

CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE QUEIMA DE GASES DA CARBONIZAÇÃO PARA REDUÇÃO DA EMISSÃO DE POLUENTES

Marco Túlio Cardoso¹, Renato Augusto Pereira Damásio², Angélica de Cássia Oliveira Carneiro³,
Laércio Antônio Gonçalves Jacovine⁴, Benedito Rocha Vital⁵, Daniel Câmara Barcelos⁶

RESUMO: A fumaça gerada no processo de carbonização contém vários poluentes que são nocivos ao ser humano e que também contribuem para o efeito estufa. Diante desse cenário, objetivou-se, com a realização desta pesquisa, a construção e a avaliação de um sistema de queima dos gases da carbonização que possibilite a diminuição da emissão de poluentes e a cogeração de energia, tornando o processo mais eficiente, do ponto de vista tecnológico e ambiental. O trabalho foi realizado em parceria com a empresa ArcelorMittal Bioenergia. Foi construído um forno retangular em escala laboratorial com capacidade de dez estêreos de madeira, com fornalha para combustão dos gases e chaminé. O forno e a fornalha foram construídos com quatro aberturas laterais, para controle da carbonização e entrada de oxigênio para a câmara de combustão para a queima dos gases, respectivamente. Os gases despreendidos na carbonização passam por uma conexão entre o forno e a câmara de combustão, onde ocorre a queima dos mesmos. Verificou-se que, durante a queima dos gases, não houve liberação de fumaça visível pela chaminé, como ocorre em sistemas tradicionais. O sistema de queima de gases não alterou o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e é eficiente, do ponto de vista da redução da emissão de poluentes, diminuindo em 96% e 93% de metano e monóxido de carbono, respectivamente. Dessa forma, o ar quente produzido pode ser reutilizado na forma de energia térmica.

Palavras chave: Carbonização, câmara de combustão, gases poluentes.

CONSTRUCTION OF A GAS BURNING SYSTEM RESULTING FROM CARBONIZATION TO REDUCE POLLUTANTS EMISSIONS

ABSTRACT: The smoke generated in the carbonization process contains various pollutants which are harmful to humans and also contribute to the greenhouse effect. In this scenario, the aim with this research was the construction and evaluation of a system for burning gases from carbonization, which would help decrease the emission of pollutants and the co-generation of energy, making the process more efficient in terms of technology and environment. The study was conducted in partnership with ArcelorMittal Bioenergy. A rectangular laboratory scale oven was built with capacity of 10 wood stere, with furnace for gases combustion and chimney. The oven and the furnace were constructed with four laterals openings to control the carbonization and entrance of oxygen into the combustion chamber for gas burning, respectively. The carbonization gases went through a connection between the furnace and the combustion chamber, where the gases burning occurred. It was observed that during the burning of the gases no visible smoke was released into the chimney as occurs in traditional systems. The system for gases burning did not change the charcoal gravimetric yield and is efficient in terms of reducing emissions, decreasing in 96% and 93% methane and carbon monoxide, respectively. That way the hot air produced can be reused in the form of thermal energy.

Key words: Carbonization, combustion chamber, gaseous pollutants.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é responsável por 40% da produção mundial de carvão vegetal, tendo como destino principal a

produção de ferro gusa, aço, ferro ligas e silício metálico. Em 2008, o país consumiu cerca de 34 milhões de m³ de carvão vegetal. Ressalta-se que o estado de Minas Gerais detém o maior parque siderúrgico a carvão vegetal do

¹Engenheiro Florestal – Mestre em Ciência Florestal – Departamento de Engenharia Florestal/DEF – Universidade Federal de Viçosa/UFV – Viçosa, MG – 36571-000 – mtulio_cardoso@yahoo.com.br

²Graduando em Engenharia Florestal – Departamento de Engenharia Florestal/DEF – Universidade Federal de Viçosa/UFV – Viçosa, MG – 36571-000 – damasiorenato@gmail.com

³Professora Adjunto do Departamento de Engenharia Florestal/DEF – Universidade Federal de Viçosa/UFV – Viçosa, MG – 36571-000 – cassiacarneiro@ufv.br

⁴Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Florestal/DEF – Universidade Federal de Viçosa/UFV – Viçosa, MG – 36571-000 – jacovine@ufv.br

⁵Professor Titular do Departamento de Engenharia Florestal/DEF – Universidade Federal de Viçosa/UFV – Viçosa, MG – 36571-000 – bvital@ufv.br

⁶Engenheiro Florestal – Doutor em Ciência Florestal – Delta Acessória em Pesquisa e Desenvolvimento – Martinho Campos, MG – 35606-000 – camara@uai.com.br

mundo e tem se destacado como o maior produtor e consumidor desse insumo energético, atingido a marca de 21,908 milhões de mdc, no ano de 2007, que corresponde a 59,67% do total produzido (ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA, 2009). Vale salientar que o setor de base florestal participa com 7% do PIB mineiro (ASSIS, 2003) e, haja vista a importância para o estado, criou-se, em 2007, o Polo de Excelência em Florestas, com sede na Universidade Federal de Viçosa, como um instrumento de apoio ao desenvolvimento desse importante segmento.

