

MARCELO PEREIRA COELHO

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA O
DIMENSIONAMENTO DE CÂMARAS DE COMBUSTÃO
PARA GASES ORIUNDOS DO PROCESSO DE
CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFRV

T

C672d
2013

Coelho, Marcelo Pereira, 1985-

Desenvolvimento de metodologia para o dimensionamento de câmaras de combustão para gases oriundos do processo de carbonização de madeira / Marcelo Pereira Coelho. – Viçosa, MG, 2013.

xi, 78f. : il. (algumas color.) ; 29cm.

Orientador: Martins Marcio Arêndes

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Simulação (Computadores). 2. Otimização. 3. Combustão.
4. Chama (Combustão). 5. Calor. 6. Fogo. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.
II. Título.

CDD 22. ed. 003.3

MARCELO PEREIRA COELHO

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA O
DIMENSIONAMENTO DE CÂMARAS DE COMBUSTÃO
PARA GASES ORIUNDOS DO PROCESSO DE
CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA**

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

APROVADA: 19 de março de 2013

Angélica Cássia de O. Carneiro
(Coorientadora)

Rudolf Huebner

Jadir Nogueira da Silva

José Elias Claudio Arroyo

Marcio Arêdes Martins
(Orientador)

“A gente só sabe bem aquilo que não entende”.
(Gimaraes Rosa - Grande Sertão Veredas. p 286)

Dedico,

*Aos meus amados pais, Célio e Ondina,
aos irmãos, Guilherme e Rogério
aos meus tios Hélio (presente eternamente em meu coração) e Angélica,
aos meus primos, Renata e Gustavo.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser sempre meu guia e minha fonte de forças e esperanças.

Aos meus pais, pelo exemplo de força e perseverança, pela educação, apoio, amor e presença constante na minha vida. Aos meus irmãos, pela amizade, apoio, incentivo e carinho em todos os momentos.

Aos meus colegas da UFES, especialmente à Cássia e Evelin por me tolerarem todos os dias.

Em especial ao professor e amigo Márcio Arêdes Martins, pela orientação e pelos muitos ensinamentos.

À professora Cassinha pela coorientação. À professora Leda Rita D'Antonino Faroni pelo apoio desde o início desta jornada.

Ao professor Adílio pela orientação no mestrado e pelos muitos ensinamentos.

Aos meus queridos colegas de Laboratório, sempre dispostos a ajudar na realização dos experimentos, Lucas Corrêdo, Ana Cláudia, Rosana Mendonsa, Michel Santos, Diego Fagundes, Emanuele Graciosa, Thaís e Nildão Veado. Ao pessoal do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), Bráulio, Moiado, Marco Túlio, Tito, Júlia, Arthur, Thiago, Carlos Miguel e Wagner.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos o que tornou possível a realização de mais estesonho.

Aos funcionários da UFV: Catitu, Edson, Délio, Sr. Galinári e a todos que direta ou indiretamente contribuíram na realização destetrabalho, os meus sinceros agradecimentos.

Aos Professores Rudolf Huebner, José Elias Claudio Arroyo, Jadir Nogueira da Silva, e Angélica Cássia de Oliveira Carneiro pela participação na banca examinadora.

À FAPEMIG/SECTES e às empresas: Arcelor Mittal-Bioflorestas, Aperam, Vallourec & Mannesmann, Votorantin, Plantar e Gerdau pelo financiamento do projeto e apoio.

BIOGRAFIA

MARCELO PEREIRA COELHO, filho de Célio de Oliveira Coelho e Ondina Martins Pereira, nasceu em Piranga, Estado de Minas Gerais, em 18 de junho de 1985.

Em março de 2003, iniciou o Curso de Engenharia de Produção na Universidade Federal de Viçosa (UFV), graduando-se em agosto de 2007.

Em agosto de 2007, iniciou no Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, concentrando seus estudos na área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, concluindo-o em junho de 2009.

Em julho de 2009, ingressou no Programa de Pós-Graduação (Doutorado) em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, concentrando seus estudos na área de Energia.

Em junho de 2012 tornou-se professor assistente do Curso de Engenharia de Produção na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) no Centro Universitário do Norte do Espírito Santo (CEUNES).

Em março de 2013 submeteu-se à defesa de tese.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 LITERATURA CITADA	3
2. ARTIGO I: DESEMPENHO DE UMA CÂMARA DE COMBUSTÃO PARA A COMBUSTÃO DE GASES PROVENIENTES DO PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA	4
2.1 INTRODUÇÃO	6
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	7
2.2.1 Carbonização da madeira.....	9
2.2.2 Coleta e análise dos gases.....	10
2.2.3 Rendimento gravimétrico e Propriedades do carvão vegetal.....	11
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
2.3.1 Carbonização da madeira.....	13
2.3.2 Análise dos gases.....	16
2.3.3 Propriedades do carvão vegetal.....	21
2.4 CONCLUSÕES.....	22
2.5 LITERATURA CITADA	23
3. ARTIGO III: SIMULAÇÃO DE UMA CÂMARA DE COMBUSTÃO DE GASES PROVENIENTES DO PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO.....	24
3.1 INTRODUÇÃO	26
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	27
3.2.1 Descrição do sistema	27
3.2.2 Carbonizações	28
3.2.3 Modelo Matemático.....	29
3.2.4 Medidas experimentais	35
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
3.3.1 Resultados experimentais	37
3.3.2 Simulação da queima dos gases de carboniço.....	41
3.3.3 Comparações entre os resultados simulados e experimentais.....	44
3.4 CONCLUSÕES	48
3.5 LITERATURA CITADA.....	49
4. ARTIGO IV: UTILIZAÇÃO DE METAMODELO PARA OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO DE UMA CÂMARA DE COMBUSTÃO DE GASAS PROVENIENTES DO PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA.....	51
4.1 INTRODUÇÃO	53
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	54
4.2.1 Modelo Matemático	54
4.2.3 Formulação para a otimização	60
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.3.1 Resultados das simulações.....	63
4.3.2 Otimização	66
4.3.3 Metodologia para o dimensionamento da câmara de incineração	68
4.4 CONCLUSÕES	72
5. CONCLUSÕES GERAIS.....	77

LISTA DE SÍMBOLOS

Nomenclatura

Energia cinética de turbulenta	K
Energia total	E
Entalpia	H
entalpias específicas	h_i
Fração de mistura	Z
Fração mássica de N espécies	Y_i
Número de Prandtl	Pr
Número de Schmidt	Sc
Peso molecular da espécie i	W_i
Probabilidade	P
Temperatura	T
Tempo	t
Tensor de tensão	P
Tensor identidade	I
Termo Fonte	S
Vetor de velocidade	V
Letras gregas	
Constante da mistura gasosa	ϑ
Entalpia de formação	Ψ
Esticamento do vórtice	χ_v
Função gama	$\Gamma(x)$
Massa específica	ρ
Taxa de dissipação escalar	χ
Taxa de dissipação pela turbulência por unidade de massa	ε
Viscosidade	μ
Sobrescritos	
Adimensional	*
Transposição	T
Quantidade Flutuante de Favre	''
Média	-
Média de Favre	~
Subescritos	
Momentum	M
Energia	E

RESUMO

COELHO, Marcelo Pereira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2013. **Desenvolvimento de metodologia para o dimensionamento de câmaras de combustão para gases oriundos do processo de carbonização de madeira.** Orientador: Marcio Arêdes Martins. Coorientadores: Angélica Cássia de Oliveira Carneiro e José Helvécio Martins.

O carvão vegetal é um importante insumo na cadeia produtiva do ferro gusa no estado de minas gerais. Entretanto, sua produção recebe muitas críticas devido às elevadas emissões de poluentes e gases causadores de efeito estufa. Essas críticas podem, por outro lado, serem mitigadas com a incineração dos gases gerados, reduzindo as emissões a dióxido de carbono e água. A incineração dos gases abre novas oportunidades de negócios, pois a energia gerada durante o processo de incineração tem potencial para ser transformada em energia elétrica, gerando mais receita aos produtores, e ainda usada na secagem da madeira a ser carbonizada, diminuindo o tempo de ciclo de produção, aumentando a capacidade produtiva e, conseqüentemente, a renda dos produtores. O aproveitamento dos subprodutos da carbonização da madeira para a produção de carvão vegetal não é muito explorado na literatura. Alguns trabalhos experimentais objetivando incinerar os gases gerados foram conduzidos em empresas e na academia, porém não existe um método formal para dimensionamento desses sistemas. Desse modo, esse trabalho foi desenvolvido para criar uma metodologia coerente para dimensionamento de câmaras de combustão cilíndricas, sem uso de energia elétrica em sopradores ou geradores de centelha, obtendo-se equações para o projeto de câmaras de queima cilíndricas para gases de combustão provenientes do processo de carbonização. A produção rudimentar em fornos de alvenaria gera passivos sociais econômicos e ambientais devido à emissão de gases poluentes e de efeito estufa. Uma solução para esse problema é a incineração dos gases gerados durante o processo de carbonização. Entretanto, é importante que o processo de incineração de gases não influencie negativamente os padrões de qualidade do carvão produzido. Por esse motivo este trabalho foi feito, objetivando a construção e avaliação de um protótipo de um incinerador de gases provenientes da carbonização de baixo custo e fácil construção, além de avaliar se a incineração dos gases gera impactos negativos na qualidade do carvão. Os resultados indicam que o protótipo funcionou satisfatoriamente, reduzindo a emissão de metano em 99,8 % e 74,14 % da emissão de monóxido de carbono e não houve indícios de que a incineração dos gases piorou a qualidade do carvão produzido. Entretanto, modificações para a melhoria do incinerador devem ser feitas para, reduzir as

emissões de monóxido de carbono ao máximo. Um modelo em CFD foi testado, usando os dados do protótipo construído. Considerando a alta variabilidade do processo de carbonização, bem como variáveis difíceis de prever, como intempéries, pode-se afirmar que os resultados mostram boa concordância entre as simulações e os resultados experimentais. Após a validação do modelo, foi possível propor um metamodelo, baseado em CFD, que foi utilizado para propor melhorias no projeto da câmara de combustão, visto que não é reportado na literatura uma metodologia adequada para projetos dessa natureza. Foi utilizado um metamodelo, construindo uma superfície de resposta usando o método de Kriging. O bom ajustamento do metamodelo tornou possível a aplicação da otimização multi-objetivo, por meio do uso de um algoritmo genético. A solução ótima escolhida deu subsídios para o levantamento de parâmetros de projeto e uma metodologia para o dimensionamento de câmaras de combustão cilíndricas para gases advindos do processo de carbonização foi desenvolvida.

ABSTRACT

COELHO, Marcelo Pereira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2013. **Methodology development to design combustion chambers for gases from wood carbonization process.** Adviser: Marcio Arêdes Martins. Co-Advisers: Angélica Cássia de Oliveira Carneiro and José Helvécio Martins.

Charcoal is an important input in the pig iron productive chain in Minas Gerais State, Brazil. However, its production is highly criticized because of the elevated emissions of pollutants and gases that cause the greenhouse effect. This criticism can, however, be mitigated through incineration of the gases generated, thereby reducing emissions of carbon dioxide and water. Incineration of gases opens up new business opportunities, since the energy generated during the incineration process can be transformed into electric energy, generating more income to the producers, and it can also be used in the drying of the wood to be burnt, reducing the production time cycle and increasing productive capacity and consequently the income of producers. The use of by-products of wood carbonization to produce charcoal is not very exploited in literature. Some experimental research aimed at incinerating the generated gases has been conducted by companies and in the academic circle; however, there is no formal method to design these systems. Thus, this study was carried out to create a coherent methodology to design cylindrical combustion chambers without the use of electric energy in blowers or sparkers, developing equations to project cylindrical combustion chambers for gases originated from the carbonization process. The rough production in masonry ovens generates social, economic and environmental liabilities due to the emission of pollutant and greenhouse gases. A solution to this problem is the incineration of the gases generated during the carbonization process. However, it is important that the gas incineration process not influence the quality standards of the charcoal produced negatively. For this reason, we conducted this study in order to build and evaluate a low cost and easily constructible prototype of an incinerator of gases originated from carbonization, in addition to verifying if gas incineration has negative impacts on charcoal quality. Results indicated that the prototype worked satisfactorily, reducing emission of methane by 99.8, and carbon monoxide by 74.14%, and there were no signs that incineration of gases worsened the quality of charcoal produced. However, modifications for the improvement of the incinerator should be done so as to reduce carbon emissions as much as possible. A CFD model was tested using the data from the prototype built. Given the high variability of the carbonization process, as well as the variables difficult to predict such as bad weather, we can affirm that the results show a

good agreement between simulations and experimental results. After validating the model, it was possible to propose a CFD-based meta-model, which was utilized to propose improvements in the combustion chamber project, given that the literature does not report any appropriate methodology for projects of this nature. We used a meta-model, creating a response surface using the Kriging method. The good fit of the meta-model made it possible to apply the multi-objective optimization through a genetic algorithm. The optimal solution chosen allowed for the creation of project parameters, and a methodology to design cylindrical combustion chambers for gases generated by the carbonization process was developed.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O cenário global de incertezas econômicas, geopolíticas e socioambientais tem levado pesquisadores de todo o mundo a buscar fontes alternativas de energia. Além disso, pesquisadores, de vários setores, têm buscado minimizar os gastos energéticos, aumentando a eficiência de seus processos ou aproveitando subprodutos, outrora descartados.

Diversas fontes de energia podem ser destacadas, tais como a energia nuclear, a geotérmica, a eólica, a hidroelétrica, a solar e a de biomassa. Sob essas fontes energéticas vale ressaltar que são limpas, ou seja, apresentam baixos impactos ambientais, entretanto, acidentes como os de Chernobyl e, mais recentemente, Fukushima, colocam a energia nuclear em uma posição socialmente indesejável. As fontes de energias hidrelétrica e geotérmicas são limpas, porém muitos países já exploraram quase totalmente suas capacidades [1]. A energia eólica não é capaz de fornecer, sozinha, a energia que será demandada futuramente. A energia solar ainda apresenta alto custo de instalação [2, 3]. Com o exposto, conclui-se que a matriz energética precisa ser diversificada, para evitar problemas econômicos e políticos como as crises de 70 e 80 [4].

A energia da biomassa é uma fonte limpa, ambiental e socialmente aceita, sendo ainda, uma maneira de aproveitamento da energia solar. Apresenta benefícios ambientais, devido seu potencial de fixação de carbono, principal elemento componente dos gases de efeito estufa, e pode ser obtida de diferentes fontes agroflorestais, gerando renda para os produtores de pequenas propriedades.

A biomassa e pode ser usada como substituta para combustíveis fósseis para a geração de calor, obtenção de produtos químicos e geração de energia elétrica. Para tanto, diversos tratamentos, como a queima direta, fermentação alcoólica e gaseificação [5]. Podem ser aplicados.

O Brasil produz carvão vegetal em larga escala para ser utilizado na indústria, destacando-se, como maior produtor e consumidor deste produto [6]. Ressalta-se que o consumo do carvão vegetal está basicamente concentrado no mercado interno. Os principais destinos são os setores de ferro-gusa e aço, que consomem 72 % do carvão vegetal produzido, e de ferro-liga, que utiliza 12 %, seguido do residencial (cocção e aquecimento residencial), do industrial (excluindo-se a siderurgia), com destaque para a produção de cimentos, indústria química, de alimentos e de cerâmicas [7].

A produção de carvão vegetal gera subprodutos capazes de serem aproveitados para a geração de energia. Diversos gases voláteis, condensáveis e não condensáveis, são gerados durante o processo de carbonização da madeira. Esses gases podem ser queimados e a energia gerada aproveitada. Além disso, os gases de efeito gerados no processo de queima desses gases são quase totalmente sequestrados pelo plantio de novas florestas [8]. Por outro lado, não existe uma metodologia clara para dimensionamento de câmaras de incineração para gases provenientes do processo de carbonização de madeira.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo geral, desenvolver uma metodologia para o dimensionamento de uma câmara de incineração para gases provenientes da carbonização da madeira. Para tanto, este trabalho foi dividido em três artigos.

Naprimeira parte do trabalho foi o desenvolvimento de um protótipo de uma câmara de carbonização cilíndrica, vertical para a queima de gases de carbonização de madeira. Como não havia uma metodologia clara para o dimensionamento, alguns parâmetros foram estimados e, de acordo com o tempo de residência estipulado em 2 s [9], o protótipo foi construído. O protótipo funcionou bem por boa parte do tempo, porém a maior vantagem de sua construção foi o levantamento de dados para a validação de um modelo computacional baseado na técnica CFD (Dinâmica dos fluidos computacional) (terceira parte do trabalho). Com a validação dos dados, foi possível utilizar um metamodelo (quarta parte do trabalho), construindo uma superfície de resposta usando o método de Kriging [10]. O bom ajustamento do metamodelo tornou possível a aplicação da otimização multi-objetivo, por meio do uso de um algoritmo genético [11]. A solução ótima escolhida deu subsídios para o levantamento de parâmetros de projeto e uma metodologia para o dimensionamento de torres de incineração cilíndricas foi desenvolvido.

1.1 LITERATURA CITADA

- [1] BRASIL. Ministério de minas e energia, "Capacidade instalada de Geração Elétrica: Brasil e Mundo". 2012.
- [2] PEREIRA, M. G.; CAMACHO, C. F.; FREITAS, M. A. V.; SILVA, A. F. "The renewable energy market in Brazil: Current status and potential". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 3786-3802., 2012.
- [3] LAMPREIA, J.; ARAÚJO, M. S. M.; CAMPOS, C. P.; FREITAS, M. A. V; ROSA, L. P.; SOLARI, R.; GESTEIRA, C.; RIBAS, R.; SILVA, N. F. "Analyses and perspectives for Brazilian low carbon technological development in the energy sector". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 3432-3444, 2011.
- [4] ACKERMAN, F.; ALMEIDA, P. E. F. "Iron and charcoal- the industrial fuelwood crisis in Minas Gerais". *Energy Policy*, vol. 18, pp. 661-668, 1990.
- [5] PEREIRA, E.G.; DA SILVA, J.N.; OLIVEIRA, J.L.; MACHADO, C. S. "Sustainable energy: A review of gasification technologies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, p. 4753–4762, 2012.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS Plantadas - ABRAF, "Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2011". Brasília, 2012.
- [7] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE., "Balanço Energético Nacional 2011: Ano Base 2010". Rio de Janeiro, 2011.
- [8] MATOVIC, D. "Biochar as a viable carbon sequestration option: Global and Canadian perspective". *Energy*, vol. 36, pp. 2011-2016, 2011.
- [9] YANG, YONGXIANG, REUTER, MARKUS A.; HARTMAN, DERK T. M. CFD Modelling for control of hazardous waste incinerator. *Control Engineering Practice*. 2003, 11, pp. 93-101.
- [10] PARK, KYOUNGWOO, OH, PARK-KYOUNG,; LIM, HYO-JAK. The application of the CDF model and Kriging method to an optimization of a heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006, 49, pp. 3339-3447.
- [11] AUGUSTO, O. B.; RABEAU, S.; DÉPINCÉ, PH.; BENNIS, F. Multi-objective genetic Algorithms: A way to improve the convergence rate. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2006, 19, pp. 501-510.

2. ARTIGO I: DESEMPENHO DE UMA CÂMARA DE COMBUSTÃO PARA A COMBUSTÃO DE GASES PROVENIENTES DO PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA

Resumo: O carvão vegetal é um importante insumo para a indústria siderúrgica, principalmente para produtores independentes de ferro gusa. A produção rudimentar em fornos de alvenaria gera passivos sociais econômicos e ambientais devido a emissão de gases poluentes e de efeito estufa. Uma solução para esse problema é a combustão dos gases gerados durante o processo de carbonização. Entretanto, é importante que o processo de combustão de gases não influencie negativamente no rendimento e na qualidade do carvão produzido. Este trabalho foi feito objetivando construir e avaliar o desempenho de uma câmara de combustão para queima dos gases provenientes da carbonização da madeira. E como objetivos específicos avaliar o efeito da combustão dos gases no rendimento e nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do carvão vegetal, além de determinar a composição dos gases não condensáveis emitidos do processo de carbonização. Os resultados indicaram que a câmara de combustão mostrou-se eficiente, reduzindo em 99,8 % e 74,14 % a emissão de metano e monóxido

de carbono, respectivamente. De modo geral, a queima dos gases não afetou o rendimento e as propriedades do carvão vegetal que obtiveram valores 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, modificações para a melhoria da câmara de combustão devem ser realizadas para reduzir o consumo de resíduos que alimentam a câmara de combustão, principalmente, na fase inicial do processo de carbonização quando os gases emitidos apresentam baixo poder calorífico.

Palavras-chave: Carvão Vegetal, queima de gases, metano.

