wood strent: a review. **Wood Science and Techonology**, v.22, p.113-131, 1990.

LOPES, K. V; BERBERIAN, G. A.; MACEDO E. G. caracterização e comparação do carvão vegetal comercializado em três supermercados de diferentes níveis socioeconômicos em Belém-PA. **X Congresso Nacional do Meio Ambiente de Poços de Caldas**. 22 a 24/05/2013.

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.

LOTFI, S.V. A Siderurgia brasileira a carvão vegetal: um estudo de arranjos verticais. 141 f.. Dissertação (Mestrado em Administração), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

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.

- MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: PENEDO, W.R. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, M.G. CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.9- 26, 1982.
- MELO, F.A.O. **Projeto, construção e avaliação de uma fornalha para aquecimento de ar utilizando combustíveis particulados finos**. 2003. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.
- 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.
- MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. **Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal**. 1982. In: produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte – MG. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. 393p.
- MEZERETTE, C.; GIRARD, P. **Environmental Aspects of Gaseous Emissions from Wood Carbonization and Pyrolysis Processes**. Centre Technique Forestier Tropical, France, 20 p. 1996.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Registros Administrativos: RAIS e CAGED**. Brasília: MTE, SPPE, DES, CGET, 2012.
- 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.
- OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa. 2012. Viçosa-MG.
- OLIVEIRA, E. **Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no Semi-Árido Nordeste**. 2003. 122f. Tese DSc. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

OLIVEIRA, E.; VITAL, B. R.; PIMENTA, A. S.; DELLA LUCIA, R. M.; LADEIRA, A. M. M.; CARNEIRO, A. C. O. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, Viçosa, v.30, n.2, p. 311-318, 2006.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Propriedades do carvão vegetal. In: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (Ed.). **Carvão vegetal: destilação, propriedades e controle de qualidade**. Belo Horizonte: CETEC, p. 39-61, 1982a.

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

OLIVEIRA, R. L. M. **Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal**. 2009. 129p. Dissertação MSC. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG. 2009.

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. & BAYONA, J. M. & GARCIA, M. T. & SOLANAS, A. M. 1999. **Evaluation of Acute Toxicity and Genotoxicity of Liquid Products from Pyrolysis of *Eucalyptus grandis* Wood**. Archives of Environmental Contamination and Toxicology.

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.

QUIRINO, W.F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília: LPF; IBAMA, 2002. 35 p.

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, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica, contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. Dissertação MSc. - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

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

Disponível em:

<[painelflorestal.com.br/exibeNews.php?id=1784](http://painelflorestal.com.br/exibeNews.php?id=1784)>. Acesso em: 31 de janeiro, 2013.

SAMPAIO, R. S.– CGEE. Estudo prospectivo do Setor Siderúrgico. **Panorama do Setor Siderúrgico**. Brasília: CGEE, 2008. 35p. [Estudo]

SCHOUT, C. M.; MECCA, M. **Processo Industrial Contínuo de Carvão Vegetal**. Fórum Nacional do Carvão Vegetal. 21 e 22 de outubro de 2008. Belo Horizonte. MG.

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.

SHAFIZADEH, F., DeGROOT, W. F. Combustion characteristics of cellulosic fuels. In: SHAFIZADEH, F.; SARKANEN, K.V.; TILLMAN, D.A. **Thermal uses and properties of carbohydrates and lignins**. New York, p.1-18, 1976.

SHEN, R.; GU, S.; BRIDGWATER, A.V. The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: Cellulose and hemicelluloses. **Carbohydrate Polymers**, v.82, p. 39-45, 2010.

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.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE - UNFCCC. Indicative simplified baseline and monitoring methodologies for selected small-scale CDM Project activity categories AMSIIIK “Avoidance of methane release from charcoal production by shifting from traditional open-ended methods to mechanized charcoaling process”: version 04. 2008. 28 p. Disponível em:

<[http://cdm.unfccc.int/filestorage/CDMWf\\_AM\\_ZBFK5T27N1DE9P6WT0J7DU\\_PLEQ1VLM/EB44\\_repan19\\_AMS\\_III.K\\_ver04.pdf?t=RWN8MTI5MTA2MDIwNC45Mg==|ntXa6ksuwlOiWIEax4bxh\\_mCQjM=>](http://cdm.unfccc.int/filestorage/CDMWf_AM_ZBFK5T27N1DE9P6WT0J7DU_PLEQ1VLM/EB44_repan19_AMS_III.K_ver04.pdf?t=RWN8MTI5MTA2MDIwNC45Mg==|ntXa6ksuwlOiWIEax4bxh_mCQjM=>)>. Acesso em: 07 set. 2013.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Jerônimo Monteiro-ES: 2008. p. 196-246.

VITAL, B. R.; BASTOS FILHO, J.; VALENTE, O. F. Efeito da idade da árvore sobre o rendimento gravimétrico e teor de carbono fixo de carvão de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 9, n. 2, p. 180-185, 1985.

VIENA SIDERÚRGICA S.A. Disponível em:

<[http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/doc\\_experiencias\\_central\\_15139.pdf](http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/doc_experiencias_central_15139.pdf)>. Acesso em: 10 de setembro de 2013.

VITAL, B. R.; JESUS, R. M.; VALENTE, O. F. Efeito da constituição química e da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v.10, n.2, p. 151-160, 1986.

VITAL, M.H.F.; PINTO, M.A.C. **Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil**. BNDS setorial 30, p. 237-297. 2011.

VLASOV, D. **Combustíveis, combustão e câmara de combustão**. Editora da UFPR, Curitiba, 2001. 185p.

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.