Os dois grandes problemas relacionados com o carvão vegetal ligam-se à questão da tecnologia empregada na sua produção, envolvendo também a questão ambiental e a matéria-prima que lhe deu origem.

A maior parte do carvão vegetal produzido atualmente no Brasil é proveniente de fornos rudimentares de baixo rendimento e sem controle de emissões atmosféricas, causando impactos econômicos, sociais e ambientais.

Desse modo, o desenvolvimento de fornos com tecnologias de baixo custo de aquisição e que aumentem seu rendimento em produção, além de recuperarem ou queimarem os gases da carbonização, reduzindo a poluição, para pequenos produtores de carvão vegetal e empresas de menor porte, é imprescindível, haja vista que grande parte da produção nacional provém destes.

A redução das emissões de gases de efeito estufa na carbonização, por meio da combustão dos mesmos, além das vantagens para o meio ambiente, pode ser economicamente interessante, a partir da possibilidade de gerar projetos de créditos de carbono, pois há, nesse processo, a redução da emissão, principalmente de metano, que é cerca de 21 vezes mais nocivo que o dióxido de carbono (ELK, 2010).

Assim, o desenvolvimento de uma fornalha capaz de queimar os gases da carbonização em fornos de alvenaria, torna-se um passo importante para uma nova perspectiva para a produção de carvão vegetal, buscando mitigar os impactos negativos e otimizar a produção e a qualidade do carvão vegetal.

Este trabalho foi realizado com o objetivo geral de avaliar um sistema de forno com uma fornalha para queima dos gases da carbonização que possibilite a redução da emissão de poluentes, tornando o processo de carbonização mais eficiente, do ponto de vista tecnológico e ambiental.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local

O trabalho foi realizado no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, no Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, em município de Viçosa, MG.

2.2 Projeto do forno e fornalha para queima dos gases da carbonização

A construção do forno seguiu os parâmetros apresentados na Figura 1, nos quais se buscou projetar um forno com fornalha para queima de gases similar aos fornos retangulares industriais, porém, em escala piloto. Buscou-se projetar um forno com as mesmas características dos fornos retangulares industriais instalados na Unidade de Produção de Carvão Buritis. O projeto foi desenvolvido em conjunto com a empresa ArcelorMittal Bioenergia, situada em Martinho Campos, MG.

O sistema forno-fornalha foi projetado para a carbonização de 10 metros estéreo de madeira, tendo a possibilidade de carbonização da madeira tanto na vertical quanto na horizontal. O forno foi desenvolvido com quatro aberturas laterais, sendo uma em tamanho maior, para efetuar a ignição do forno e as demais, para o controle da carbonização. A fornalha também foi construída com quatro aberturas laterais para o controle da oxigenação dentro da câmara de combustão. Entre o forno e a fornalha foi colocada uma guilhotina, para controle dos gases para dentro da câmara de combustão.

2.3 Construção do sistema forno e fornalha

Antes do início da construção do forno e da fornalha, foi realizado o nivelamento do solo na área destinada à construção.

A construção foi iniciada com a marcação do terreno para a confecção da fundação, que foi feita com concreto armado e pedra de mão. Posteriormente, procedeu-se a construção das paredes do forno, fornalha e chaminé, sendo as mesmas feitas em paredes de 20 cm de largura e com tijolos maciços. Para o assentamento dos tijolos, utilizou-se massa contendo terra, areia, cola