Abstract: Charcoal is an important input for the steel industry, especially for small producers of pig iron. The rough production in masonry ovens generates social, economic and environmental liabilities due to the emission of pollutant gases and greenhouse gases. A solution to this problem is the incineration of the gases generated during the carbonization process. However, it is important that the gas incineration process not influence the quality standards of the charcoal produced negatively. Therefore, this study was conducted in order to build and evaluate a low cost and easily constructible prototype of an incinerator of gases originated from carbonization, in addition to evaluating if the gas incineration has negative impacts on the charcoal quality. Results indicated that the prototype worked very well, reducing emission of methane by 99.8, and carbon monoxide by 74.14 %, and there were no signs that incineration of gases worsened the quality of the charcoal produced. However, modifications for the improvement of the incinerator should be done so as to reduce emissions of carbon monoxide.

Key words: Charcoal, Gases incineration, methane.

2.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o único país que produz carvão vegetal em larga escala para ser utilizado na indústria, destacando-se como o maior produtor e consumidor (ABRAF, 2012). Os principais destinos são os setores de ferro-gusa e aço, que consomem 72 % do carvão vegetal produzido; e de ferro-liga, que utiliza 12 %; seguido do residencial (cocção e aquecimento residencial) e do industrial (excluindo-se a siderurgia), com destaque para os setores de cimento, indústria química, de alimentos e de cerâmica (EPE, 2011).

A expressividade dos números envolvidos na produção e consumo de carvão refletem-se por sua vez seu problema. Os dois grandes problemas envolvidos com o carvão vegetal ligam-se à questão da tecnologia empregada na sua produção, 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.

Dentre as alternativas tecnológicas para redução de emissões destacam-se o uso de queimadores de gases acoplados aos fornos de produção de carvão.

Os produtos gerados na carbonização da madeira, além do carvão vegetal, são a água e os produtos orgânicos, incluindo o ácido acético, o metanol, os compostos aromáticos, os derivados fenólicos, os aldeídos e o breu ou piche, além dos gases não condensáveis, dentre os quais se destacam o metano (CH_4), o dióxido de carbono (CO_2), o monóxido de carbono (CO), o hidrogênio (H_2) e outros hidrocarbonetos leves (Brito, 1990). Logo, a produção de carvão vegetal gera gases passíveis de serem queimados, como o metano e o monóxido de carbono.

A queima dos gases reduz as emissões a CO_2 e H_2O , e o CO_2 gerado é quase totalmente sequestrados pelo plantio de novas florestas (MATOVIC, 2011).

No entanto, existem algumas dificuldades de se fazer um bom dimensionamento das câmaras de combustão para queima dos gases, visto que a composição e a vazão dos gases ao longo do tempo de carbonização é variável, ocasionando na maioria das vezes um dimensionamento incorreto, acarretando num consumo demasiado de combustível auxiliar para eliminação total das emissões.

Uns dos primeiros trabalhos com dimensionamento de fornalhas para queima dos gases da carbonização foi realizado por Cardoso et al. (2010) que avaliaram o desempenho de um sistema forna-fornalha, e obtiveram benefícios ambientais relativo

as reduções nas emissões de monóxido de carbono e metano, entretanto, o sistema de queima estudado apresentava um formato que dificultava o aproveitamento da energia, além de baixa eficiência térmica.

Deste modo, este trabalho foi realizado com o objetivo principal de projetar e avaliar o desempenho de uma câmara de combustão cilíndrica para gases oriundos da carbonização da madeira. E como objetivos específicos determinar as composições dos gases emitidos, bem como o efeito da queima dos gases no rendimento e qualidade do carvão vegetal.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (UFV), no município de Viçosa, MG.

O forno utilizado neste experimento consiste em uma unidade piloto com as mesmas proporções reportadas por Cardoso (2010). Foi construído com oito aberturas (quatro de cada lado), sendo que duas têm tamanho maior, para efetuar a ignição e as outras, para controle da carbonização (Figura 1). O sistema forno-câmara de combustão foi projetado para a carbonização de 10 m³ de madeira.

A câmara de combustão foi projetada e construída de modo a minimizar o consumo de materiais e a maximizar a eficiência de queima, levando-se em consideração o tempo de residência dos gases no interior da câmara.

A câmara de combustão e a chaminé formaram um único conjunto cilíndrico (Figura 1). A ligação entre o forno e a fornalha foi feita por um tubo cilíndrico com 0,3 m de diâmetro interno. Neste tubo foi adicionada uma válvula borboleta para o controle da vazão dos gases.

A base da chaminé foi construída de tijolos cerâmicos maciços convencionais.

O interior da câmara era cilíndrico e foi todo revestido com uma manta cerâmica Morganitekawool®, constituída de 35 % de Al₂O₃, 50 % SiO₂, 0,05 % Fe₂O₃, 0,05 % CaO, 0,05 MgO, 0,2 % de álcalis (Na₂O e K₂O) e Zircônia com 0,051m de espessura e massa específica de 96 kg m⁻³ e ponto de fusão de 2033 K.

O exterior da câmara de combustão era cúbico (1 m³) e apresentava uma entrada de ar de seção quadrada (0,12x0,12) m² na base da câmara.

A chaminé foi construída em módulos de aço (ANSI 1045 com 3 mm de

espessura) com 1,20 m de altura e 0,7 m de diâmetro interno com flanges para a conexão. O interior de cada módulo foi revestido com a mesma manta cerâmica usada na câmara de combustão. As paredes externas dos módulos foram pintadas com resina anticorrosiva branca para evitar a oxidação do metal. Ao término da montagem, a chaminé tinha 3,6 m de altura, além de 1 m da câmara de combustão e 0,6 m de diâmetro interno.

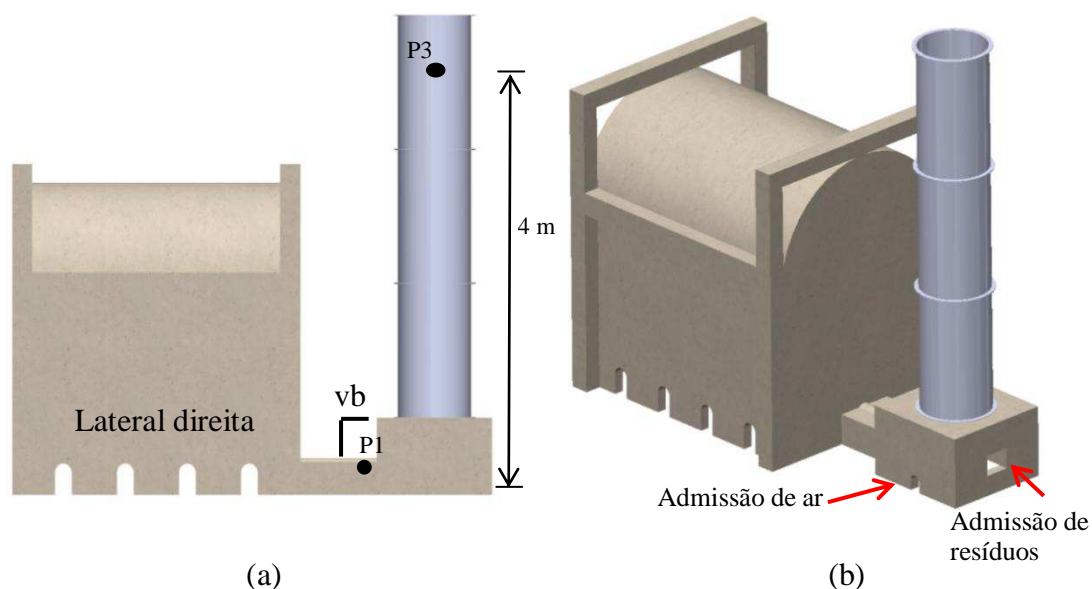


Figura 1 - Esquema forno e fornalha/chaminé: (a) vista lateral e (b) vista em perspectiva.

Para a admissão de ar para a câmara de combustão foi feito um duto de dimensões de 0,12m x 0,12 m, iniciando-se da parede lateral e prosseguindo até o centro da base da câmara.

Uma abertura de $(0,3 \times 0,3) \text{ m}^2$ na lateral da câmara foi utilizada para admissão de combustíveis auxiliares (resíduos lignocelulósicos) para pré-aquecer e dar início à combustão dos gases.

Na Tabela 1 são apresentados os materiais utilizados e os seus respectivos custos unitários.

Tabela 1- Materiais usados para a construção da câmara de combustão e da chaminé

Item	Quantidade	Unidade	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Chapa de aço ANSI 1045	3	unidade	142,00	426,00
Cantoneira de 1 polegada	4	unidade	20,00	80,00
Eletrodo revestido para solda	1	kg	8,00	8,00
Manta cerâmica Morganitekawool®	9	m ²	110,40	993,60
Parafusos de 3/16 polegadas	64	unidade	1,50	96,00
Tijolo prensado	400	unidade	1,40	560,00
Areia média lavada	¼	m ³	44,44	11,11
Brita média	¼	m ³	63,35	15,84
Cimento CII	4	saco	19,50	78,00
Total				2268,55

2.2.1 Carbonização da madeira

Realizaram-se duas carbonizações da madeira para avaliar o desempenho da câmara de combustão. A primeira foi realizada sem a queima dos gases e a segunda usando o sistema de queima.

Para cada carbonização, primeiramente o forno foi preenchido com madeira de *Eucalyptus* sp., comprimento médio de 2,10 m e diâmetro de 12 a 25 cm, colocando-as na posição vertical. O teor de umidade da madeira carbonizada variou de 27,06 a 37,52 % (b.s).

O controle da carbonização foi realizado seguindo as faixas estabelecidas por Oliveira (2012), conforme apresentado na Tabela 2. Salienta que o tempo de duração da primeira fase dependeu da umidade inicial da madeira.

Tabela 2 – Faixas teóricas de temperatura para controle da carbonização da madeira (OLIVEIRA, 2012)

Fase	Faixa de Temperatura	Tempo Manutenção	Fenômeno
I	100-150°C	15-16 horas	Liberação de vapor de água – secagem da madeira, fase endotérmica.
II	150-275°C	11-12 horas	Degradação das hemiceluloses, eliminação de gases, fase endotérmica.
III	275-400°C	23-24 horas	Degradação da celulose, grande produção de gases, fase exotérmica. Formação do carvão vegetal.
IV	400-470°C	17-18 horas	Redução da emissão de gases, fase exotérmica. Aumento da concentração de carbono no carvão vegetal.

O controle das temperaturas de carbonização foi realizado por meio das medições de temperatura, utilizando-se 10 termopares tipo K, devidamente calibrados e

testados, sendo dois localizados na parte superior do forno e os outros oito dispostos nas paredes laterais. Os termopares foram conectados a um sistema supervisório composto por um controlador lógico programável (PLC) e um computador. O software SCADABR® foi utilizado para armazenar e processar os dados adquiridos pelo PLC. Além disso, o sistema supervisório dispunha de recursos gráficos de temperatura em função do tempo, em tempo real, possibilitando manter as temperaturas da parte superior do forno próximas às estabelecidas.

2.2.2 Coleta e análise dos gases

A metodologia para a coleta e análise dos gases da carbonização é resumida na Figura 2.

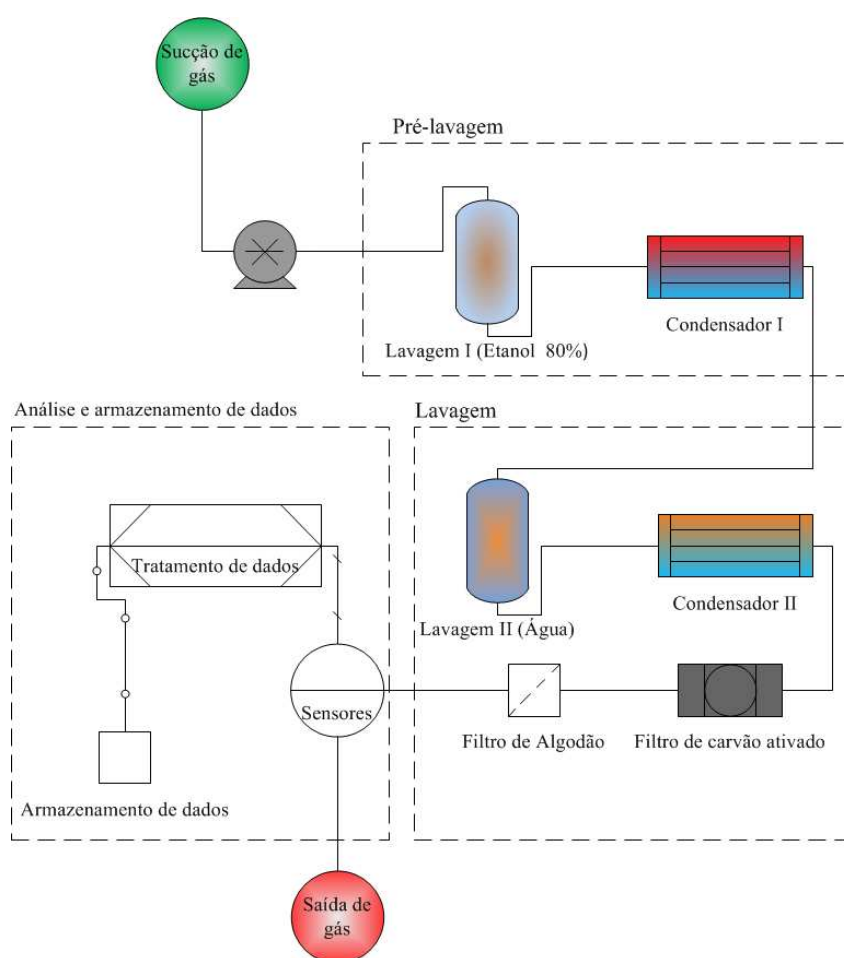


Figura 2 – Processo de tratamento e análise dos gases.

A coleta e análise dos gases foram realizadas de forma contínua durante toda a fase de carbonização.

Dois termopares tipo K, devidamente calibrados e testados, foram posicionados nas posições P1 e P3, duto de saída de gases do forno e chaminé, respectivamente, conforme mostrado na Figura 1.

Uma sonda com 0,01 m de diâmetro interno foi inserida na chaminé a 4 m do nível do solo, sendo os gases aspirados e conduzidos por um sistema de tratamento em série dividido em 6 etapas:

1. lavagem em etanol 80% v/v para a retenção do alcatrão;
2. resfriamento para condensar o etanol volatilizado;
3. lavagem em água deionizada;
4. resfriamento em baixa temperatura (4 °C) para condensar a água e outros voláteis ainda não capturados nas outras etapas do tratamento;
5. passagem por carvão ativado para retenção de voláteis residuais;
6. passagem pelo filtro de algodão para reter particulados.

Após essas etapas, os gases limpos e secos foram conduzidos para um analisador de gases (Gasboard 3100, Wuhan CUBIC Optoelectronics Co. LTDA, China), para determinar as concentrações de CO, CO₂, CH₄, H₂ e C_nH_m. Os dados transmitidos pelos sensores do analisador de gases foram tratados e armazenados em disco.

2.2.3 Rendimento gravimétrico e Propriedades do carvão vegetal

As massas de carvão vegetal, finos e áticos foram determinadas e o rendimento gravimétrico calculado pelas Equações 1, 2 e 3, respectivamente:

$$\text{RGC} = 100 \times \frac{M_c}{M_{ms}} \quad (1)$$

em que:

RGC = rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%);

M_c = massa de carvão vegetal (kg); e

M_{ms} = massa de madeira seca (kg).

$$\text{RGF} = 100 \times \frac{M_f}{M_{ms}} \quad (2)$$

em que:

RGF = rendimento gravimétrico em finos (%);

M_f = massa de finos (kg); e

Mms = massa de madeira seca (kg).

$$\text{RGT} = 100 \times \frac{\text{Mt}}{\text{Mms}} \quad (3)$$

em que:

RGT = rendimento gravimétrico em atíço (%);

Mt = massa de atíço (kg); e

Mms = massa de madeira seca (kg)

Para a análise química imediata do carvão vegetal, as amostras foram moídas e peneiradas a uma granulometria de aproximadamente 0,2mm de acordo com a norma ABNT NBR 8112, para a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, em base seca (ABNT, 1986).

O teor de materiais voláteis foi determinado pelo aquecimento do carvão a 950°C em mufla, sendo que as amostras foram acondicionadas em cadinhos com tampa e levadas à porta da mufla por dois minutos para aclimatação e, posteriormente, para o seu interior por mais nove minutos, totalizando onze minutos (ABNT, 1986).

O teor de cinzas foi determinado após a combustão completa do carvão, por meio do aquecido em mufla a 650°C durante 6 horas. A massa de cinzas em relação à massa de carvão seco é o teor de cinzas (ABNT, 1986).

O teor de carbono fixo foi calculado pela soma dos teores de materiais voláteis e cinzas, subtraído de 100 (ABNT, 1986). O rendimento gravimétrico em carbono fixo foi obtido multiplicando-se o rendimento gravimétrico em carvão vegetal pelo teor de carbono fixo.

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

Para determinar o teor de umidade, em base seca, amostras de várias dimensões de carvão foram pesadas e levadas à estufa com circulação forçada de ar, a 103±2°C, até atingirem massa constante.

A friabilidade é a capacidade de geração de finos sob a ação combinada de abrasão e queda e foi determinada por meio do teste de tamboramento, que consistiu em dispor uma amostra de 0,5 kg de carvão, classificado entre 60 e 20 mm, em um tambor rotativo de aço com 30 cm de diâmetro e aplicar 500 rotações a 30 rpm. A massa final da amostra, que se encontrava entre 60 e 20 mm foi medida. Após o teste, obteve-se a

porcentagem com granulometria inferior a 20 mm, que foi comparada à escala de classificação sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec), para carvão vegetal, citado por Oliveira et al. (1982).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Carbonização da madeira

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros da carbonização com e sem queima dos gases e na Figura 3 são mostradas as temperaturas médias na parte superior do forno, normalmente usadas como controle das carbonizações.

Tabela 3. Parâmetros da carbonização sem queima e com queima

Parâmetros	Carbonização sem queima dos gases	Carbonização com queima dos gases
Umidade da madeira (%)	37,52	27,5
Tempo de carbonização da madeira (h)	70	53
Tempo de resfriamento do forno (h)	72	72
Consumo de combustível auxiliar para pré-aquecimento (kg)	0	138
Consumo de combustível auxiliar para queima dos gases na etapa de secagem da madeira (kg)	0	276
Consumo de combustível auxiliar para reignição (kg)	0	46
Tempo total de queima dos gases sem adição de combustível auxiliar (h)	0	12

Avaliando o tempo total de carbonização da madeira, observa-se que o tempo de carbonização da madeira com queima de gases foi menor. Este fato ocorreu devido ao aumento da temperatura no forno, ocasionado pela elevada taxa de aquecimento provocado pela menor umidade da madeira, o que dificultou o seu controle, tendo com isso atingido as temperaturas já pré-estabelecidas num tempo menor que o determinado. O tempo médio de resfriamento independente da carbonização foi de 72 horas, momento esse considerado segura para abertura do forno, temperatura de 60 °C.

Na carbonização com queima dos gases, 30 % do combustível auxiliar foram utilizados no pré-aquecimento da câmara, 60 % utilizados durante a fase de secagem e 10 % utilizados para a reignição na câmara de combustão. É importante ressaltar que o combustível utilizado na fase de secagem foi era necessário, porém, foi bastante elevado para evitar que os vapores gerados se espalhassem pela circunvizinhança habitada e gerassem incômodos, como irritações nos olhos, vias respiratórias etc.

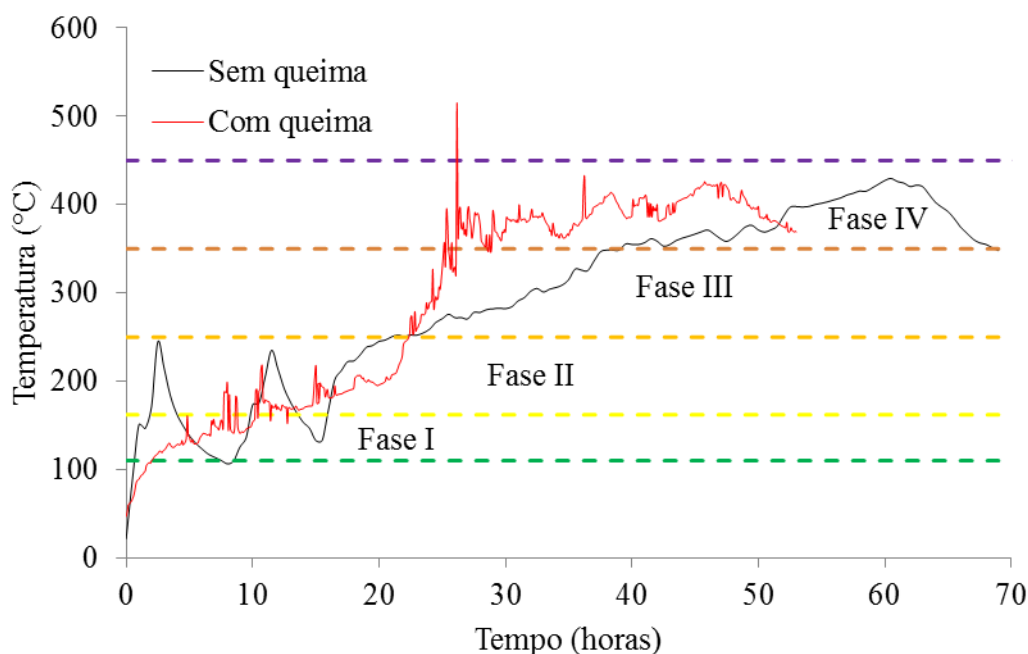


Figura 3 – Temperaturas médias na parte superior do forno sem queima e com queima de gases.

Na Figura 3, observam-se dois picos de temperatura nas primeiras 15 horas da carbonização sem a queima dos gases. O primeiro refere-se ao momento de ignição do forno e o segundo a re-ignição para elevação da temperatura do forno. A queda de temperatura na fase inicial provavelmente se deve a alta umidade da casca da madeira, pois dia antes do carregamento do forno teve-se ocorrência de chuva na região. Após o período de secagem da madeira observa-se que as faixas de temperaturas e tempo estabelecidas inicialmente foram cumpridas. A temperatura máxima registrada no forno para a carbonização sem queima foi de 428,65 °C, alcançada após 60 horas e trinta minutos da ignição.

Avaliando a carbonização com queima dos gases, observa-se que a fase de secagem foi menor em relação à carbonização sem queima, devido a menor umidade da madeira. Logo, o seu tempo médio de secagem inicialmente estabelecido foi reduzido para 10 horas. Ressalta-se que a manta cerâmica utilizada apresenta uma inércia térmica muito baixa, logo a base da câmara, principalmente, se resfriava muito rapidamente e, conseqüentemente, reduzia a capacidade de retirada dos gases gerados no forno. Por esse motivo o abastecimento foi constante e o consumo de resíduos foi elevado (460 kg/carbonização), sendo que deste total 90 % foi utilizado durante a fase de secagem.

A segunda fase da carbonização ocorreu dentro da faixa de tempo e temperatura previamente estabelecida. A terceira fase do processo começou após 22 horas de carbonização e terminou na trigésima sexta hora, portanto, a terceira fase durou apenas 14 horas, 10 horas a menos que o recomendado. Este fato ocorreu devido a um erro

sistemático na condução do processo que resultou em uma taxa elevada de aumento da temperatura no forno. A quarta fase teve a duração de 17 horas, iniciando-se na 36^a hora mantendo-se até o fechamento do forno que ocorreu na quinquagésima terceira hora. A temperatura máxima na parte superior do forno durante a carbonização com queima dos gases foi de 515 °C, após aproximadamente 26 horas.

Após a fase de secagem da madeira, a câmara de combustão funcionou praticamente durante todo o restante do processo (22 horas), conforme pode ser observado na Figura 4. Porém, em alguns períodos houve a necessidade de adicionar resíduos (combustível auxiliar) para manter a chama acesa, ou seja, queimando os gases da carbonização. Provavelmente, essa interrupção da chama ocorreu devido a redução da vazão dos gases combustíveis ou empobrecimento da mistura de gases combustíveis, por exemplo, elevação da concentração de CO₂.



Figura 4 – Câmara em funcionamento

É importante salientar que o gás combustível responsável pela manutenção da chama é o monóxido de carbono. Segundo Gerber et al. (2010), nos processos de pirólise de madeira, o CO é um dos constituintes principais do gás gerado, com concentrações acima de 27 % em condições altamente controladas. Já o CH₄ apresenta concentrações de no máximo 5 %, também em condições altamente controladas. Segundo Law (2006) os limites de inflamabilidade do CO a 1atm e 25 °C variam entre 12,5 e 74 %, enquanto os limites do CH₄ variam entre 5 e 15 %. Esses limites, no entanto, se alargam com o aumento da temperatura. Isso reforça a necessidade do pré-

aquecimento da câmara de combustão para possibilitar a ignição, queima e manutenção de chama com tais gases.

2.3.2 Análise dos gases

2.3.2.1. Análise dos gases: Carbonização sem queima dos gases

Na Figura 5 é apresentada a concentração de monóxido de carbono na carbonização sem queima dos gases.

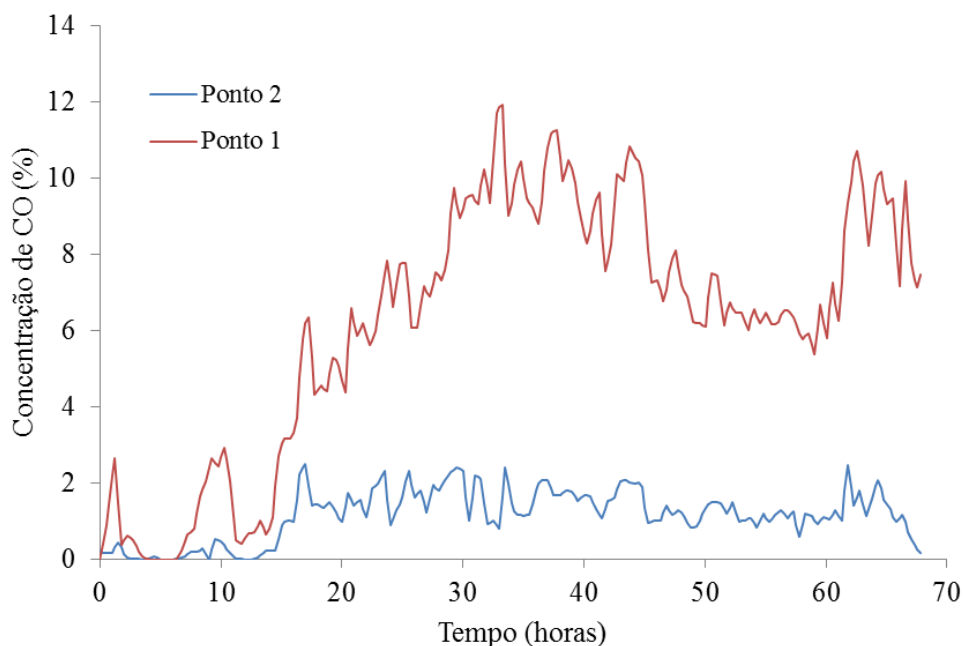


Figura 5 – Concentrações de monóxido de carbono nos pontos 1 e 3

Observa-se na Figura 5 que os níveis de monóxido de carbono no ponto P3 foi bastante reduzidos em relação ao ponto P1, evidenciando o efeito da diluição, que pode ser observado, também, na Figura 5, em que a fica evidente a alta concentração de oxigênio no ponto P3. No momento de máxima diluição, a concentração de monóxido de carbono foi reduzida em doze vezes. Essa diluição indica que a admissão de ar foi muito elevada (considerando que para a queima estequiométrica de um gás composto por metano, monóxido de carbono e hidrogênio a relação O_2 :Gás é de 4:1), ou seja, havia muito excesso de ar. Portanto, na segunda carbonização (sem queima de gases), a admissão de ar foi alterada pela redução da área de entrada do duto de ar em 50 %.

A concentração de dióxido de carbono e oxigênio no gás de exaustão sem queima de gases pode ser observada na Figura 6.

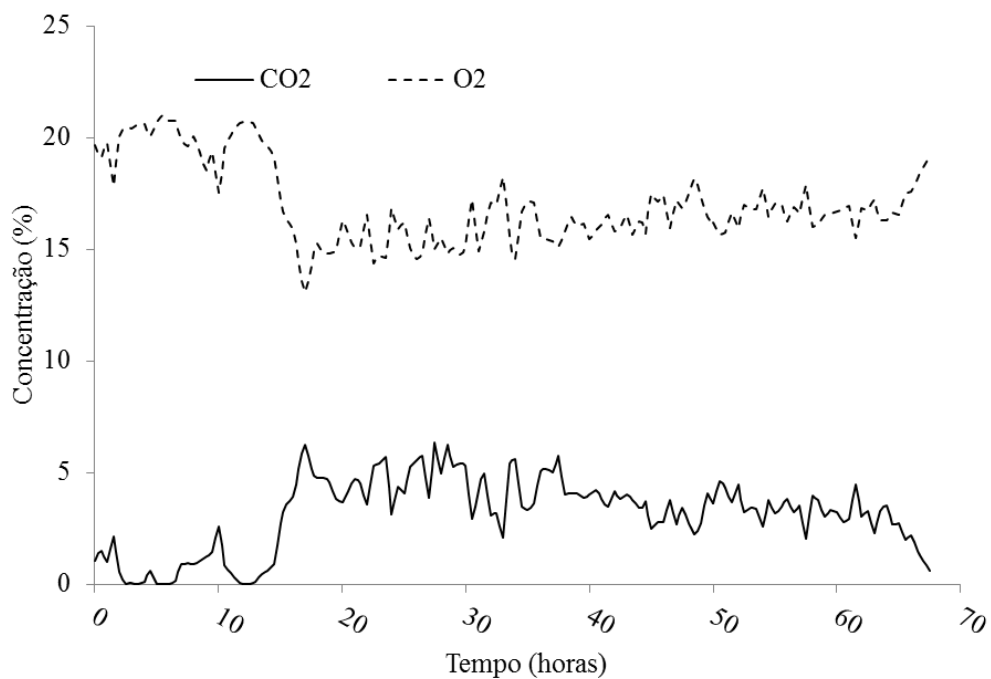


Figura 6 – Concentração de dióxido de carbono e oxigênio no gás de exaustão sem queima de gases.

O perfil de temperaturas dos gases de exaustão no ponto P3, bem como as concentrações de metano e monóxido de carbono são mostrados na Figura 7.

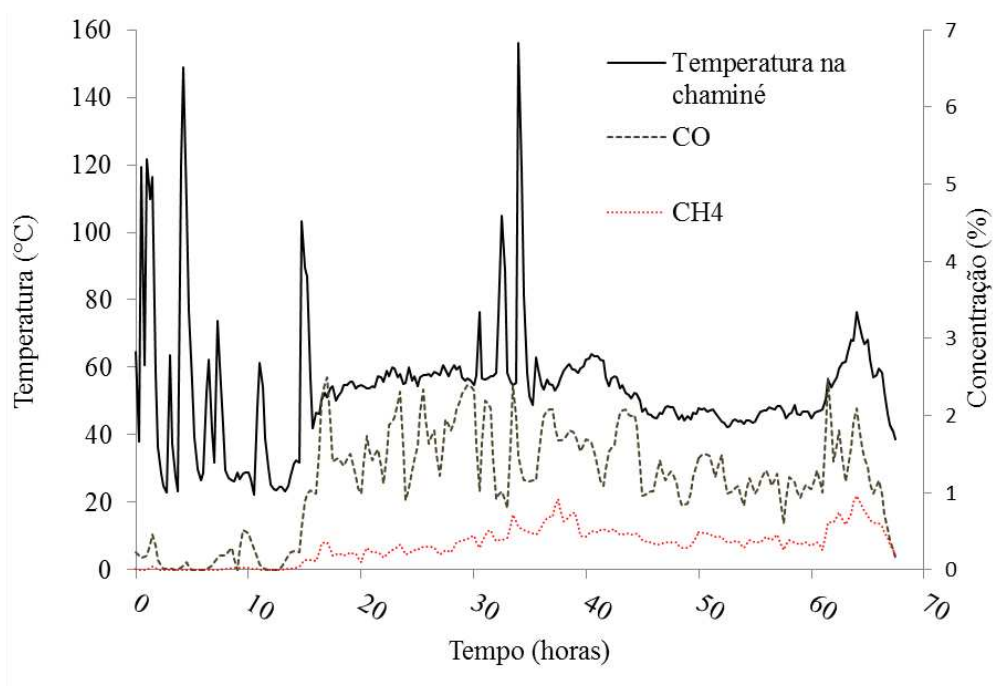


Figura 7 – Temperaturas do gás de exaustão da chaminé (Ponto P3) durante a carbonização sem queima

As primeiras 15 horas foram dedicadas à secagem da madeira, durante este período, resíduos foram queimados na câmara de combustão para aquecê-la. O aquecimento da câmara de combustão é importante, pois favorece a retirada dos gases do interior do forno. Entre a trigésima e trigésima quinta hora a houveram picos de temperatura. Para evitar a autoignição dos gases, a entrada de admissão de resíduos foi aberta para permitir a entrada de ar mais frio. Por fim, a temperatura média no ponto P3 foi de 53,55 °C.

2.3.2.2. Análise dos gases: Carbonização com queima dos gases

Nas Figuras 8, 9 e 10 são mostrados o perfil de temperaturas, as concentrações de metano e monóxido de carbono, e as concentrações de dióxido de carbono e oxigênio no ponto P3, respectivamente.

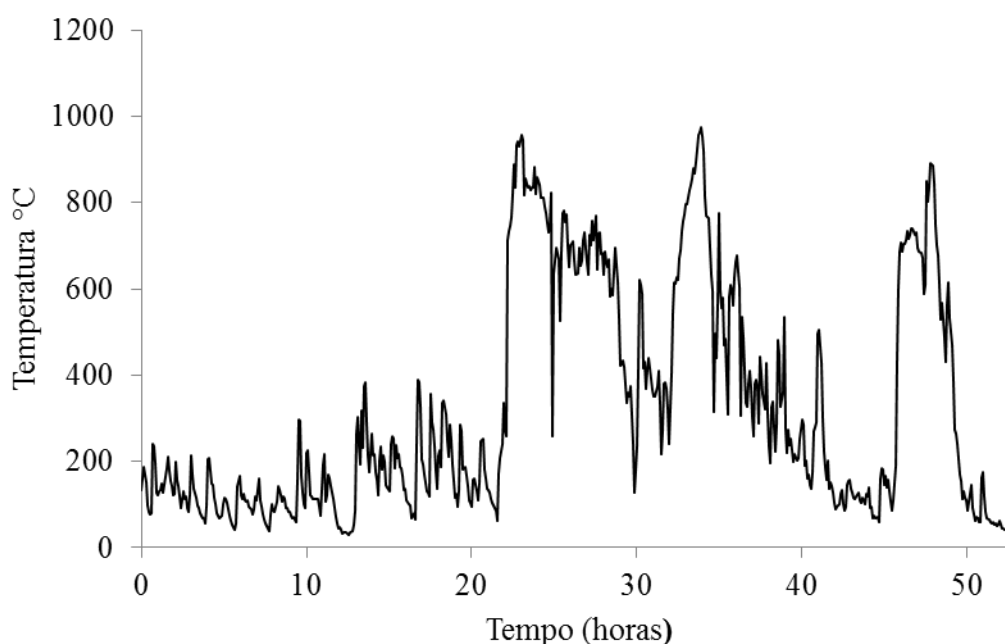


Figura 8 – Perfil de temperaturas no ponto P3 durante a carbonização com queima de gases

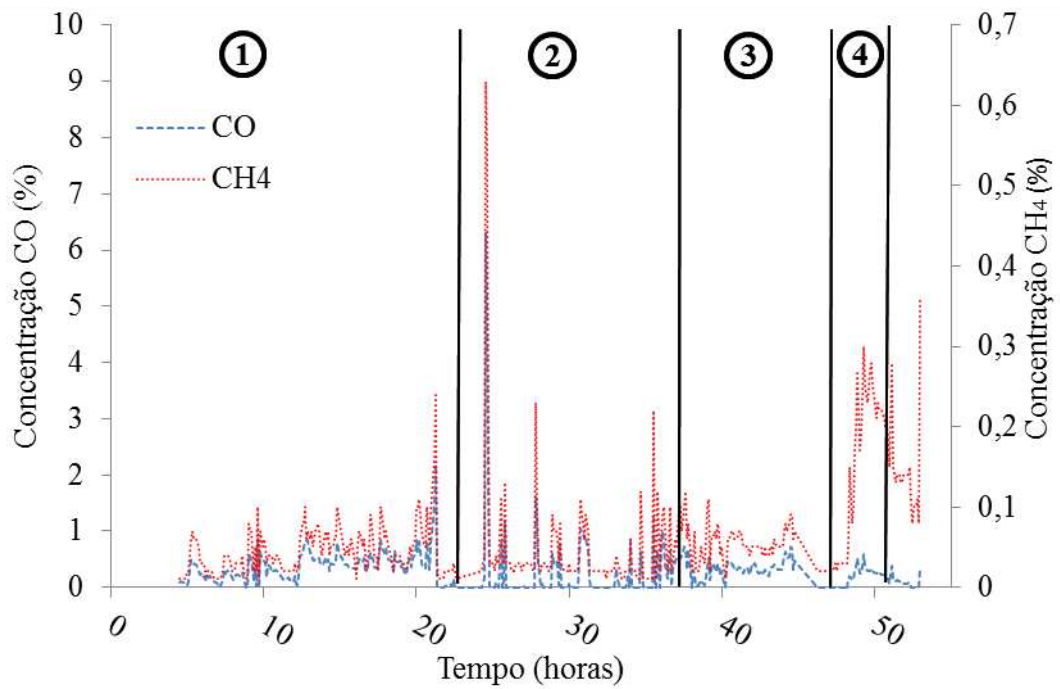


Figura 9 – Concentrações de CO e CH₄ no ponto P3 durante a carbonização com queima de gases

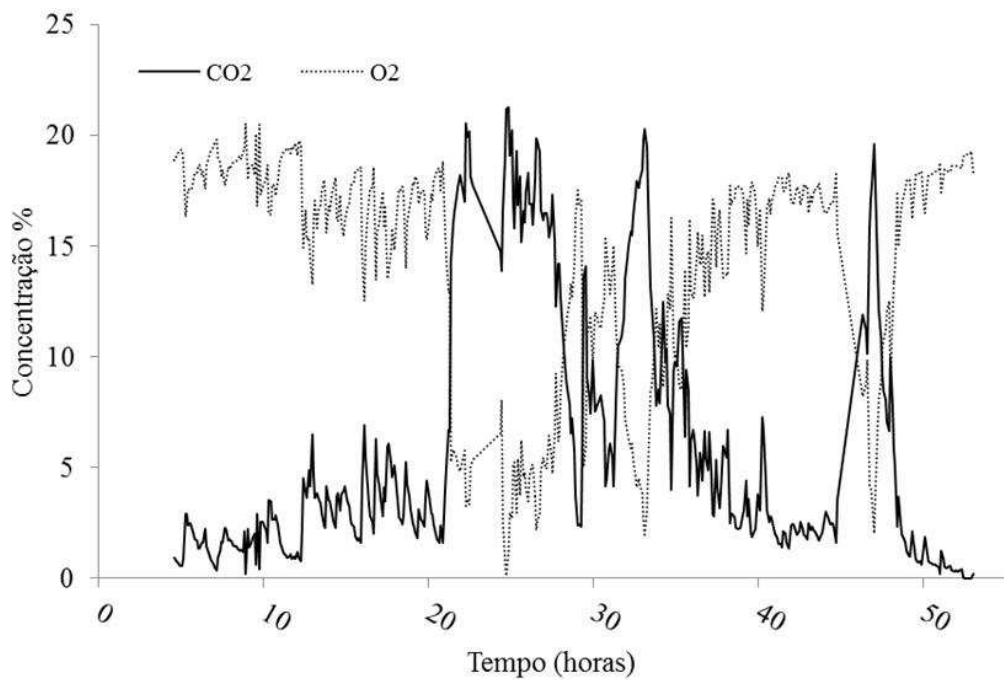


Figura 10 – Concentração de dióxido de carbono e oxigênio no gás de saída com a queima dos gases

Após 24,5 horas do início da carbonização houve um pico de monóxido de carbono Etapa 2 (Figura 9), evidenciando a escassez de oxigênio, fato que também pode ser observado na Figura 10. Para evitar a extinção da chama, o duto de ar foi parcialmente aberto, permitindo a entrada de mais oxigênio.

Vale a pena ressaltar que a carbonização em fornos retangulares não acontece de forma uniforme, a frente de carbonização se desloca da porta para o duto de conexão com a chaminé e de cima para baixo. É possível que a fornalha tenha acelerado a retirada dos gases combustíveis (principalmente o monóxido de carbono) dando início a etapa 3, com baixa concentração de gases para manter a chama acesa. Quando a frente de carbonização se aproximou da saída do duto, gases combustíveis foram novamente gerados, iniciando a etapa 4. Após essa etapa não foi observado saída de fumaça pela chaminé, indicando o fim do processo de carbonização. A temperatura média dos gases foi de 569,85 °C e a máxima de 994,85 °C.