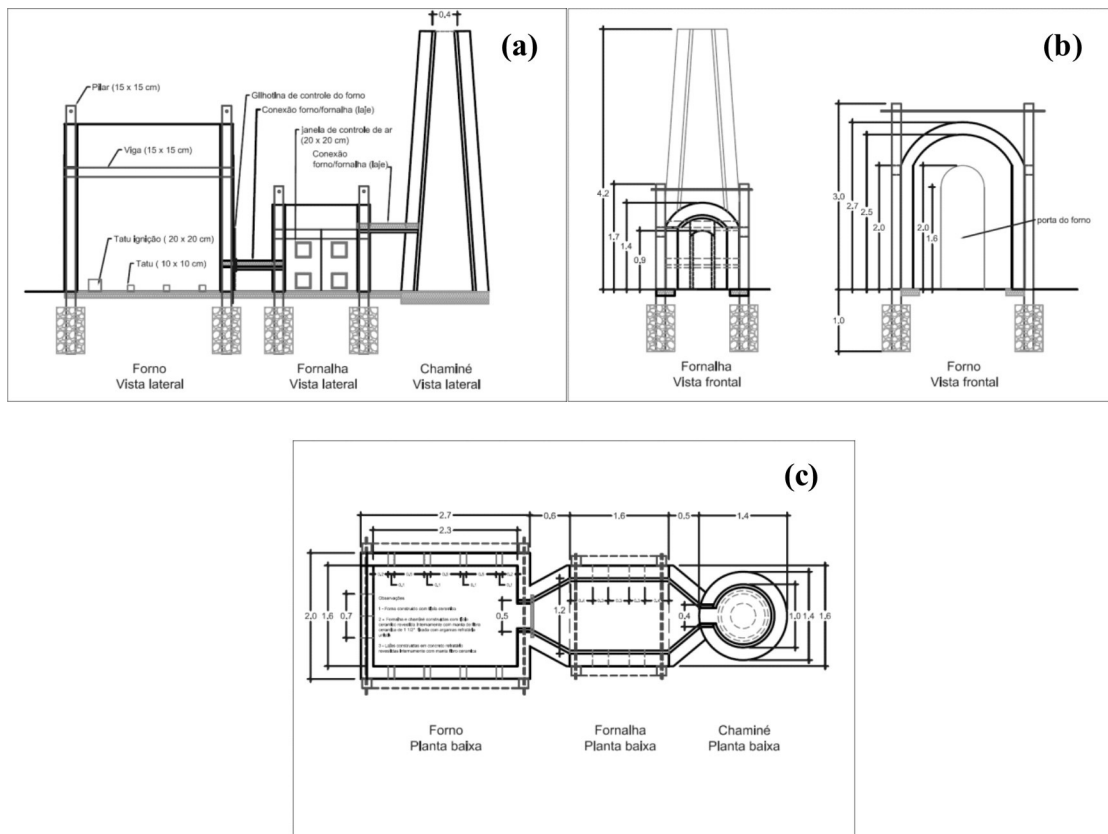


Figura 1 – (a) Vista lateral do forno com fornalha; (b) vista frontal do forno e da fornalha; (c) planta baixa do forno com fornalha.

Figure 1 – (a) Kiln with furnace side view, (b) Kiln and the furnace front view; (c) Kiln with furnace floorplan.

branca (PVA) e açúcar, com o objetivo de suportar o calor durante as carbonizações, evitando-se trincas e rachaduras.

Nas paredes do forno e da fornalha, foram feitas as aberturas para controle da entrada de ar (Figura 2).

Após o término das paredes, foram produzidos os pilares e as vigas de sustentação, com concreto armado. Para a construção das copas do forno e da fornalha, primeiramente foi confeccionado um gabarito de compensado acompanhando o formato arredondado da copa, sustentado por toras de madeira, para a posterior construção da copa. Apoiadas no gabarito, as copas foram construídas com espessura de 20 cm, com tijolos em formato de cunha.

A fornalha e a chaminé receberam, no interior de suas paredes, revestimento de manta cerâmica, que foi

aderida com argamassa refratária. O forno não recebeu nenhum acabamento interno nas paredes e o piso foi feito de tijolo maciço.

A manta cerâmica utilizada foi a NUTECIBAR HT, constituída de Al_2O_3 (52% a 54%), SiO_2 (44% a 48%), Fe_2O_3 (0,1% a 0,2%) e TiO_2 (0,1% a 0,2%). As propriedades da manta são: limite máximo de uso a 1.482°C, limite contínuo de uso a 1.380°C, ponto de fusão a 1.760°C, diâmetro da fibra de 2,5 μ , comprimento da fibra 178 mm e contração linear de 2,0%, a 1.300°C, por 24 horas (NUTECIBAR FIBRAS CERÂMICAS, 2007).

As partes externas do forno, da fornalha e da chaminé foram revestidas com massa composta de terra e areia.