2.3.2.3. Análise comparativa das emissões: Carbonização sem e com queima dos gases

A Tabela 4 resume os resultados das emissões médias sem queima e com queima de gases.

Tabela 4 – Comparação entre os resultados obtidos sem queima e com queima de gases

Carbonização	Concentrações médias na saída (%)				Vazão mássica média kg h ⁻¹	Emissões kg de CO ₂ equivalente
	CO	CH ₄	CO ₂	O ₂		
Sem queima	1,16	0,29	3,08	19,23	9,60	279,64
Com queima	0,30	0,03	5,85	16,25	12,36	216,12
Varição (%)	-74,14	-99,8	+89,93	-15,48	+28,75%	-22,71

Como mostrado na Tabela 4, a queima dos gases resultou na redução de 74,14 % e 99,8 % das emissões médias de monóxido de carbono e metano, respectivamente. Cardoso et.al (2010) relataram redução de 96 % do metano após a queima dos gases e Halouani & Farhat (2003) conseguiram eliminar totalmente as emissões de gases combustíveis da carbonização, numa planta com quatro fornos metálicos ligados em uma unidade de queima.

A concentração média de dióxido de carbono aumentou em 89,93 %, enquanto a concentração média de oxigênio foi reduzida em 15,48 %, indicando que realmente houve a oxidação dos combustíveis e não somente uma diluição. As altas concentrações de oxigênio na saída eram esperadas, uma vez que a câmara de combustão não funciona durante todo o período da carbonização.

Nota-se, ainda pela Tabela 4, que houve uma redução de 22,71 % na quantidade equivalente de CO₂ emitida pelo sistema demonstrando que a queima dos gases, além do potencial energético é uma alternativa ambientalmente correta.

2.3.3 Propriedades do carvão vegetal

Na Tabela 4 são apresentados o rendimento gravimétrico e as propriedades do carvão vegetal, após as carbonizações sem e com queima dos gases.

Tabela 4. Rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal, após as carbonizações sem e com queima dos gases

Parâmetros	Carbonização sem queima dos gases	Carbonização com queima dos gases
Rendimento gravimétrico – Carvão vegetal (%)	32	33
Rendimento gravimétrico – Finos (%)	1,99	3,15
Rendimento gravimétrico – atíços (%)	2,29	2,91
Umidade (%)	5,04	5,26
Densidade aparente (kg/m ³)	373,72	340,73
Friabilidade (%)	12,32	15,52
PCS (kcal/kg)	7092	7026
Carbono fixo (%)	75,54	72,70
Materiais voláteis (%)	24,25	22,83
Cinzas (%)	0,20	0,29

As propriedades medidas do carvão vegetal demonstraram que a queima dos gases, pela câmara de combustão não influenciou a qualidade e o rendimento do processo, quando comparados aos mesmos resultados obtidos sem queima de gases, exceto pelo pequeno aumento na friabilidade e redução do carbono fixo. Entretanto, essas variações não podem ser diretamente atribuídas à queima dos gases, pois outras variáveis de difícil controle durante o processo de carbonização.

A densidade foi considerada baixa para o aproveitamento siderúrgico que demanda uma massa específica aparente de 400 kg m⁻³ (Santos, 2008), mas é justificada pela baixa densidade da madeira utilizada neste experimento (490 kg m⁻³). A friabilidade foi de 12,32 %, o que indica que o carvão apresenta pouca friabilidade (OLIVEIRA et al., 1982), resultado considerado satisfatório. Os demais padrões de qualidade desejáveis para a siderurgia foram atendidos. O rendimento do forno pode ser considerado excelente, já que fornos rudimentares de alvenaria, tais como os de encosta e rabo-quente, apresentam, normalmente, rendimentos inferiores a 28 % (Carneiro et al., 2011).

2.4 CONCLUSÕES

- A estrutura metálica da chaminé revestida com manta cerâmica se mostrou bastante adequada, pois atendeu às condições do processo de combustão, sem problemas em sua estrutura. A estrutura metálica modulada tem como vantagem principal a possibilidade de ser montada e desmontada com facilidade, e deslocada para outra praça de carbonização.
- A baixa inércia térmica da manta cerâmica faz com que ocorram variações abruptas de temperatura demandando uma quantidade considerável de combustível auxiliar para manter a base aquecida. Logo, o uso de tijolos refratários para a construção da base é uma alternativa mais adequada.
- A câmara de combustão funcionou adequadamente como queimador de gases, promovendo a queima dos gases durante 32 % do tempo total de carbonização. No entanto houve interrupção da chama devido a variação de vazão dos gases.
- O gasto de combustível auxiliar para abastecimento da câmara de combustão na fase de baixa vazão de gases foi considerada pequena.
- Houve redução da concentração de metano e monóxido de carbono emitidos durante a carbonização com queima dos gases.
- A queima dos gases não afetou o rendimento e a qualidade do carvão vegetal.
- As temperaturas médias medidas durante o funcionamento da câmara de combustão evidenciam o grande potencial energético que pode ser aproveitado.
- Outros estudos para verificar as dimensões corretas, bem como as melhores características construtivas do sistema de combustão devem ser conduzidos para melhorar o controle da carbonização e aproveitamento da energia gerada no processo.

2.5 LITERATURA CITADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, RJ, 1986. p. 8.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2011. Brasília, 2012. p. 145.

BRITO, J. O. “Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira”. Documentos Florestais. 1990, Vol. 9, pp. 1-19.

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELOS, D. C. “Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes”. Revista Cerne. 2010, Vol. 16, pp. 115-124.

CARNEIRO, A. C. O.; BARCELLOS, D. C.; SANTOS, R. C. Treinamento carvão vegetal: apostila teórica e prática. 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Balanço Energético Nacional 2011: Ano Base 2010. Rio de Janeiro :s.n., 2011. p. 266.

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

GOMES, G. M. F.; ENCARNAÇÃO, F. “The environmental impact on air quality and exposure to carbon monoxide from charcoal production in southern Brazil”. Environmental Research, 2012, Vol. 116, pp. 136-139.

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

IBGE. Brazilian Institute of Geography and Statistics. Disponível online em: <<http://www.ibge.gov.br>>, 2012.

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

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

OLIVEIRA, J. B., VIVACQUA FILHO, A.; GOMES, P. A. Produção de Carvão Vegetal - aspectos técnicos. In: Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, 1982. pp. 60-73.

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

PAJOT, G. “Rewarding carbon sequestration in south-Western French forests: A costly operation?”. Journal of Forest Economics. 2011, Vol. 17, pp. 363-377.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros da qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. . Belo Horizonte, MG : Disponível online em <painelflorestal.com.br/exibeNews.php?id=1784>. Acesso em: 31 Junho, 2012.

VITAL, B. R. Métodos de determinação de densidade da madeira. Viçosa, MG : SIF, 1984. p. 21, (Boletim Técnico, 1).

3. ARTIGO III: SIMULAÇÃO DE UMA CÂMARA DE COMBUSTÃO DE GASES PROVENIENTES DO PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO.

Resumo: O carvão vegetal é um importante insumo para a indústria siderúrgica, principalmente para pequenos produtores de ferro gusa. A produção rudimentar em fornos de alvenaria gera passivos sociais econômicos e ambientais devido à emissão de gases poluentes e de efeito estufa. Uma solução para esse problema é a incineração dos gases gerados durante o processo de carbonização. Por esse motivo, objetivou-se com este trabalho simular uma câmara de combustão para tais gases. Um protótipo físico foi utilizado para validar o modelo em CFD. Considerando a alta variabilidade do processo de carbonização, bem como variáveis difíceis de prever, como intempéries, pode-se afirmar que os resultados mostram boa concordância entre as simulações e os resultados experimentais.

Palavras-chave: Carbonização, Incineração de gases, CFD.

Abstract: Charcoal is an important input for the steel industry, especially for small producers of pig iron. The rough production in masonry ovens generates social, economic and environmental liabilities due to the emission of pollutant and greenhouse gases. A solution to this problem is the incineration of the gases generated during the

carbonization process. Therefore, the objective of this study was to simulate a combustion chamber for these gases. A physical prototype was utilized to validate the model on CFD. Given the high variability of the carbonization process as well as the variables difficult to predict such as bad weather, it can be affirmed that the results show a good agreement between simulations and experimental results.

Key words: Carbonization, Gases Incineration, CFD.

3.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o único país que produz carvão vegetal em larga escala para ser utilizado na indústria, destacando-se como maior produtor e consumidor deste produto [1]. Os principais destinos são os setores de ferro gusa e aço [2], que consomem 72 % do carvão vegetal produzido, e de ferro-liga, que utiliza 12 %, seguido do residencial (cocção e aquecimento residencial), do industrial (excluindo-se a siderurgia), com destaque para a produção de cimentos, indústria química, de alimentos e de cerâmicas [3].

Os desafios do setor produtivo de carvão vegetal estão relacionados à questão da viabilidade econômica da tecnologia empregada na sua produção e questões ambientais decorrentes das emissões geradas durante sua produção, além da origem da matéria-prima (muitas vezes retiradas de mata nativa sem o devido manejo florestal).

Grande parte do carvão vegetal produzido no Brasil é proveniente de fornos simples de baixo rendimento e sem controle de emissões de poluentes atmosféricos, causando impactos sociais, ambientais e econômicos negativos [4,5]. Assim, torna-se indispensável o desenvolvimento de queimadores de fumaça que não afetem negativamente o rendimento dos fornos e a qualidade do carvão produzido, além de queimarem os gases da carbonização, reduzindo a emissão de gases estufa, para pequenos produtores de carvão vegetal, uma vez que grande parte da produção nacional é produzida por eles [6].

O desenvolvimento de uma câmara de combustão adequada para a 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.

Atualmente não há uma metodologia de projeto para câmaras de combustão de gases de carbonização, além disso, o comportamento térmico e fluidodinâmico, bem como suas influências no desempenho dos sistemas de combustão não são bem compreendidos. Entretanto, os avanços nos métodos numéricos, associados à evolução dos sistemas computacionais, estão permitindo que problemas de escoamentos de fluidos, com transferência de calor e de massa, possam ser resolvidos com rapidez, integrando assim as ferramentas de CFD (Dinâmica dos fluidos computacional) aos procedimentos de projetos e análise de escoamento, nas mais diversas áreas da engenharia [7].

Diante das necessidades de desenvolvimento de sistemas de queima de gases de carbonização mais eficientes esse trabalho foi feito com o objetivo de avaliar os aspectos térmicos e fluidodinâmicos de uma câmara de combustão em uso por meio da CFD.

Especificamente objetivou-se verificar o comportamento da vazão mássica e concentração dos gases combustíveis: CO, CH₄ e H₂, além do gás inerte CO₂, gerados no interior do forno de carbonização e, de posse deste conhecimento, validar um modelo de combustão em CFD, considerando as composições e vazões mássicas dos gases provenientes de fornos de carbonização.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Descrição do sistema

O forno utilizado neste experimento consiste em uma unidade piloto com as mesmas proporções reportadas por [8]. Foi construído com oito aberturas (quatro de cada lado), sendo que duas têm tamanho maior, para efetuar a ignição e as outras, para controle da carbonização (Figura 1). O sistema forno-câmara de combustão foi projetado para a carbonização de 10 m³ de madeira.

A câmara de combustão foi projetada e construída de modo a minimizar o consumo de materiais e a maximizar a eficiência de queima, levando-se em consideração o tempo de residência dos gases no interior da câmara.

A câmara de combustão e a chaminé formaram um único conjunto cilíndrico (Figura 1). A ligação entre o forno e a fornalha foi feita por um tubo cilíndrico com 0,3 m de diâmetro interno.

A base da chaminé foi construída de tijolos cerâmicos maciços convencionais.

O interior da câmara era cilíndrico e foi todo revestido com uma manta cerâmica Morganitekawool®, constituída de 35 % de Al₂O₃, 50 % SiO₂, 0,05 % Fe₂O₃, 0,05 % CaO, 0,05 MgO, 0,2 % de álcalis (Na₂O e K₂O) e Zircônia com 0,051m de espessura e massa específica de 96 kg m⁻³ e ponto de fusão de 2033 K.

O exterior da câmara de combustão era cúbico (1 m³) e apresentava uma entrada de ar de seção quadrada (0,12x0,12) m² na base da câmara.

A chaminé foi construída em módulos de aço (ANSI 1045 com 3 mm de espessura) com 1,20 m de altura e 0,7 m de diâmetro interno com flanges para a conexão. O interior de cada módulo foi revestido com a mesma manta cerâmica usada

na câmara de combustão. As paredes externas dos módulos foram pintadas com resina anticorrosiva branca para evitar a oxidação do metal. Ao término da montagem, a chaminé tinha 3,6 m de altura, além de 1 m da câmara de combustão e 0,6 m de diâmetro interno.

Durante as primeiras horas do processo de carbonização ocorre a liberação da água da madeira, necessitando de uma grande área transversal no duto de exaustão do forno para a chaminé. Entretanto, quando o gás liberado está suficientemente rico para ser queimado é necessário reduzir a área de exaustão a fim de evitar um fenômeno conhecido como flashback, definido como a extinção da chama quando a velocidade da reação é maior que a velocidade do escoamento. Portanto, no duto de conexão entre o forno e a câmara de combustão foi adicionada uma válvula borboleta (vb, na Figura 1) para o controle do fluxo dos gases. A base da chaminé foi construída de tijolos cerâmicos maciços convencionais.

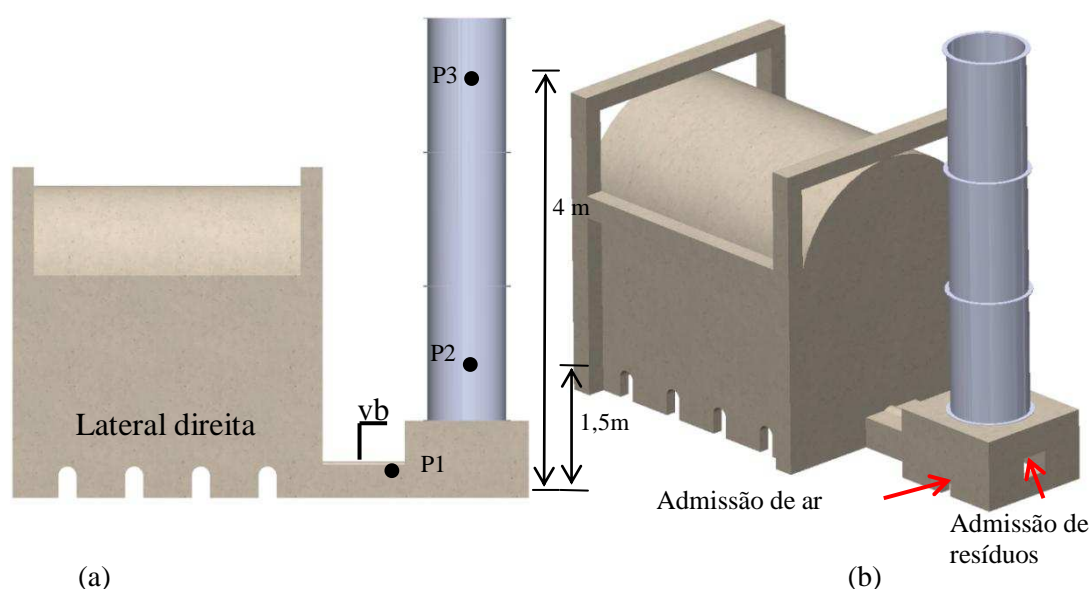


Figura 1 – Esquema forno, câmara de combustão (a) vista lateral e (b) vista em perspectiva.

Os pontos P1 e P3 representam as localizações dos pontos de coleta de gás e de temperatura durante os dois primeiros ensaios o ponto P2 foi o segundo ponto de medição de temperatura utilizado somente durante o terceiro ensaio.

3.2.2 Carbonizações

Foram realizadas três carbonizações. A primeira sem queima de gases, usando o sistema de queima com um sistema para coleta e análise de gases e temperaturas, a

segunda usando o sistema de queima com um sistema para coleta e análise de gases e temperaturas e uma terceira carbonização foi conduzida utilizando a câmara de combustão, sem coleta e análise dos gases. Apenas as temperaturas nos pontos P2 e P3 foram medidas. Para tanto, o forno foi preenchido com madeira de *Eucalyptus sp.*, com comprimento médio de 2,10 m e diâmetro de 12 a 25 cm, na posição vertical. O teor de umidade da madeira carbonizada variou de 27,06 a 37,52 % (b.s).

Baseado no trabalho de [9] verificou-se que o processo de carbonização da madeira pode ser dividido em quatro em quatro fases:

Tabela 2 – Faixas teóricas de temperatura para controle da carbonização no sistema forno-fornalha, mensuradas na cúpula do forno [9].

Fase	Faixa de Temperatura	Tempo Manutenção	Fenômeno
I	100-150°C	15-16 horas	Liberação de vapor de água – secagem da madeira, fase endotérmica.
II	150-275°C	11-12 horas	Degradação das hemiceluloses, eliminação de gases, fase endotérmica.
III	275-400°C	23-24 horas	Degradação da celulose, grande produção de gases, fase exotérmica. Formação do carvão vegetal.
IV	400-470°C	17-18 horas	Redução da emissão de gases, fase exotérmica. Aumento da concentração de carbono no carvão vegetal.

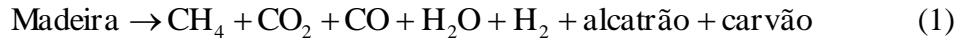
O tempo de duração em cada fase descrita acima dependeu das condições iniciais e qualidade da madeira.

O controle das temperaturas de carbonização foi realizado por 10 termopares tipo K, devidamente calibrados e testados, dois localizados na parte superior do forno e os outros oito dispostos nas laterais (4 na lateral direita e os demais simetricamente na lateral esquerda). Os termopares foram conectados a um sistema supervisorio composto por um PLC (controlador lógico programável) e um computador. O software SCADABR® foi utilizado para tratar e armazenar os dados adquiridos pelo PLC. Além disso, o sistema supervisorio apresentava gráficos de temperatura em tempo real, possibilitando, manter as temperaturas da parte superior do forno próximas das faixas estabelecidas.

3.2.3 Modelo Matemático

3.2.3.1 Considerações Iniciais

O processo de carbonização é, ou seja, a pirólise da madeira é um processo complexo em que são formados inúmeros compostos, tais como alcanos, alquenos, metano, monóxido e dióxido de carbono, dentre outros [10-14]. Neste trabalho, por hipótese simplificadora, considerou-se que na carbonização ocorre a seguinte reação global:



Muitos modelos de aplicação prática consideram a Equação 1 [15]. O alcatrão, mesmo quando efetuada a queima dos produtos da pirólise deixa o sistema na forma gasosa, na verdade, pode-se dizer que o alcatrão apresenta duas frações: uma inerte e outra reativa [16]. Porém, neste trabalho a fração reativa de alcatrão é desconsiderada.

3.2.3.2 Formulação Matemática:

As equações de Navier-Stokes médias de Reynolds (RANS) considerando a decomposição de Favre e o modelo k-ε de turbulência são:

Equação da continuidade:

$$\frac{D(\bar{\rho}\tilde{\mathbf{v}})}{Dt} = 0 \quad (2)$$

Equação da quantidade de movimento

$$\frac{D(\bar{\rho}\tilde{\mathbf{v}})}{Dt} = -\nabla\bar{p} + \nabla\bar{\mathbf{P}} - \nabla \cdot (\bar{\rho}\overline{\mathbf{v}'\mathbf{v}'}) + \dot{S}_M \quad (3)$$

Equação da energia

$$\frac{D(\bar{\rho}\tilde{E})}{Dt} = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{Pr_t} \nabla \tilde{H} \right) + \bar{\mathbf{P}} : (\nabla \mathbf{v}) + \dot{S}_E \quad (4)$$

O símbolo ":" representa um produto contraído duas vezes.