Com o objetivo de conferir maior resistência ao forno e à fornalha, devido às grandes pressões que os mesmos devem suportar, foram produzidas vigas

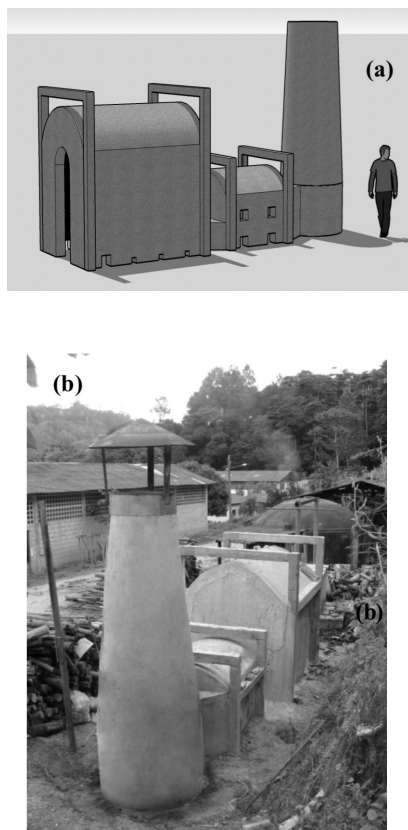


Figura 2 – (a) Protótipo do sistema forno/fornalha, (b) vista geral do forno, do queimador de gases e da chaminé.

Figure 2 – (a) System kiln / furnace prototype, (b) Overview of the kiln, the gas burner and chimney.

transversais unindo os pilares laterais, conforme mostrado na Figura 2.

Para a passagem dos gases do forno à fornalha, foi construída uma conexão com tijolos maciços na espessura de 20 cm, sendo feita uma laje na parte superior (teto); todo o seu interior também foi revestido de manta cerâmica.

No forno foram construídas quatro aberturas laterais para ignição e controle de oxigenação. Entre o forno e a fornalha, foi colocado uma guilhotina para controle de saída de gases, feita

Nas Tabelas 1 e 2 estão listados os materiais utilizados para a construção de todo o sistema forno-fornalha.

O custo de materiais para a construção do sistema de forno-fornalha foi de R\$ 3.640,98.

2.4 Carbonização da madeira

Foram realizadas carbonizações com e sem o sistema de queima de gases em funcionamento. Para tal, o forno foi preenchido com madeira de *Eucalyptus* sp., com idade de 8 anos, com comprimento de 2,10 m e diâmetro de 12 a 20 cm, na posição vertical, proveniente de plantios da empresa Plantar, situados no município de Felixlândia, MG, talhão 37 do Projeto Buritis.

O teor de umidade da madeira carbonizada foi de 24,09% e o controle das carbonizações foi realizado por pirometria.

2.5 Coleta e análise dos gases

Para proceder à coleta de gases foram feitos dois orifícios de, aproximadamente, 10 cm de diâmetro, na altura média da chaminé, cerca de 2,10 m, de modo a ficar um perpendicular ao outro. Foi também construída uma plataforma de madeira, para dar acesso aos orifícios.

A coleta dos gases na altura média da chaminé foi feita por meio de uma sonda que foi conectada ao sistema filtros para a retirada do material particulado e de possíveis gotículas de alcatrão. Foram feitas treze coletas durante toda a carbonização da madeira, sendo as sete primeiras de quatro em quatro horas e as demais, de três em três horas.

Para os procedimentos de coletas, acondicionamento e armazenamento, as amostras de gases foram observadas as normas Environmental Protection Agency (EPA), Method 18: coleta em bags.

As análises para a determinação das concentrações dos gases foram realizadas segundo as normas ASTM 1945.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Carbonização sem queima dos gases

Nesta etapa foi realizada a carbonização sem o funcionamento da fornalha, ou seja, liberando-se livremente os gases da carbonização pela chaminé.

Tabela 1 – Materiais utilizados para a construção da fornalha e chaminé.

Table 1 – Materials used for construction of the furnace and chimney.

Material	Quantidade	Unidade	Preço unitário	Total (R\$)
Tijolo prensado	3250	Unidade	0,18	585,00
Areia média lavada	1	m ³	60,00	60,00
Brita média	1	m ³	100,00	100,00
Cimento CII	3	saco	17,00	51,00
Vergalhão 5,0 mm	3	barra	8,53	25,59
Vergalhão 4,0 mm	3	barra	5,50	16,50
Cola branca	4	unidade	13,65	54,60
Açúcar cristal	20	kg	1,26	25,20
Terra de barranco horizonte B	1	m ³	20,00	20,00
Arame recozido	1	kg	5,80	5,80
Prego	1	kg	5,12	5,12
Serrinha metálica	2	unidade	4,00	8,00
Chapa metálica 50 cm x 55 cm	1	unidade	25,00	25,00
Transporte e frete	2	unidade	40,00	80,00
Manta cerâmica	16	m ²	43,00	688,00
Chapa metálica galvanizada	2	unidade	35,00	70,00
TOTAL (R\$)				1819,81

Tabela 2 – Materiais utilizados na construção do forno.