Tensor de Tensão (\mathbf{P}):

$$\mathbf{P} = \left[p + \left(\frac{2}{3} \mu \right) (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right] \mathbf{I} - \mu \left[(\nabla \mathbf{v}) + (\nabla \mathbf{v})^T \right] \quad (5)$$

Tensor de Reynolds ($\overline{\rho \mathbf{v}'\mathbf{v}'}$):

$$\overline{\rho \mathbf{v}'\mathbf{v}'} = \mu_t \left(\nabla \tilde{\mathbf{v}} + \nabla \tilde{\mathbf{v}}^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{\mathbf{v}}) \mathbf{I} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} \tilde{k} \mathbf{I} \quad (6)$$

em que μ_t é a viscosidade turbulenta, calculada por:

$$\mu_t = c_\mu \bar{\rho} \frac{\tilde{k}^2}{\tilde{\varepsilon}}, \quad c_\mu = 0,09 \quad (7)$$

O modelo k- ε foi usado para estimar os efeitos da turbulência:

$$\frac{D(\bar{\rho}\tilde{k})}{Dt} = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{Pr_k} \nabla \tilde{k} \right) - \overline{\rho \mathbf{v}'\mathbf{v}'} : (\nabla \mathbf{v}) - \bar{\rho} \tilde{\varepsilon} \quad (8)$$

$$\frac{D(\bar{\rho}\tilde{\varepsilon})}{Dt} = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{Pr_\varepsilon} \nabla \tilde{\varepsilon} \right) - c_{\varepsilon 1} \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}} \overline{\rho \mathbf{v}'\mathbf{v}'} : (\nabla \mathbf{v}) - (c_{\varepsilon 3} \chi_v - c_{\varepsilon 2}) \bar{\rho} \frac{\tilde{\varepsilon}^2}{\tilde{k}} \quad (9)$$

Em que χ_v é dado por:

$$\chi_v = \frac{1}{4} \left(\frac{\tilde{k}}{\tilde{\varepsilon}} \right)^3 \left(\frac{\partial \tilde{v}_1}{\partial r} + \frac{\partial \tilde{v}_2}{\partial x} \right)^2 \frac{\tilde{v}_2}{r} \quad (10)$$

A entalpia (H) por ser calculada por:

$$\tilde{H} = \frac{\bar{p}}{\bar{\rho}} + \tilde{\psi} \quad (11)$$

a energia total (E) é então definida como:

$$\tilde{E} = \frac{\bar{p}}{\bar{\rho}} + \tilde{\psi} + \frac{1}{2} \tilde{v}^2 \quad (12)$$

A entalpia de formação da mistura gasosa é calculada como:

$$\tilde{\psi} = \sum_{i=1}^N \tilde{Y}_i h_{i,\text{ref}} \quad (13)$$

A lei dos gases ideais fecha o sistema de equações (Equações 14 e 15).

$$\bar{p} = \bar{\rho} \tilde{g} \tilde{T} \quad (14)$$

em que:

$$\tilde{g} = R \sum_i^N \frac{\tilde{Y}_i}{W_i} \quad (15)$$

Para considerar efeitos de diluição e pré-mistura parcial, a fração de mistura Z deve ser considerada. Os valores de Z variam de 0 (oxidante puro) a 1 (combustível puro). A premissa básica desse modelo é que o número de Lewis seja igual a 1. A difusividade térmica e a difusividade mássica dificilmente são iguais, porém para que as equações 16 e 17 sejam válidas essa consideração é necessária [17-19]. Outro modelo muito utilizado em CFD é o Eddy Dissipation Model (EDM). Porém, o modelo EDM não prevê corretamente distorções, ondulações e reconexões na forma da chama [20], e pode superestimar a temperatura [18]. A equação para o cálculo da média de Z é mostrada na Equação 16. A equação da variância de Z (Equação 17) é usada para considerar os efeitos da turbulência na distribuição na fração de mistura.

$$\frac{D(\rho \bar{v} \tilde{Z})}{dt} = \nabla \cdot \left(\left(\frac{\mu_t}{Sc_{tZ}} \right) \nabla \tilde{Z} \right) \quad (16)$$

$$\frac{D(\rho \bar{v} \tilde{Z}'^2)}{dt} = \nabla \cdot \left(\left(\frac{\mu_t}{Sc_{t\tilde{Z}'^2}} \right) \nabla \tilde{Z}'^2 \right) + 2 \frac{\mu_t}{Sc_{\tilde{Z}'^2}} (\nabla \tilde{Z})^2 - \bar{\rho} \tilde{\chi} \quad (17)$$

em que

$$\tilde{\chi} = C_\chi \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}} \tilde{Z}'^2 \quad (18)$$

em que:

$$C_\chi = 2,0$$

A composição média do fluido é calculada em função da média da fração de mistura, da variância da fração de mistura e da taxa de dissipação, que é obtida a partir das tabelas de modelos flamelet:

$$\tilde{Y}_i = \int_0^1 Y_i(Z, \tilde{\chi}) P_{\tilde{Z}, \tilde{Z}'^2}(Z) \delta Z \quad (19)$$

A integração da função densidade de probabilidade (PDF) de P não é feita durante a resolução das equações anteriores, mas durante a geração da tabela flamelet [21].

A distribuição de probabilidade escolhida para P foi do tipo beta, embora outros tipos de distribuição possam ser utilizados [19].

$$P_{\tilde{Z}, \tilde{Z}'^2}(Z) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} Z^{\alpha-1} (1-Z)^{\beta-1} \quad (20)$$

em que:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (21)$$

$$\alpha = \tilde{Z} \left(\frac{Z(1-\tilde{Z})}{\tilde{Z}''^2} - 1 \right), \quad \beta = (1-\tilde{Z}) \left(\frac{Z(1-\tilde{Z})}{\tilde{Z}''^2} - 1 \right) \quad (22)$$

Neste estudo considera-se o escoamento em regime permanente de um fluido incompressível em regime turbulento em três dimensões com reações químicas de combustão.

A massa específica do combustível foi calculada com base na composição dos gases combustível (CO, CO₂, CH₄, H₂ e N₂), levando em consideração a temperatura de entrada dos mesmos na câmara de combustão (200 °C). A composição do combustível foi determinada experimentalmente durante a primeira carbonização. As paredes da câmara de combustão foram consideradas adiabáticas, opacas com emissividade 1 e fração difusiva 1. A velocidade do fluido próxima a parede foi considerada zero (condição de não deslizamento). Na saída da chaminé considerou-se a condição de abertura com temperatura externa de 25 °C e pressão relativa de 0 Pa. Na admissão de ar considerou-se a entrada de oxidante puro (ar, 79 % de nitrogênio e 21 % de oxigênio), condição de abertura e temperatura de 60 °C e a pressão relativa de 0 Pa. O modelo de radiação utilizado foi o P1 [22]

A discretização do domínio de soluções (Figura 3) foi feita com o uso do programa computacional ICEM ® e as equações discretizadas foram resolvidas pelo programa computacional CFX ® que é baseado no método de volumes finitos [23]. Este método resolve os balanços de massa, quantidade de movimento, energia e balanço de espécies para cada volume.

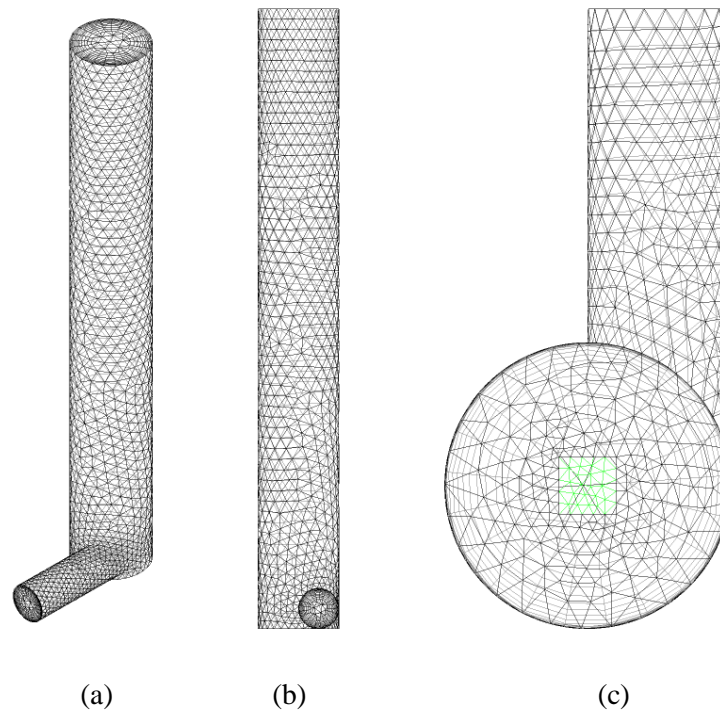


Figura 2 – Malha para a câmara de combustão (19809 nós, 14098 tetraedros, 525 prismas, 30067 cunhas): (a) vista em perspectiva, (b) vista frontal e (c) vista inferior.

3.2.3.3 Composição dos gases para a simulação em CFD

Devido às infinitas combinações de frações dos componentes do gás de carbonização, foram selecionados três cenários, a partir dos valores experimentais, para a composição de dos gases: a rica em combustível (a melhor combinação encontrada experimentalmente), a média e a pobre em combustível (pior combinação encontrada experimentalmente, mas que ainda era passível de queima).

3.2.4 Medidas experimentais

3.2.4.1 Coleta e análise dos gases

Durante o primeiro ensaio, sem queima de gases, o material foi coletado em dois pontos distintos (P1 e P3). O propósito foi avaliar o efeito da diluição do gás no ponto P3, verificando se a admissão de ar estava adequada.

A coleta de gases foi feita continuamente durante duas carbonizações. Para isso, uma sonda com 0,01 m de diâmetro interno foi inserida na chaminé a 4 m do nível do solo, sendo os gases aspirados e conduzidos por um sistema de tratamento em série dividido em 6 etapas:

1. lavagem em etanol 80% v/v para a retenção do alcatrão;
2. resfriamento para condensar o etanol volatilizado;
3. lavagem em água deionizada;
4. resfriamento em baixa temperatura (4 °C) para condensar a água e outros voláteis não capturados nas outras etapas do tratamento;
5. passagem por carvão ativado para retenção de voláteis residuais;
6. passagem pelo filtro de algodão para reter particulados;

Os gases limpos e secos foram conduzidos para um analisador de gases (Gasboard 3100, Wuhan CUBIC Optoelectronics Co. LTDA, China), para determinar os teores de CO, CO₂, CH₄, H₂ e C_nH_m. Os dados transmitidos pelos sensores do analisador de gases foram tratados e armazenados em disco. Na Figura 4 é apresentado um esquema que sumariza todo o sistema de coleta e análise dos gases.

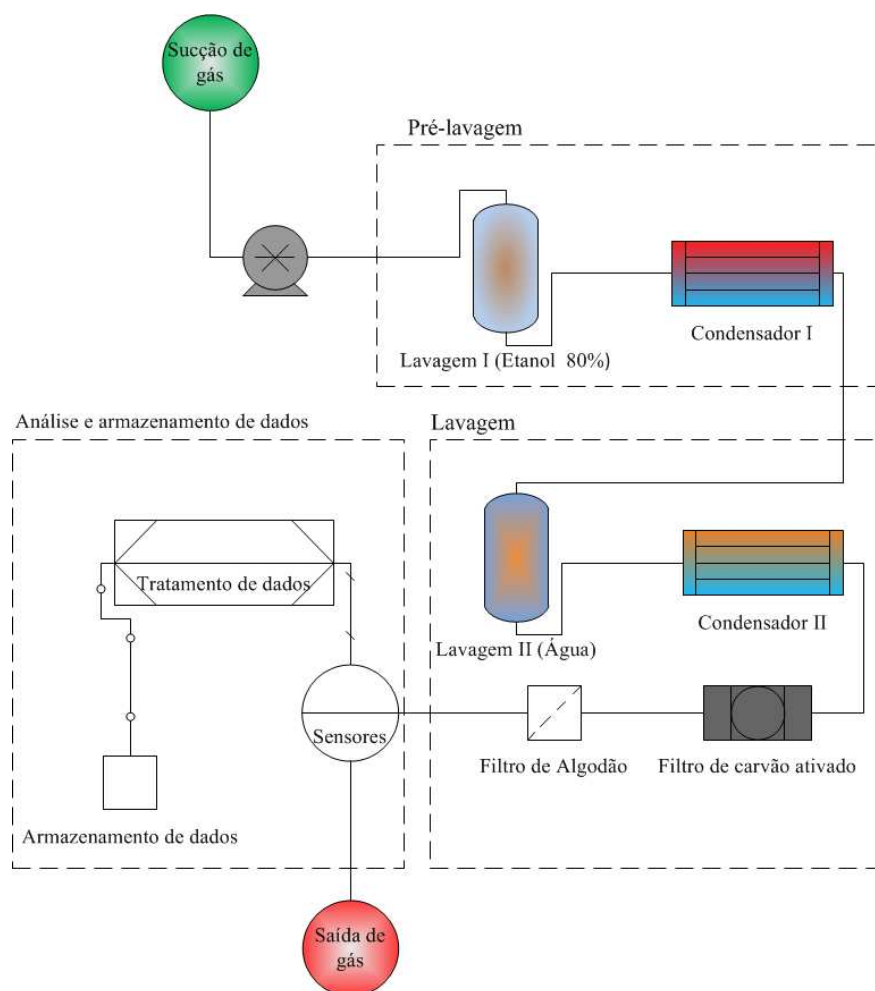


Figura 3 – Processo de tratamento e análise dos gases da carbonização

A distribuição probabilística da taxa de massa de combustível é um parâmetro importante, pois, caso exista algum modelo estatístico que descreva tal distribuição, o

mesmo pode ser utilizado em simulações transientes do processo de queima dos gases. Portanto, durante as carbonizações, os valores das taxas de massa de combustível oriundas do forno foram medidas e suas frequências tabuladas para averiguar a existência de uma distribuição probabilística que se adeque aos dados.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.3.1 Resultados experimentais

O primeiro ensaio de carbonização durou 69 horas, e não foi efetuada a queima dos gases. Na Figura observa-se que a composição do combustível é variável com o tempo. De fato, a taxa de massa é dependente da temperatura no interior do forno, do teor de água e da massa específica da madeira. Portanto, os ensaios foram sempre conduzidos segundo descrito no item 3.2.2.

No primeiro ensaio, o teor de água foi de 37,5 % (b.s). Logo, durante as primeiras 15 horas, houve somente a secagem da madeira com muita liberação de vapor de água e poucos gases combustíveis. Entretanto, após 30 horas de carbonização as frações mássicas dos componentes tornaram o gás passível de queima e, a partir da quadragésima a sexagésima hora, a composição se tornou média estável (Figura 4).

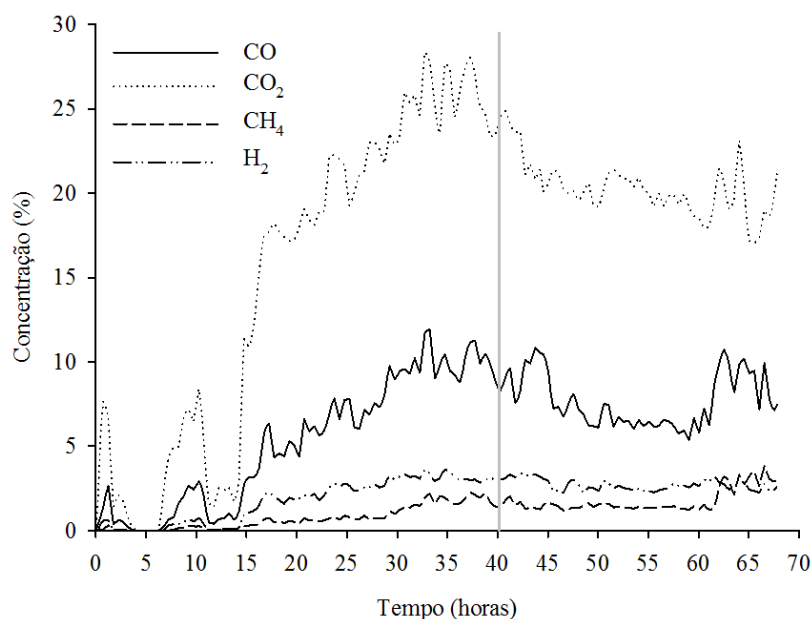


Figura 4 – Concentrações dos gases durante a carbonização sem queima de gases

O segundo e o terceiro ensaios de carbonização tiveram duração de 53 horas, o teor de água da madeira foi de 27,06 % (b.s), por esse motivo, o processo de carbonização foi mais rápido que no primeiro ensaio. A ignição na câmara de combustão foi dada com a queima de resíduos florestais e atíços até a que o gás emitido fosse suficientemente rico para manter a chama.

Durante o processo de carbonização, a taxa de massa de gás não foi constante. Desta forma, a consideração de taxa de massa constante como condição de contorno na entrada da chaminé não representa bem a realidade.

Verificou-se, que as taxas se distribuíam com frequências que caracterizam uma distribuição probabilística. Foram testadas as distribuições: Normal, Lognormal e Gama. Por meio da Figura 5 pode-se afirmar que a taxa de massa segue distribuição Gama, uma vez que os pontos plotados se localizam aproximadamente sob a reta que corta o gráfico e entre o intervalo de confiança. Além disso, a hipótese nula (a taxa de massa se distribui conforme a distribuição gama) não foi rejeitada (p-valor > 0,05).

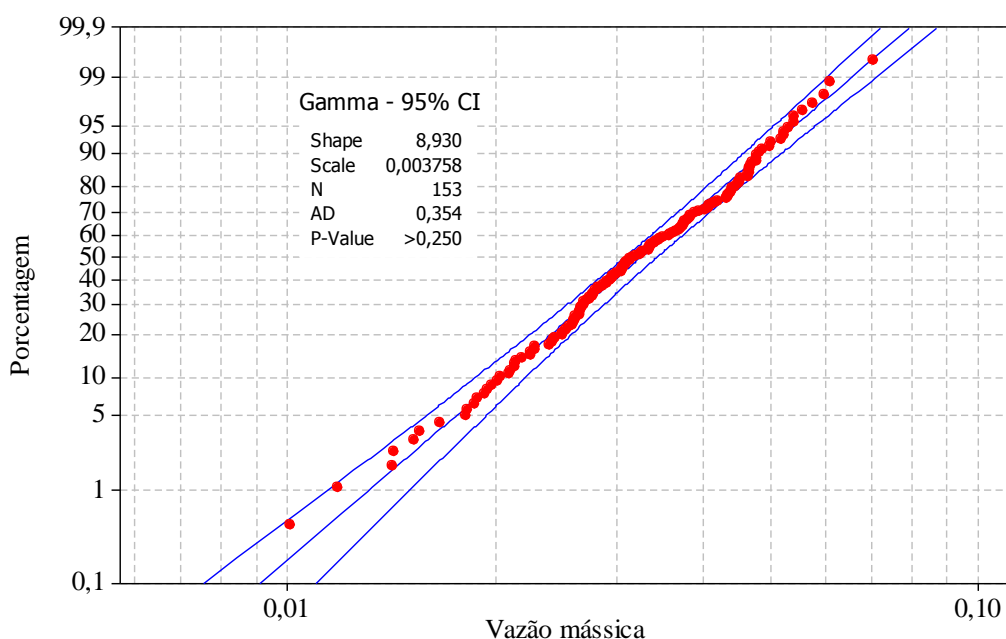


Figura 5 – Gráfico de Probabilidade gama

Dada distribuição de probabilidade, foram realizadas 90 simulações, nas quais foram considerados 3 cenários (rico, médio e pobre em combustível) e 30 taxas de massa de combustível distribuídas aleatoriamente conforme a distribuição Gama com parâmetro

de forma $(r) = 8,930$ e parâmetro de escala $(\alpha) 0,003759$. A composição do gás nos três cenários é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Cenários considerados nas simulações

Cenário	Composição (%)				
	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	N ₂
Rico	12	17	4	4	63
Médio	8	22	2	3	65
Pobre	5	28	1	2	64

Os valores apresentados na Tabela 1 advêm dos resultados experimentais medidos no duto de admissão de gás para a câmara de combustão e representam a melhor, a média e a pior combinação, passíveis de queima, médias registradas.

Embora o empuxo na câmara de combustão, devido à queima dos gases influenciasse a vazão mássica, verificou-se que quando aumentava a retirada de material gasoso do forno, ocorria um aumento da temperatura no interior do forno. Assim, para o controle da temperatura, intervenções eram feitas no processo de carbonização, ora nos controladores de ar do forno, ora no duto de que conduzia o gás até a câmara, com o fechamento parcial da válvula borboleta. Diante disso, considerou-se que o comportamento da taxa de massa sempre se repetiria desde que a temperatura do forno fosse controlada conforme descrito anteriormente.

Na Figura 6 são apresentados os perfis de concentração de oxigênio, dióxido de carbono do segundo ensaio.