Table 2 – Materials used for construction of the kiln.

Material	Quantidade	Unidade	Preço unitário	Total (R\$)
Tijolo prensado	3000	Unidade	0,18	540,00
Areia média lavada	4	m ³	60,00	240,00
Brita média	1,5	m ³	100,00	150,00
Cimento CII	14	saco	17,00	238,00
Vergalhão 10mm (3/8)	15	barra	27,00	405,00
Vergalhão 4,0 mm (4.2)	10	barra	5,50	55,00
Açúcar cristal	25	kg	1,26	31,15
Arame recozido	1	kg	5,80	5,80
Prego	1	kg	5,12	5,12
Pedra de mão	1	m ³	80,00	80,00
Tábua	6,48	m ²	11,00	71,28
TOTAL (R\$)				1821,17

Por meio dos termopares instalados, obteve-se o perfil térmico da carbonização (Figura 3).

A temperatura máxima de carbonização foi de 460°C, atingida após 24 horas da ignição. O fechamento do forno ocorreu após aproximadamente 52 horas de carbonização, quando a fumaça na chaminé cessou e a temperatura dentro do forno começou a cair naturalmente.

Desde o início do processo, as entradas de ar da fornalha foram mantidas fechadas, evitando-se a oxigenação da mesma, para que não ocorresse a queima espontânea dos gases, conforme outrora fora confirmado, em testes preliminares. A temperatura máxima da fornalha foi de 120°C, atingida após 48 horas de carbonização. Ao atingir a temperatura de 120°C, as entradas de ar da fornalha foram abertas para que a mesma resfriasse, evitando-se a queima dos gases, visto que, a essa temperatura, os gases da carbonização entram em combustão, conforme demonstrado em testes preliminares.

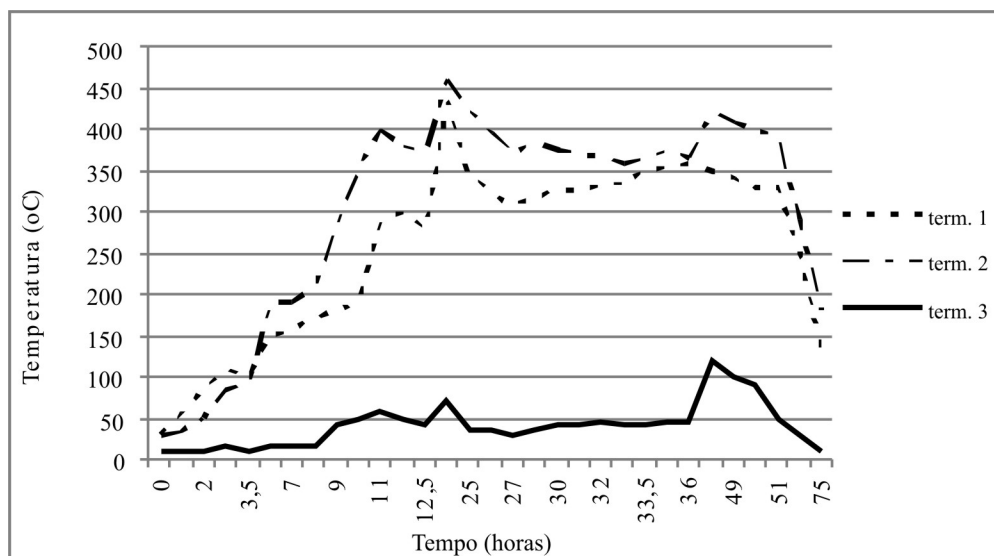
O rendimento gravimétrico em carvão vegetal e o teor de carbono fixo foram de 28,15% e 75,45%, respectivamente.

3.2 Carbonização com a queima dos gases

Na Figura 4 observa-se o perfil térmico da carbonização da madeira de *Eucalyptus* sp. com a queima dos gases pela fornalha.

A temperatura máxima atingida durante a carbonização foi de 500°C, ocorrendo após 31,5 horas da ignição. O fechamento total do forno ocorreu após 52 horas de carbonização, quando a fornalha cessou a queima dos gases da carbonização, e o fluxo e a temperatura dos mesmos diminuíram, indicando o fim do processo.

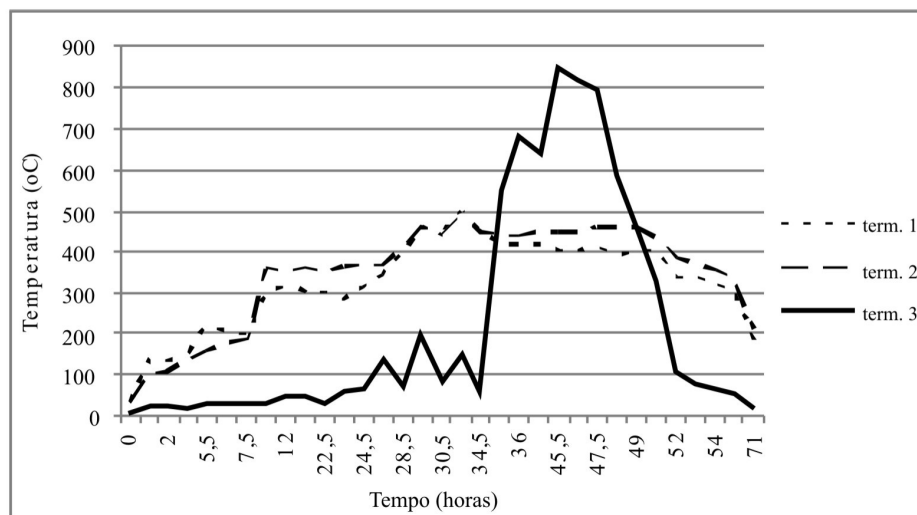
Para a queima dos gases, foi dada ignição na fornalha com resíduos lignocelulósicos, no mesmo instante da ignição do forno, mantendo-a acesa até o momento em que a chama permanecesse constantemente acesa, sem a necessidade de adicionar mais resíduos. No período entre 24,5 horas e 34,5 horas de carbonização, os gases começaram a ser queimados na fornalha, porém, com algumas interrupções, sendo necessário seu reacendimento.



Onde: Term. 1 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo à porta.
 Term. 2 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo à saída dos gases.
 Term. 3 : termopar colocado na saída de gases do forno para fornalha.

Figura 3 – Perfil térmico da carbonização sem queima dos gases pela fornalha.

Figure 3 – Thermal profile of carbonization without burning the gases through the furnace.



Onde: Term. 1 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo a porta.
 Term. 2 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo a saída dos gases.
 Term. 3 : termopar colocado na saída de gases do forno para fornalha.

Figura 4 – Perfil térmico da carbonização com queima dos gases pela fornalha.

Figure 4 – Thermal profile of carbonization with burning the gases through the furnace.

No entanto, a partir da 35ª hora de carbonização, quando a fornalha atingiu 120°C, os gases foram queimados com eficiência, por cerca de 17 horas ininterruptas, atingindo a temperatura máxima de 850°C, ou seja, a fornalha funcionou por aproximadamente 33% do tempo de carbonização. No período de queima dos gases, não houve emissão dos mesmos pela chaminé, sendo liberado apenas calor.

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal e o teor de carbono fixo obtidos com a queima dos gases da carbonização foram de 28,70% e 82,56%, respectivamente.

3.3 Análises dos gases da carbonização

Os gases da carbonização são substâncias combustíveis ricos em carbono e hidrogênio que, sob condições adequadas de temperatura e pressão, são capazes de, na presença de oxigênio, sofrer reações químicas, ocorrendo a liberação de energia sob a forma de luz e calor. Segundo Carvalho Júnior e Mcquay (2007), a combustão ideal, designada como combustão completa, ocorre quando todo carbono no combustível é oxidado para dióxido de carbono (CO₂), todo hidrogênio para água (H₂O) e todo enxofre para dióxido de enxofre (SO₂).

Nas Figuras 5 e 6 observam-se as concentrações dos gases, metano (CH₄) e monóxido de carbono (CO), emitidos durante o processo de carbonização com e sem o funcionamento da fornalha.

As concentrações de metano foram reduzidas a valores próximos de zero com a queima dos gases pela fornalha. Esse fato demonstra a eficiência de poder oxidativo do sistema, reduzindo quase a totalidade da emissão de um dos gases mais nocivos ao meio ambiente.

Esse fato é de extrema importância para adicionalidade em projetos de crédito de carbono, pois, apesar de a madeira utilizada no processo ser de reflorestamento, o que não contabiliza o CO₂ liberado, a redução da emissão de metano no processo permite a criação de projetos visando créditos de carbono.

Pelo que se observa no gráfico da Figura 6, houve redução significativa nas concentrações de monóxido de carbono quando se procedeu a queima dos gases, evidenciando, com isso, que a maior parte desse gás foi oxidada e liberada na forma de CO₂.

Na Figura 7 são apresentadas as concentrações de dióxido de carbono nas carbonizações.