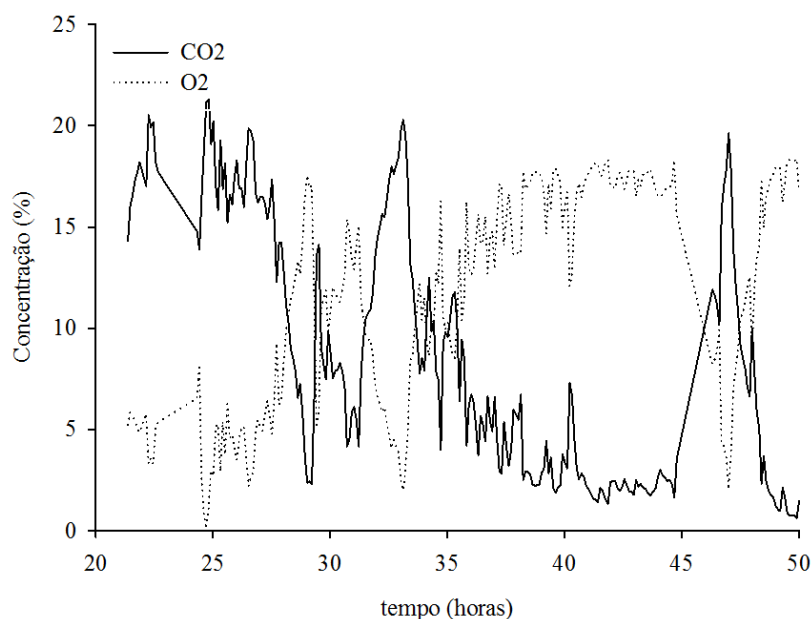


Figura 6 – Concentrações de oxigênio, dióxido de carbono durante o período de queima

As temperaturas abaixo da linha de 200 °C (Figura 7) indicam momentos onde houve extinção da chama na câmara de combustão. O processo de pirólise dentro do forno não ocorre de maneira uniforme no tempo, logo ocorrem períodos em que a mistura gasosa está ou muito rica ou muito pobre. Nota-se que as temperaturas mais altas são acompanhadas por maiores concentrações de dióxido de carbono, caracterizando a queima do material.

Durante a 39^a hora até a 46^a as condições ambientais foram desfavoráveis com a presença de chuva, vento e baixas temperaturas, o que dificultou a operação adequada da câmara de combustão. Foi um período em que o reabastecimento com resíduo foi necessário para manter a temperatura no Ponto P2 em torno dos 250 °C.

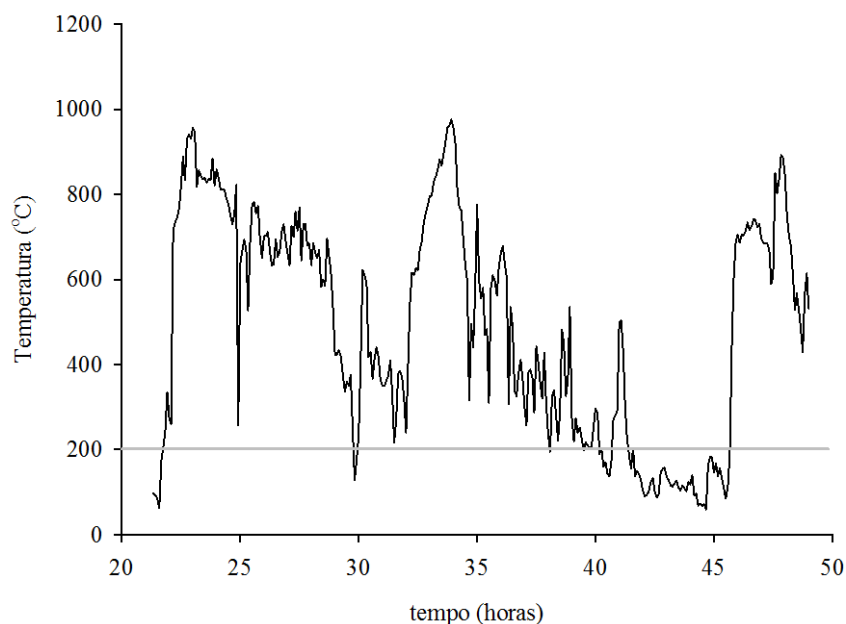


Figura 7 – Temperaturas registradas no ponto P3 durante o período de queima

Na Figura 8 são mostradas as variações da temperatura ao longo do processo de carbonização nos pontos P2 e P3 (Figura 1). Essa carbonização foi mais estável que a anterior e a extinção de chama, (pontos localizados abaixo da linha de 200°C) ocorreu apenas duas vezes.

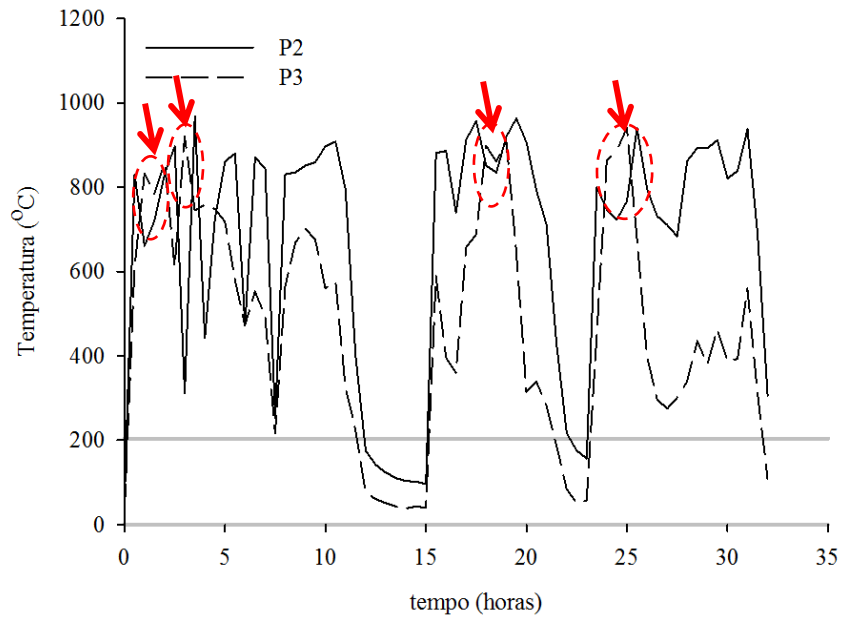


Figura 8 – Temperaturas medidas no terceiro ensaio nos pontos P2 e P3

As temperaturas registradas no ponto P3 em alguns momentos (destacadas na Figura 9) foram maiores que no ponto P2. Provavelmente este fato ocorreu quando a taxa de massa era baixa e a mistura de combustível rica, que resultou em uma chama que se estendeu para fora dos limites da câmara de combustão. Este fato foi visualizado em alguns momentos durante as carbonizações, ressalta-se que a combustão dos gases deve ocorrer completamente no interior da câmara, exaurindo apenas gás, composto por CO_2 , H_2O e N_2 , aquecido, portanto, o dimensionamento do sistema deve ser revisto, principalmente a razão de aspecto e a área de admissão de ar.

3.3.2 Simulação da queima dos gases de carbonificação

As taxas de massa foram distribuídas aleatoriamente de acordo com a distribuição Gama. Nas simulações em que as taxas de massa eram inferiores ou iguais a $0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ e a mistura combustível era rica, como mostrado na Figura 9, verificou-se o mesmo fenômeno verificado na Figura 8, inclusive com emissões de CO , ou seja, a combustão foi incompleta. Isto evidencia a capacidade do modelo em prever o comportamento do sistema.

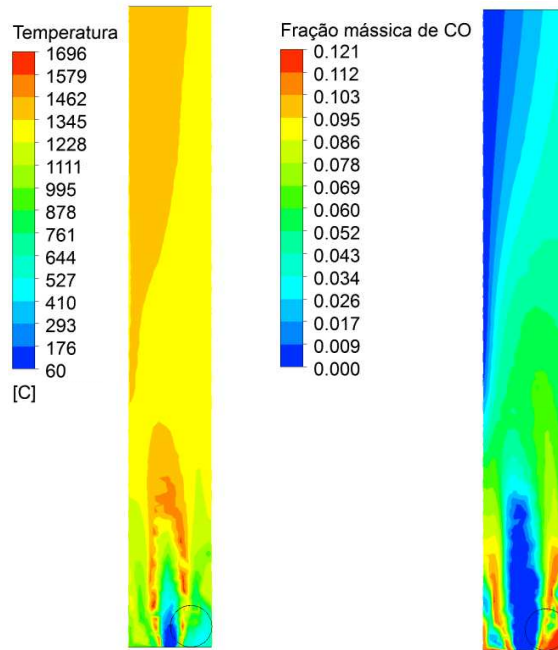


Figura 9 – Contornos de temperatura e fração mássica de CO para uma taxa de massa de $0,05 \text{ kg s}^{-1}$

Na Figura 10 (a) são mostrados os perfis de temperaturas em dois planos ortogonais, neles é possível visualizar a extensão da chama. Já na Figura 10 (b) são mostradas as linhas de corrente que demonstram a boa mistura proporcionada pelo sistema, nota-se que os gases entram tangencialmente na câmara de combustão, formando um vórtice e, conseqüentemente, uma região de baixa pressão no centro da câmara de combustão. Essa baixa pressão é responsável pela sucção de ar.

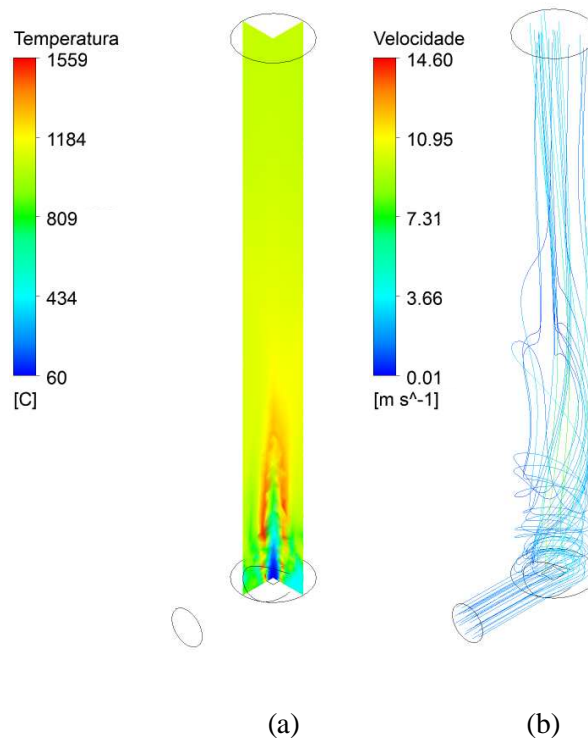


Figura 10 – Perfil de temperaturas (a) e linhas de corrente (b) para uma taxa de massa de $0,05 \text{ kg s}^{-1}$ e mistura média

Os planos ortogonais mostrados na Figura 11 (a) e (b) mostram, respectivamente as concentrações de O_2 e CO_2 que também mostram a extensão da chama e corroboram a afirmação de que os gases foram misturados apropriadamente, permitindo a combustão completa do combustível.

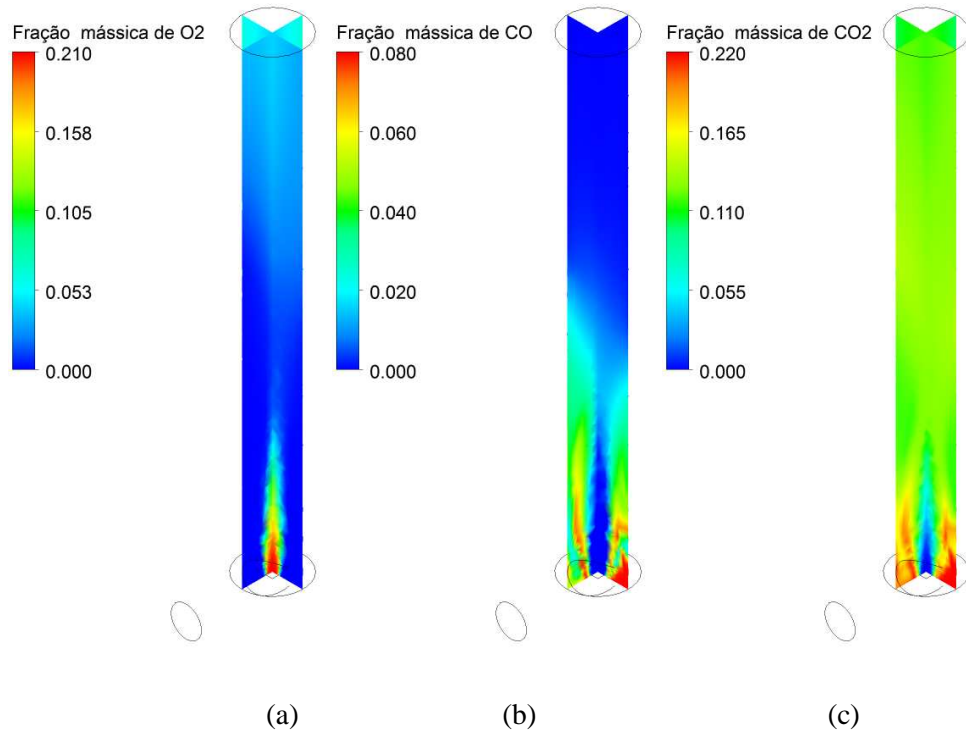


Figura 11 – Perfil de concentração de oxigênio (a), monóxido (b) e dióxido de carbono (c) para uma taxa de massa de $0,05 \text{ kg s}^{-1}$ e mistura média

Os vetores de velocidade mostrados na Figura 12 mostram a eficiência do sistema de admissão do ar que entrava no sistema com altas velocidades.

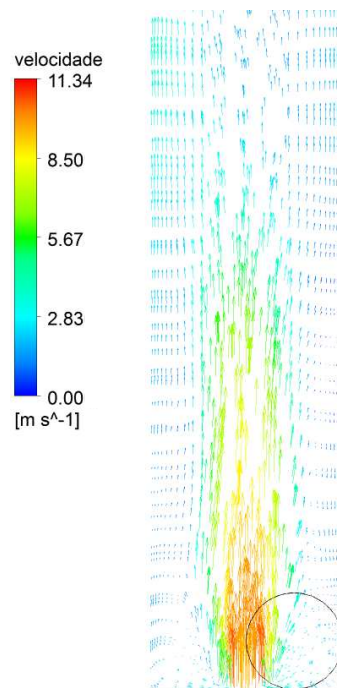


Figura 12 – Vetores de velocidades

3.3.3 Comparações entre os resultados simulados e experimentais

Nas Figuras 13 e 14 são mostrados os valores simulados em confronto com os valores experimentais obtidas para as frações de CO_2 e O_2 , medidas a 4 m de altura na chaminé (P3 na Figura 1).

A menor concentração de O_2 medida no experimento foi de 3,9 %, nesse momento também foi registrado o maior pico de concentração de CO_2 (21,33 %).

A concentração média de CO_2 simulada, analisando os três cenários, foi de 9,63 % e a concentração média experimental, durante o período de queima foi de 8,96 %, já a concentração média de O_2 , analisando os três cenários, foi de 8,81 % enquanto que a concentração média experimental foi de 11,33 %, provavelmente devido a entrada de ar pela abertura da admissão de resíduos.

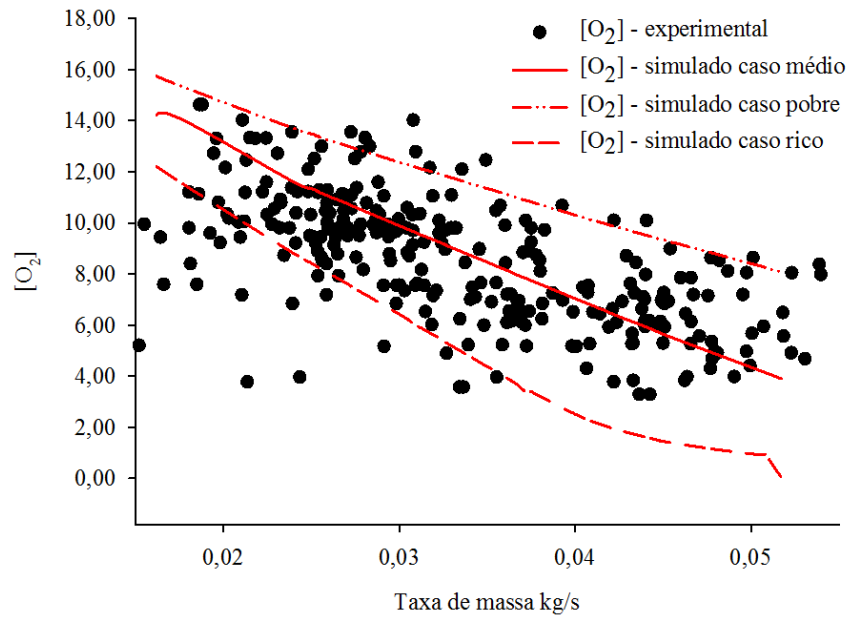


Figura 13 - Concentrações de oxigênio simuladas e valores experimentais.

Os valores experimentais de concentração de oxigênio e as faixas simuladas para os três cenários se encontram dentro de uma faixa de valores observados, mesmo simulando em regime permanente.

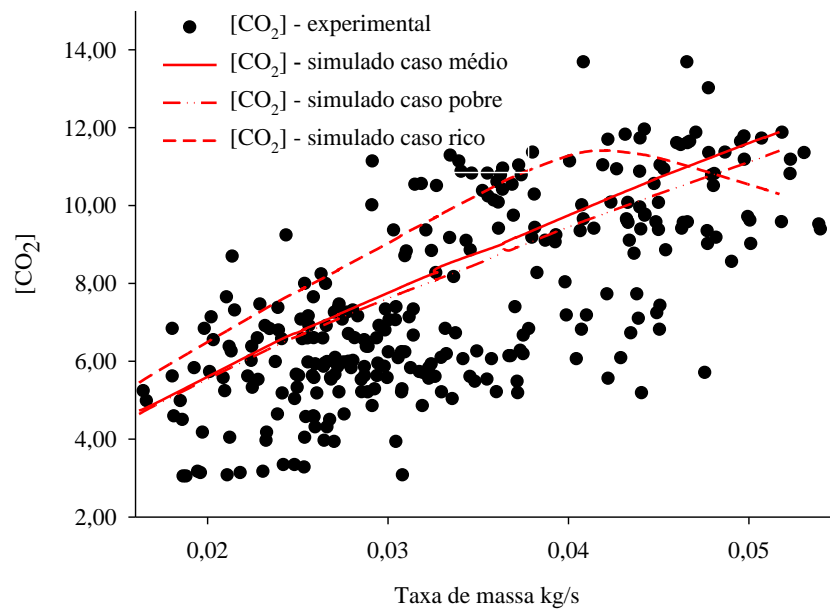


Figura 14 - Concentrações de dióxido de carbono simuladas e limites experimentais.

Os valores experimentais de concentração de dióxido de carbono e as faixas simuladas para os três cenários estão dentro dos pontos de variação experimental.

A temperatura experimental, da mesma forma que as concentrações de CO_2 e O_2 , foram influenciadas pelas condições adversas ocorridas entre a 39ª e 46ª horas. Na Figura 15 é mostrada uma comparação entre valores experimentais e simulados, sem discriminar a riqueza do combustível ou a taxa de massa.

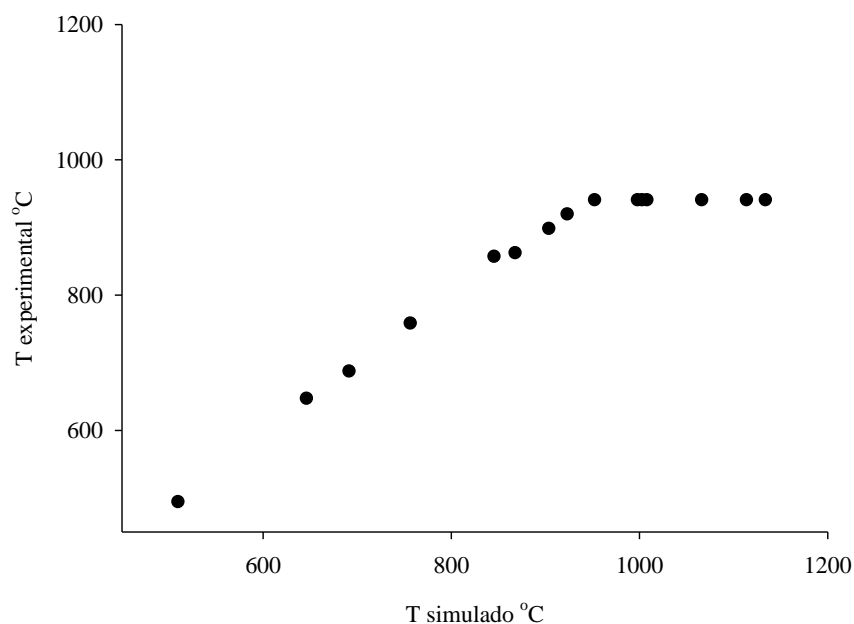


Figura 15 – Comparação entre temperaturas experimentais e simuladas

Observa-se que as simulações apresentam temperaturas máximas maiores que as máximas experimentais registradas, entretanto, essa discrepância era esperada devido a três fatores: primeiro a condição de parede adiabática, pois essa condição de contorno faz com que a temperatura da chama se aproxime da temperatura adiabática de chama, que é sempre maior que as temperaturas observadas experimentalmente; o segundo fator foi condição climática, desfavorável que afetou os resultados experimentais. O terceiro fator é o regime de simulação, pois a taxa de massa varia durante todo o tempo.