Os valores médios da concentração de dióxido de carbono sem queima de gases foram de 4,11% e

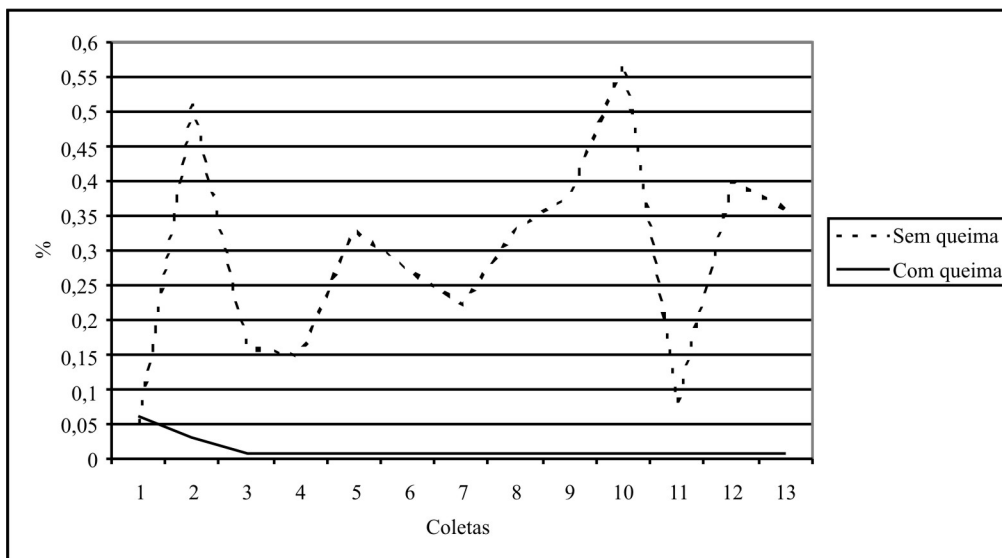


Figura 5 – Concentração de metano (CH_4) (%v/v) por amostra coletada durante o período de carbonização, com e sem a fornalha em funcionamento.

Figure 5 – Methane Concentration (CH_4) (%v/v) for samples collected during the carbonization with and without the furnace in operation.

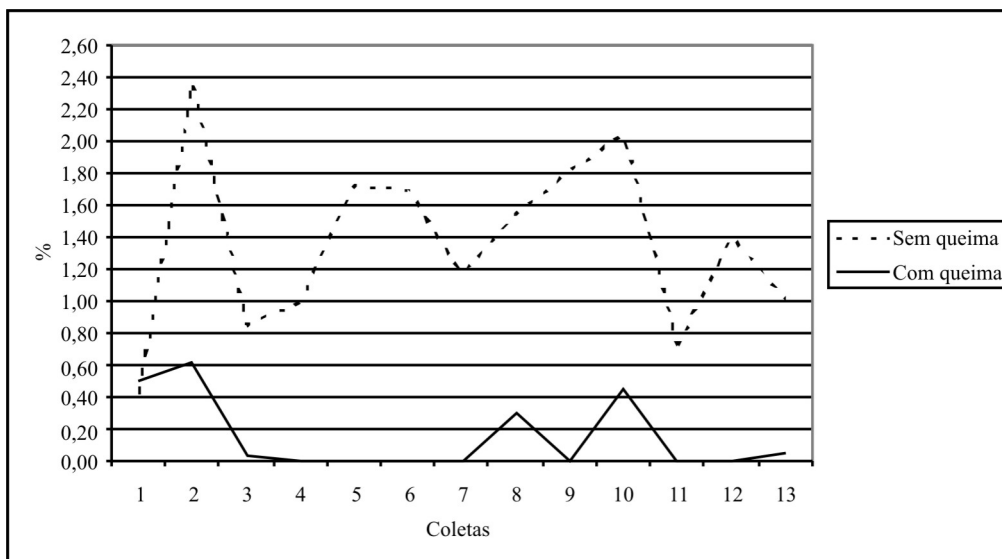


Figura 6 – Concentração de monóxido de carbono (CO) (%v/v) por amostra coletada durante o período de carbonização, com e sem a fornalha em funcionamento.

Figure 6 – Carbon Monoxide Concentration (CO) (% v / v) for samples collected during the carbonization with and without the furnace in operation.