Retirando-se o período de carbonização entre a 39ª e 46ª hora que foi influenciado fortemente por fatores externos, os resultados das simulações podem ser considerados satisfatórios.

Yang et al. [24] simularam, em regime permanente, o funcionamento de um incinerador para resíduos perigosos, composto de um forno rotativo e uma câmara de queima secundária, além dos processos de tratamento pós-queima dos gases. A motivação da simulação era verificar o tempo de residência e a distribuição de temperatura no forno e na câmara de combustão secundária, uma vez que esses dois parâmetros norteiam as leis sobre o funcionamento de tais equipamentos. Segundo os

autores, o tempo de residência dos gases após a última admissão de ar deve ser maior que 2 segundos a uma temperatura de até 1100 °C para resíduos que contenham Cloro em sua composição ou 850 °C para resíduos sem cloro.

Outros trabalhos que analisaram a distribuição de temperaturas e o tempo de residência podem ser encontrados em [25] e [26]. Neste trabalho a temperatura no interior da câmara foi bem distribuída e o tempo de residência foi superior a 2 segundos para taxas de massa inferiores a $0,05 \text{ kg s}^{-1}$. Porém, para taxas superiores a $0,05 \text{ kg s}^{-1}$ o tempo de residência foi menor que 2 segundos e a frequências de tais taxas não podem ser ignoradas, como pode ser visto na Figura 16. Deste modo, pode-se dizer que o projeto precisa ser melhorado.

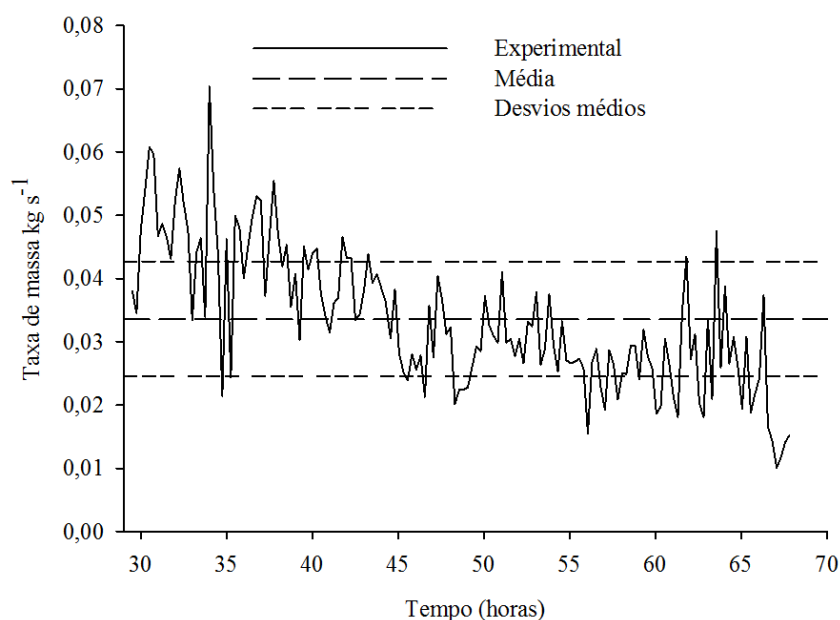


Figura 16 - Taxas de massa registradas durante o segundo ensaio

3.4 CONCLUSÕES

- Um modelo para simular o funcionamento de uma câmara de combustão de gases provenientes da carbonização de madeira foi apresentado e validado. O modelo se mostrou eficaz na previsão do comportamento da queima, resultando em valores coerentes com os resultados experimentais.
- A distribuição gama da taxa de massa, verificada durante o processo de carbonização, deve ser mais bem investigada, pois caso se confirme, simulações transientes mais elaboradas poderão ser desenvolvidas, inserindo uma função geradora de números aleatórios (segundo a distribuição gama) nas simulações, assim, resultados mais próximos da realidade poderão ser alcançados.
- A análise térmica e fluidodinâmica da câmara simulada permite afirmar que ainda é possível melhorar o desempenho do sistema, pois em algumas situações foi verificado que a combustão se estendeu por toda a chaminé, o que resultou na liberando monóxido de carbono nestes casos.
- Trabalhos futuros, utilizando esse modelo poderão ser desenvolvidos, para projetar ou analisar câmaras de combustão, buscando mais eficiência em parâmetros importantes como, por exemplo, aumentar a temperatura no interior da câmara para fins de aproveitamento energético com mínima emissão de monóxido de carbono e metano.

3.5 LITERATURA CITADA

- [1] Associação Brasileira De Produtores De Florestas Plantadas - ABRAF. Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2011. Brasília : s.n., 2012. p. 145.
- [2] FUJIHARA, MA, GOULART, LC and MOURA, G. Cultivated Biomass for Pig Iron in Brazil. In: Silveira S, editor. Bioenergy – Realizing the Potential. 2005, pp. 189-199.
- [3] Empresa De Pesquisa Energética – EPE. Balanço Energético Nacional 2011: Ano Base 2010. Rio de Janeiro : s.n., 2011. p. 266, Disponível em: <<http://www.ben.epe.gov.br>>.
- [4] GOMES, G. M. F.; ENCARNAÇÃO, F. The environmental impact on air quality and exposure to carbon monoxide from charcoal production in southern Brazil. Environmental Research, 2012, Vol. 116, pp. 136-139.
- [5] SINGH, V. K.; PATEL, D. K.; RAM, S.; MATHUR, N.; BEHARI, J. R. Blood levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in children of Lucknow, India. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, Vol. 54, pp. 348-354.
- [6] MINETTE, L. J.; PIMENTA, A.S.; FARIA, M.M.; SOUZA, A.P.; SILVIA, E.P.; FIEDLER, N.C. Avaliação da carga de trabalho físico e análise biomecânica de trabalhadores da carbonização em fornos tipo “rabo-quente”. Revista Árvore. 2007, Vol. 31, pp. 853-858.
- [7] MALISKA, C.R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. 2a. Rio de Janeiro : LTC, 2003. p. 453.
- [8] CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELOS, D. C. “Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes”. Revista Cerne. 2010, Vol. 16, pp. 115-124.
- [9] OLIVEIRA, A. C.; Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2012.
- [10] GONZÁLEZ, J. F.; ENCINAR, J. M.; CANITO, J. L.; SABIO, E.; CHACÓN, M. Pyrolysis of cherry stones: energy uses of the different fractions and kinetic study. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2003, Vol. 67, pp. 165-190.
- [11] GONZALES, A.; PENEDO, M.; MAURIS, E.; FERNÁNDEZ-BERRIDI, M. J.; IUSTRA, L.; IRUIN, J. Pyrolysis analysis of different Cuban natural fibres by TGA and GC/FTIR. Biomass and Bioenergy. 2010, Vol. 34, pp. 1573-1577.
- [12] BRIDGWATER, A. V.; PEACOCKE, G. V. C. Fast pyrolysis processes for biomass. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2000, 4, pp. 1-73.
- [13] JAOJARUEK, K.; KUMAR, S. Numerical simulation of pyrolysis zone in a downdraft gasification process. Bioresource Technology. 2009, 100, pp. 6052-6058.

- [14] YAMAN, S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion and Management*. 2004, 45, pp. 651-671.
- [15] DI BLASI, C. Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2009, Vol. 35, pp. 121-140.
- [16] 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.
- [17] PITTSCH, H.; PETERS, N. A Consistent Flamelet Formulation for Non-Premixed Combustion Considering Differential Diffusion Effects. *Combustion and Flame*. 1998, 114, pp. 26-40.
- [18] POISSON, T.; VEYNANT, D. *Theoretical and Numerical Combustion*. Nova York : McGraw-Hill, 2001.
- [19] LAW, C. K. *Combustion Physics*. Cambridge university press, 2006. p. 347.
- [20] WEN, XIAOPING; YU, MINGGAO; LIU, ZHICHAO; SUN, WENCE. Large Edge Simulation of Methane-air deflagration in an obstructed chamber using different combustion models. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2012, 25, pp. 730-738.
- [21] POPE, S. B. Pdf methods for turbulent reactive flows. *Progress Energy Combustion Science*. 1985, 11, p. 119.
- [22] GERARDIN, J.; SEILER, N.; RUYER, P.; TROVALET, L.; BOULET, P. P1 approximation, MDA and IDA for the simulation of radiative transfer in a 3D geometry for an absorbing scattering medium. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2012, 13, pp. 140-149.
- [23] FERZIGER J.H.; E M. PERIC. *Computational methods for fluid dynamics*. 3rd. Berlin : Springer, 2002. p. 423.
- [23] YANG, YONGXIANG, REUTER, MARKUS A.; HARTMAN, DERK T. M. CFD Modelling for control of hazardous waste incinerator. *Control Engineering Practice*. 2003, 11, pp. 93-101.
- [24] COSTA, M., DELL'ISOLA, M.; MASSAROTTI, N. Temperature and residence time of the combustion products in a waste-to-energy plant. *Fuel*. 2012, 102, pp. 92-105.
- [25] LIN, HAI; MA, XIAOQIAN. Simulation of co-incineration of a sewage sludge with municipal solid waste in a grate furnace incinerator. *Waste Management*. 2012, 32, pp. 561-567.

4. ARTIGO IV: UTILIZAÇÃO DE METAMODELO PARA OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO DE UMA CÂMARA DE COMBUSTÃO DE GASAS PROVENIENTES DO PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA

Resumo: A queima dos gases provenientes do processo de carbonização é uma solução simples para a redução das emissões de poluentes e gases de efeito estufa. Além de ter grande potencial de aproveitamento energético, transformando o calor liberado pela combustão em outra forma de energia ou usando o calor na secagem da madeira a ser carbonizada. Entretanto não havia uma metodologia clara para o dimensionamento de câmaras de combustão. Portanto, este trabalho foi feito objetivando-se determinar uma metodologia para tal dimensionamento. Para tanto, foi utilizado o delineamento composto central rotacional (DCCR) para determinar pontos a serem simulados. De posse desses pontos, o método de Kriging foi usado para determinar as superfícies de resposta que explicassem o comportamento da concentração de monóxido de carbono (CO), temperatura e número de Reynolds no interior da câmara em função da razão de aspecto (RA) e razão entre o diâmetro da área da admissão de ar e diâmetro da câmara (d/D). Como o objetivo era minimizar as emissões de CO, maximizar a temperatura e garantir a turbulência. Um algoritmo genético multi-objetivo foi utilizado e, de acordo

com os pesos atribuídos a cada variável de decisão, uma solução Pareto-ótima foi selecionada. A partir dessas informações foi possível determinar equações e relações para o dimensionamento de câmaras de combustão cilíndricas para gases advindos do processo de carbonização.

Palavras-chave: Metodologia de dimensionamento, Gases de carbonização, Método de Kriging, MOGA.

Abstract: The combustion of gases originated from the carbonization process is a simple solution to reduce the emission of pollutant gases and greenhouse gases. In addition to having a great potential for energetic uses, transforming the generated combustion heat into another form of energy or using the heat in the drying of the wood to be carbonized. However, there was no clear methodology to design combustion chambers. Therefore, this study was conducted to establish a design methodology. For this purpose, we used the central composite rotatable design (CCRD) to determine points to be simulated. Of these points, the Kriging method was used to determine the response surfaces that could explain the behavior of concentration of carbon monoxide (CO), temperature and Reynolds number inside the chamber according to the aspect ratio (RA) and the ratio between the diameter of the air intake area and the diameter of the chamber (d/D). Because the objective was to minimize CO emissions, maximize the temperature and ensure turbulence, we used a multi-objective genetic algorithm, and according to the weights attributed to each decision variable, an optimal solution was selected from the Pareto frontier. Based on these pieces of information it was possible to determine equations and ratios for the sizing of cylindrical combustion chambers from gases originated from the carbonization process.

Key words: Design methodology, Carbonization gases, Metamodel, MOGA.

4.1 INTRODUÇÃO

A utilização do carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira traz consigo grandes benefícios e tem ainda um grande potencial social, econômico e ambiental [1-14]. Entretanto, os benefícios ambientais passaram a ser questionados pelas emissões de metano e outros poluentes durante o processo de produção do carvão vegetal. Assim, pesquisadores de diferentes áreas têm buscado formas de reduzir as emissões de poluentes, principalmente, por meio da queima dos gases produzidos na carbonização utilizando câmaras de combustão [15].

Cardoso et al. [16] avaliou o desempenho de uma câmara de queima acoplada a um forno, provando o potencial da queima dos gases na redução das emissões de gases poluentes e particulados. Entretanto, a câmara proposta dificulta o aproveitamento da energia liberada na combustão, além de exigir muitas variáveis de controle, tais como regulagem de vazão dos gases combustíveis e controle de oito entradas de ar. Além disso, para grandes vazões, a câmara funciona como um grande pré-misturador e a queima só ocorria, efetivamente, na chaminé.

Nos últimos anos, os avanços da capacidade de cálculo dos computadores aliada ao surgimento de códigos comerciais de CFD (Dinâmica dos fluidos computacional) para simulação de processos térmicos e fluidodinâmicos de sistemas tem permitido o desenvolvimento e estudo de produtos e processos de maneira rápida e precisa. Aliada a esse desenvolvimento, as ferramentas estatísticas e heurísticas para determinação de pontos ótimos auxiliam ainda mais a rápida solução de problemas.

Entretanto, ferramentas estatísticas, em alguns casos, podem demandar um grande número de pontos experimentais, aumentando o custo computacional e inviabilizando a conciliação da técnica CFD e das ferramentas estatísticas. A solução para resolver esse problema foi a criação de técnicas de otimização aproximada [17] que significa o modelo de um modelo denominado metamodelo.

Muitas técnicas estatísticas podem ser utilizadas para a construção de metamodelos, tais como: modelo de superfície de resposta [18], modelo de Kriging [17], redes neurais [19], dentre outros [20]. Dentre outros métodos reportados na literatura, o mais difundido é o modelo de superfície de resposta.

Existem muitos estudos de combustão em câmaras, especificamente estudos de câmaras em turbinas, microturbinas e incineradores de resíduos [21-25]. Em um estudo elaborado em [26], uma câmara de combustão com obstáculos internos foi simulada com o objetivo de avaliar a deflagração da chama de metano em ambientes confinados.

Entretanto, o desenvolvimento de câmaras de incineração para a queima de gases advindos de processos de pirólise de biomassa, como a carbonização, baseado nas equações de Navier-Stokes médias de Reynolds (RANS), acopladas a modelos de combustão têm sido pouco estudados. [27]

Este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar parâmetros e elaborar uma metodologia de projeto para câmaras de combustão que maximize a temperatura e minimize a concentração de monóxido de carbono (principal componente dos gases combustíveis) no interior da câmara, utilizando um metamodelo baseado em CFD. Otimizando a razão de aspecto (RA), a razão entre diâmetro da admissão de ar e diâmetro total da câmara de combustão e o número de Reynolds no interior da câmara de combustão.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Modelo Matemático

Um esquema do sistema é mostrado na Figura 1, que consiste de uma câmara de combustão cilíndrica com uma única entrada de ar na base e uma única entrada de combustível acoplado a um forno de carbonização com volume de 10 m³.

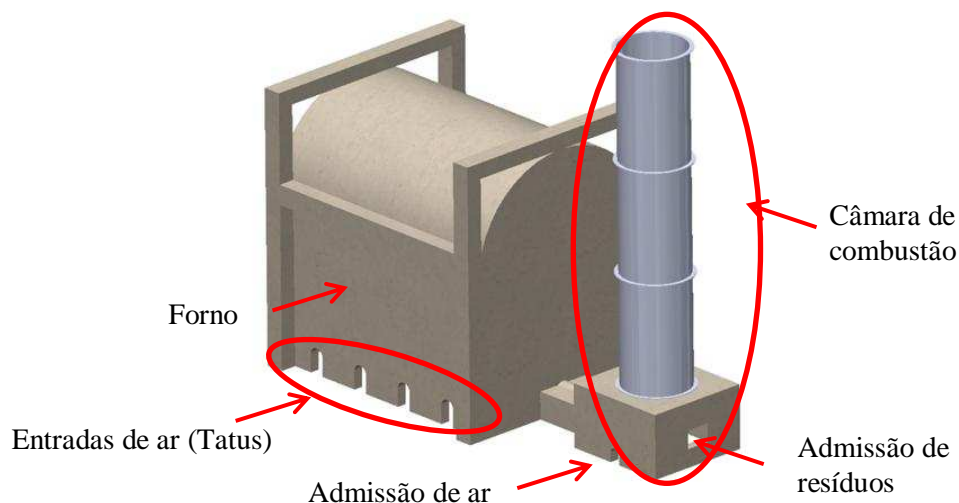
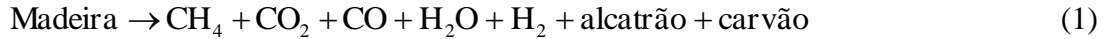


Figura 1 – Esquema do sistema acoplado ao forno

Ressalta-se que foi simulado somente o sistema de queima de gases da carbonização (Figura 1).

O processo de carbonização da madeira, ou pirólise, é um processo complexo em que são formados inúmeros compostos, tais como alcanos, alquenos, metano, monóxido

e dióxido de carbono, dentre outros [28-32]. Neste trabalho, como hipótese simplificadora, considerou-se que na carbonização ocorre a seguinte reação global:



Muitos modelos de aplicação prática consideram a Equação 1 [33]. O alcatrão, mesmo quando efetuada a queima dos produtos da pirólise deixa o sistema na forma gasosa, na verdade, pode-se dizer que o alcatrão apresenta duas frações: uma inerte e outra reativa [34]. Porém, neste trabalho a fração reativa de alcatrão é desconsiderada.

As equações de Navier-Stokes médias de Reynolds (RANS) considerando a decomposição de Favre e o modelo k-ε de turbulência são:

Equação da continuidade:

$$\frac{D(\bar{\rho}\tilde{\mathbf{v}})}{Dt} = 0 \quad (2)$$

Equação da quantidade de movimento

$$\frac{D(\bar{\rho}\tilde{\mathbf{v}})}{Dt} = -\nabla\bar{p} + \nabla\bar{\mathbf{P}} - \nabla \cdot (\bar{\rho}\overline{\mathbf{v}'\mathbf{v}'}) + \dot{\mathbf{S}}_M \quad (3)$$

Equação da energia

$$\frac{D(\bar{\rho}\tilde{\mathbf{E}})}{Dt} = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{Pr_t} \nabla\tilde{\mathbf{H}} \right) + \bar{\mathbf{P}} : (\nabla\mathbf{v}) + \dot{\mathbf{S}}_E \quad (4)$$

O símbolo ":" representa um produto contraído duas vezes.