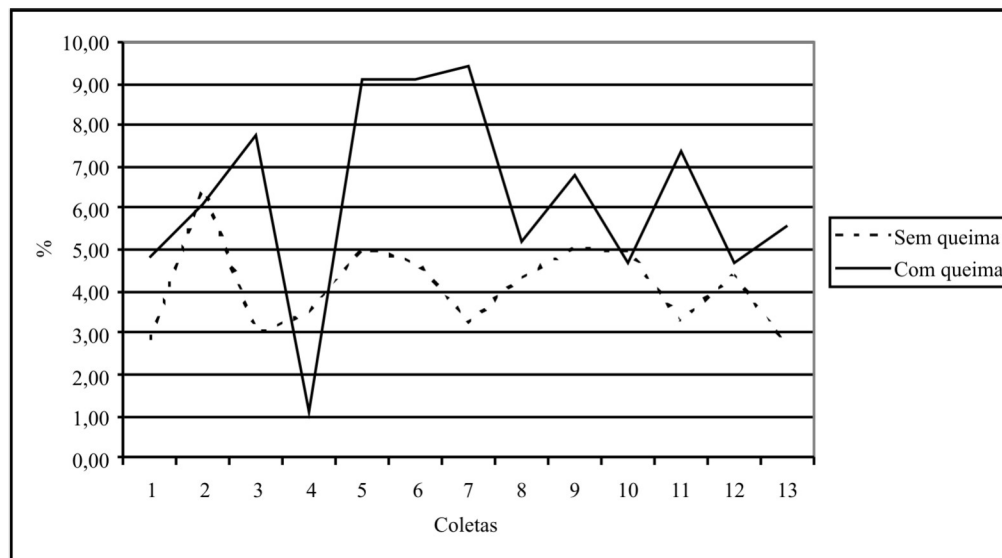


Figura 7 – Concentração de dióxido de carbono (CO) (%v/v) por amostra coletada durante o período de carbonização com e sem a fornalha em funcionamento.

Figure 7 – Carbon Dioxide Concentration (CO) (% v / v) for samples collected during the carbonization with and without the furnace in operation.

6,29% com queima. Esse aumento expressa as reações de oxidação ocorridas durante a combustão dos gases na fornalha, ou seja, gases como CO, CH₄ e outros foram oxidados a CO₂, H₂O e energia.

4 CONCLUSÕES

A estrutura do forno é adequada, uma vez que suportou as carbonizações. Porém, é necessário um estudo de materiais, com objetivo de reduzir o custo de construção.

A fornalha funcionou adequadamente como queimador de gases da carbonização, tendo 33% do tempo total de carbonização com chama constante na câmara de combustão, reduzindo em quase totalidade os gases de efeito estufa.

O gasto de combustível para manter a fornalha funcionando é desprezado a partir do momento em que se utiliza uma fornalha central para quatro fornos, carbonizando de modo sincronizado, com o objetivo de manter a fornalha constantemente acesa, apenas queimando os gases combustos da carbonização.

Os gases de efeito estufa, principalmente metano e monóxido de carbono, foram reduzidos eficientemente

pela utilização da fornalha, tendo a quantidade liberada diminuído em 96% e 93%, respectivamente.

Recomendam-se outros estudos para redimensionar, principalmente, a chaminé e a câmara de combustão da fornalha para se ter um melhor controle da carbonização e aproveitamento da energia do forno para sua posterior utilização com fonte de calor, para secagem da madeira, por exemplo.

5 AGRADECIMENTOS

À Fapemig, pelo financiamento do projeto; à Plantar, pela doação da madeira; à Universidade Federal de Viçosa e aos funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM/UFV).

6 REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1945**: standard test method for analysis of natural gas by gas chromatography. Philadelphia, 1996
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

ASTM E 260-96(2006): standard practice for packed column gas chromatography. Philadelphia, 2006.

ASSIS, J. B. Base florestal de Minas Gerais. In: SEMINÁRIO DE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE EUCALIPTO, 2.; II MADETEC, 2., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Viçosa, MG: SIF, 2003. p. 32-42.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Números do setor.** Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <<http://www.silviminas.com.br>>. Acesso em: 15 ago.2009.

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

ELK, A. G. P. Van. **Mudanças climáticas, lixo, energia.** São Paulo, 2010. Disponível em: <http://www.ecosdasardenha.com.br/palestras/palestrantes/05_Ana_Ghislane_Van_Elk.pdf>. Acesso em: 31 jun. 2010.

NUTEC IBAR FIBRAS CERÂMICAS. **Folha de dados técnicos - produto:** manta de fibra cerâmica HT. São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.nutecibar.com.br/pdf/6003.PDF>>. Acesso em: 8 fev. 2010.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Measurement of gaseous organic compound emission by Gas Chromatography- Method 18; Code of Federal Regulations, Part 60, Subpart TTT.** Washington, 1997.