Tensor de Tensão (\mathbf{P}):

$$\mathbf{P} = \left[p + \left(\frac{2}{3} \mu \right) (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right] \mathbf{I} - \mu [(\nabla\mathbf{v}) + (\nabla\mathbf{v})^T] \quad (5)$$

Tensor de Reynolds ($\overline{\rho\mathbf{v}'\mathbf{v}'}$):

$$\overline{\rho \mathbf{v}'' \mathbf{v}''} = \mu_t \left(\nabla \tilde{\mathbf{v}} + \nabla \tilde{\mathbf{v}}^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{\mathbf{v}}) \mathbf{I} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} \tilde{k} \mathbf{I} \quad (6)$$

em que μ_t é a viscosidade turbulenta, calculada por:

$$\mu_t = c_\mu \bar{\rho} \frac{\tilde{k}^2}{\tilde{\varepsilon}}, \quad c_\mu = 0,09 \quad (7)$$

O modelo k- ε foi usado para estimar os efeitos da turbulência:

$$\frac{D(\bar{\rho} \tilde{k})}{Dt} = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{Pr_k} \nabla \tilde{k} \right) - \bar{\rho} \overline{\mathbf{v}'' \mathbf{v}''} : (\nabla \mathbf{v}) - \bar{\rho} \tilde{\varepsilon} \quad (8)$$

$$\frac{D(\bar{\rho} \tilde{\varepsilon})}{Dt} = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{Pr_\varepsilon} \nabla \tilde{\varepsilon} \right) - c_{\varepsilon 1} \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}} \bar{\rho} \overline{\mathbf{v}'' \mathbf{v}''} : (\nabla \mathbf{v}) - (c_{\varepsilon 3} \chi_v - c_{\varepsilon 2}) \bar{\rho} \frac{\tilde{\varepsilon}^2}{\tilde{k}} \quad (9)$$

Em que χ_v é dado por:

$$\chi_v = \frac{1}{4} \left(\frac{\tilde{k}}{\tilde{\varepsilon}} \right)^3 \left(\frac{\partial \tilde{v}_1}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{v}_2}{\partial x} \right)^2 \frac{\tilde{v}_2}{r} \quad (10)$$

A entalpia (H) por ser calculada por:

$$\tilde{H} = \frac{\bar{p}}{\bar{\rho}} + \tilde{\psi} \quad (11)$$

a energia total (E) é então definida como:

$$\tilde{E} = \frac{\bar{p}}{\bar{\rho}} + \tilde{\psi} + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{v}}^2 \quad (12)$$

A entalpia de formação da mistura gasosa é calculada como:

$$\tilde{\psi} = \sum_{i=1}^N \tilde{Y}_i h_{i,\text{ref}} \quad (13)$$

A lei dos gases ideais fecha o sistema de equações (Equações 14 e 15).

$$\bar{p} = \bar{\rho} \tilde{g} \tilde{T} \quad (14)$$

em que:

$$\tilde{g} = R \sum_i^N \frac{\tilde{Y}_i}{W_i} \quad (15)$$

Para avaliar os efeitos de diluição e pré-mistura parcial, a fração de mistura Z deve ser considerada. Os valores de Z variam de 0 (oxidante puro) a 1 (combustível puro). A premissa básica desse modelo é que o número de Lewis seja igual a 1. A difusividade térmica e a difusividade mássica dificilmente são iguais, porém para que as equações 14 e 15 sejam válidas essa consideração é necessária [27-29]. Outro modelo muito utilizado em CFD é o Eddy Dissipation Model (EDM). Porém, o modelo EDM não prevê corretamente distorções, ondulações e reconexões na forma da chama [30], e pode superestimar a temperatura [28]. A equação para o cálculo da média de Z é mostrada na Equação 16. A equação da variância de Z (Equação 17) foi usada para considerar os efeitos da turbulência na distribuição na fração de mistura.

$$\frac{D(\bar{\rho} \tilde{Z})}{dt} = \nabla \cdot \left(\left(\frac{\mu_t}{Sc_{tZ}} \right) \nabla \tilde{Z} \right) \quad (16)$$

$$\frac{D(\bar{\rho} \tilde{Z}'^2)}{dt} = \nabla \cdot \left(\left(\frac{\mu_t}{Sc_{t\tilde{Z}'^2}} \right) \nabla \tilde{Z}'^2 \right) + 2 \frac{\mu_t}{Sc_{\tilde{Z}'^2}} (\nabla \tilde{Z})^2 - \bar{\rho} \tilde{\chi} \quad (17)$$

em que

$$\tilde{\chi} = C_\chi \frac{\tilde{\varepsilon}}{k} \tilde{Z}'^2 \quad (18)$$

em que:

$$C_\chi = 2,0$$

A composição média do fluido é calculada em função da média da fração de mistura, da variância da fração de mistura e da taxa de dissipação, que é obtida de tabelas de modelos flamelet:

$$\tilde{Y}_i = \int_0^1 Y_i(Z, \tilde{\chi}) P_{\tilde{Z}, \tilde{Z}''^2}(Z) dZ \quad (19)$$

A integração da função densidade de probabilidade (PDF) de P não é feita durante a resolução das equações anteriores, mas durante a geração da tabela flamelet [31].

A distribuição de probabilidade para P foi do tipo beta, embora outros tipos de distribuição possam ser utilizados [29].

$$P_{\tilde{Z}, \tilde{Z}''^2}(Z) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} Z^{\alpha-1} (1-Z)^{\beta-1} \quad (20)$$

em que:

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt \quad (21)$$

$$\alpha = \tilde{Z} \left(\frac{Z(1-\tilde{Z})}{\tilde{Z}''^2} - 1 \right), \quad \beta = (1-\tilde{Z}) \left(\frac{Z(1-\tilde{Z})}{\tilde{Z}''^2} - 1 \right) \quad (22)$$

Um esquema da câmara de combustão modelada é mostrado na Figura 2. Nos estudos realizados nessa pesquisa, a razão de aspecto (RA) da câmara testada variou entre 7 e 10. A escolha dessa faixa de variação se deu, pois em uma câmara de combustão piloto, que apresentava uma RA de 7,66 houve momentos em que a chama se estendeu para fora dos limites da câmara de combustão, por outro lado, uma RA maior que 10 tornaria o processo de construção financeiramente dispendioso e difícil.

A razão entre o diâmetro da área de admissão de ar e o diâmetro da torre variou entre 0,1 e 0,3.

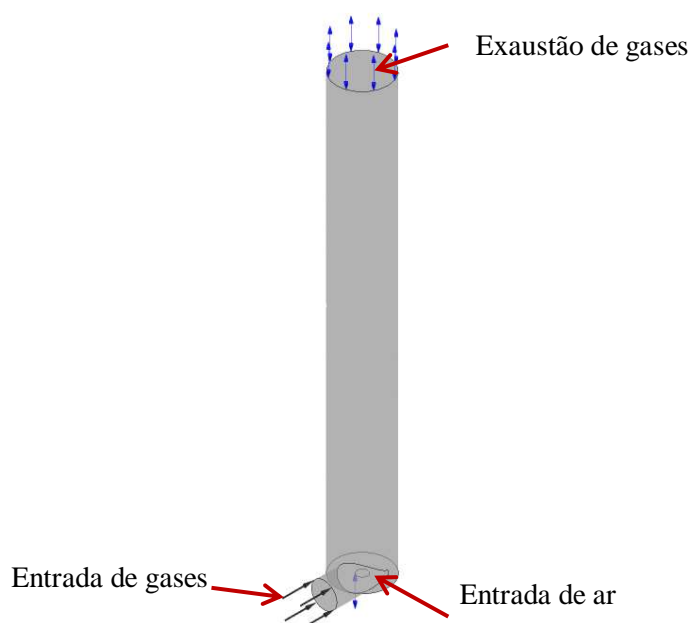


Figura 2– Esquema da câmara de combustão de gases modelada

As paredes da câmara foram consideradas adiabáticas e a condição de não deslizamento foi considerada. Experimentos realizados previamente mostraram que a taxa mássica média do gás combustível, nos períodos onde a composição do gás era mais rica (maior poder calorífico) foi de $0,04228 \text{ kg s}^{-1}$ ($Re \approx 6500$). A composição do gás combustível utilizada nas simulações é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do combustível.

Componente	CO	CO₂	CH₄	H₂	N₂
%	12	17	4	4	63

Na admissão de combustível, considerou-se que uma taxa de massa do gás combustível de $0,04228 \text{ kg s}^{-1}$, além disso, a fração de mistura assumia valor unitário (combustível puro) e temperatura de $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Na admissão de ar, foi considerada a pressão relativa igual a zero, considerou-se, ainda, que o ar era admitido com fração de mistura nula (oxidante puro) a uma temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Na exaustão de gases considerou-se a pressão relativa igual a zero. O modelo de radiação utilizado foi o P1 [38].

A discretização do domínio de soluções foi feita com o uso do programa computacional ANSYS ICEM ® e as equações discretizadas foram resolvidas pelo programa computacional ANSYS CFX ® que é baseado no método de volumes finitos [32]. Este método resolve os balanços de massa, quantidade de movimento, energia e balanço de espécies para cada volume.

4.2.3 Formulação para a otimização

4.2.3.1 Delineamento do experimento (DOE)

Para avaliar a influência da razão de aspecto (AR), do número de Reynolds na admissão de combustível (Re) e da razão entre diâmetro da abertura na admissão de ar e diâmetro da torre (d/D) foi utilizado o delineamento composto central rotacional (CCRD) [40] e os resultados foram avaliados por meio da metodologia da superfície de resposta.

O CCDR é uma metodologia usada para distribuir pontos experimentais em todo o conjunto de soluções, maximizando a capacidade de análise como mínimo número de unidades experimentais que seriam necessárias em um delineamento fatorial completo [19,40].

4.2.3.2 Método de Kriging

O método de Kriging é baseado na interpolação de dados. A grande vantagem é que este modelo é independente do erro aleatório e se adequa bem a dados obtidos por simulações computacionais, por fornecer uma interpolação exata dos dados [41]. Além disso, esse método não depende da ordem da função aproximada, como acontece com o método tradicional de superfície de resposta, em que pontos ótimos só podem ser determinados em funções de segunda ordem ou superiores.

O modelo é baseado na Equação 18 e é, de fato, uma combinação de um modelo de regressão linear e suas saídas.

$$y(x) = f(x) + z(x) \quad (18)$$

em que $y(x)$ é uma função de interesse, desconhecida, em função da variável de design x ; $f(x)$ é uma função polinomial conhecida em função de x e $z(x)$ é a realização de um

processo estocástico com distribuição normal padronizada, média zero, variância σ^2 e covariância diferente de zero [42-44]. Detalhes sobre a metodologia podem ser encontrados em [17].

4.2.3.2 Algoritmo genético para otimização multi-objetivo (MOGA)

Problemas que contenham dois ou mais objetivos conflitantes entre si são muito comuns em muitas situações em projetos de engenharia. Esses problemas são chamados de problemas de otimização Multi-objetivo, ou multi-critério.

Nesses casos o conceito de ótimo deve ser revisto, pois dificilmente o nível ótimo de um parâmetro coincide com o nível ótimo dos demais. Assim, em problemas multi-objetivo não se busca uma única solução ótima, mas um conjunto de soluções que balanceie prejuízos e ganhos de maneira igualitária entre todas as funções objetivo. Esse conjunto de soluções, que apresentam perdas e ganhos iguais, (ou não dominadas) é chamado de fronteira de Pareto.

Algoritmos evolucionários multi-objetivo (MOEA) são muito usados devido sua flexibilidade e adaptabilidade [45-47]. Os algoritmos genéticos são algoritmos meta-heurísticos baseados no conceito do mecanismo natural de evolução de populações. A Figura 3 ilustra o processo de um algoritmo genético que, de acordo com Park et. al [46], apresenta 4 passos principais: **Início**, no qual a população inicial e o tamanho da população são configurados; **Seleção**, método usado para melhorar o ajustamento da selecionando cromossomos dominantes na prole; **Reprodução**, na qual novos indivíduos são formados por crossover ou mutação e, o **Fim** que é determinado pelo número de gerações ou pela qualidade das soluções (indivíduos) aperfeiçoadas. No trabalho publicado em [48] pode ser encontrada uma excelente revisão de conceitos e formalidades estatístico/matemáticas sobre a fronteira de Pareto e algoritmos genéticos aplicados em problemas multi-objetivo (MOGA).

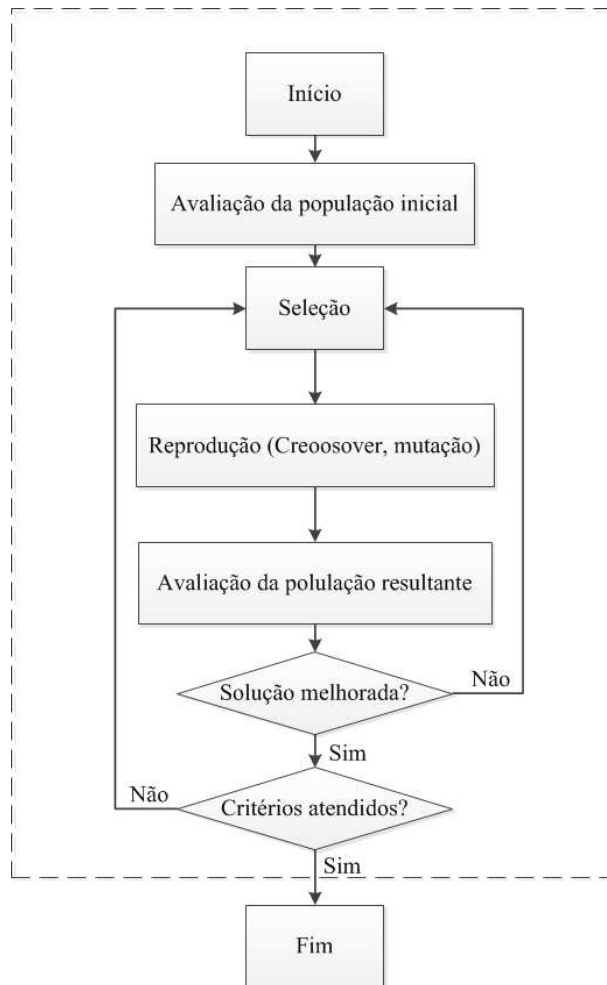


Figura 3 – Processo de funcionamento do algoritmo genético

O ANSYS Workbench 14 ® possui uma implementação algoritmo genético elitista conhecido NSGA-II (Elitist Non dominated Sorted Genetic Algorithm). Ele é baseado nos conceitos de elitismo controlado e apenas problemas com variáveis contínuas podem ser resolvidos.

O esquema de posicionamento de Pareto é feito por um método de classificação não dominado, mais rápido que os métodos tradicionais de classificação. As restrições, assim como os objetivos, usam os mesmos princípios de não-dominância, deste modo, funções de penalidades e multiplicadores de Lagrange não são necessários, demandando menos cálculos e, conseqüentemente, menos tempo.

4.2.3.3 Otimização

Este trabalho trata-se de um problema multi-objetivo. No qual se deseja minimizar a fração média de CO na saída, que significa oxidá-lo quase totalmente no interior da câmara de combustão e maximizar a temperatura no interior da câmara de combustão. Busca-se, portanto, encontrar os valores ótimos para a Razão de Aspecto (RA), a razão entre os diâmetros da admissão de ar e da câmara de combustão (d/D). Além disso,

procura-se também determinar o melhor número de Reynolds no interior da câmara (Re_D). Assim, será possível determinar o diâmetro para a câmara de combustão em função do número de Re_D .

O delineamento do experimento, a geração da superfície de resposta e a otimização foram feitas no Módulo Goal driven optimization que faz parte do programa computacional ANSYS Workbench 14®.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Resultados das simulações

As razões de aspecto testadas variaram entre 7 e 10, porém, não é desejável que a chama se estenda por toda a câmara. De fato, é desejável que parte da câmara seja utilizada para a queima e parte para a exaustão dos gases. Assim, podem-se definir duas zonas na câmara: zona de queima e zona de exaustão.

O valores de (RA), d/D e Re foram obtidos por meio da CFD e do método de kriging. Primeiramente, foram definidos os limites superiores e inferiores de cada variável de design. Após a definição desses limites, o DOE foi gerado e a técnica CFD foi utilizada para gerar as respostas. O método de Kriging foi, então, usado para gerar as superfícies de resposta. O DOE, com suas respostas, é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – DOE e respostas obtidas

Ponto	RA	d/D	[CO]*	T*	Re
1	8,500	0,200	0,069	0,391	30401,0
2	7,000	0,200	0,076	0,486	27979,7
3	7,750	0,200	0,060	0,444	29320,1
4	10,00	0,200	0,063	0,367	32233,8
5	9,250	0,200	0,042	0,391	31395,6
6	8,500	0,100	1,000	1,000	9650,25
7	8,500	0,150	0,230	0,697	17361,5
8	8,500	0,300	0,000	0,000	60247,2
9	8,500	0,250	0,009	0,161	44638,3

A qualidade do ajustamento do método de Kriging pode ser observada na Figura 4. Pontos de verificação, calculados por CFD, foram inseridos o que mostra que o meta-modelo reproduz satisfatoriamente os resultados obtidos pelo modelo em CFD.

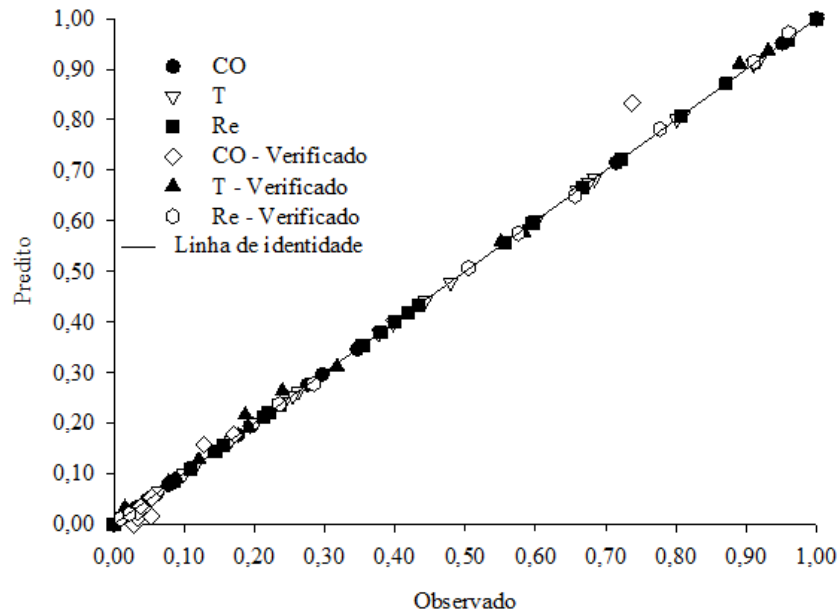


Figura 4 – Qualidade do ajustamento e pontos de verificação (calculados por CFD)

Nas Figuras 5, 6 e 7 são mostradas as análises de sensibilidade. O eixo das abscissas é adimensional e os extremos correspondem aos valores mínimos (0) e máximos (1) das variáveis de projeto. Nota-se que a razão de aspecto não afeta a concentração de monóxido de carbono na zona de queima. Além de causar pouca influência na temperatura e o número de Reynolds. Este fato pode ser explicado pelo formato cilíndrico da câmara, pois não há aumento na velocidade do escoamento pelo efeito da redução da área normal à passagem do gás. A variação da velocidade está totalmente ligada aos efeitos de flutuação ou empuxo.

A razão entre diâmetros (d/D) exerce muita influência em todas as variáveis analisadas. A redução da área de admissão de ar reduz a quantidade de ar no interior da torre. É importante salientar que a entrada de ar ocorre devido ao empuxo no interior da torre que gera uma baixa pressão de sucção. A redução da área de admissão de ar aumenta a resistência ao escoamento, reduzindo a vazão de ar, com isso, menos monóxido de carbono é oxidado e sua concentração aumenta, entretanto, razões entre diâmetro maiores que 0,2 não reduzem significativamente a concentração de CO (Figura 5).

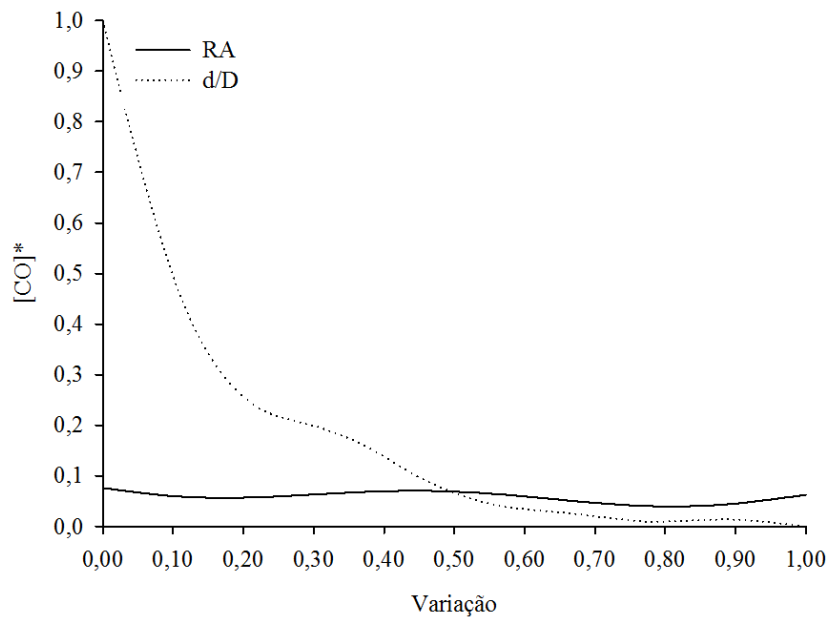


Figura 5 – Análise de sensibilidade para a concentração média adimensional de CO na câmara de combustão

As maiores temperaturas foram verificadas quando a área de admissão de ar foi reduzida, nesses casos, parte do combustível foi oxidada e não houve excesso de ar capaz de absorver parte da energia térmica gerada. Por outro lado, verifica-se que quando a área de admissão de ar aumenta, aumenta-se também o excesso de ar, diluindo o combustível e absorvendo parte da energia liberada na combustão (Figura 6).

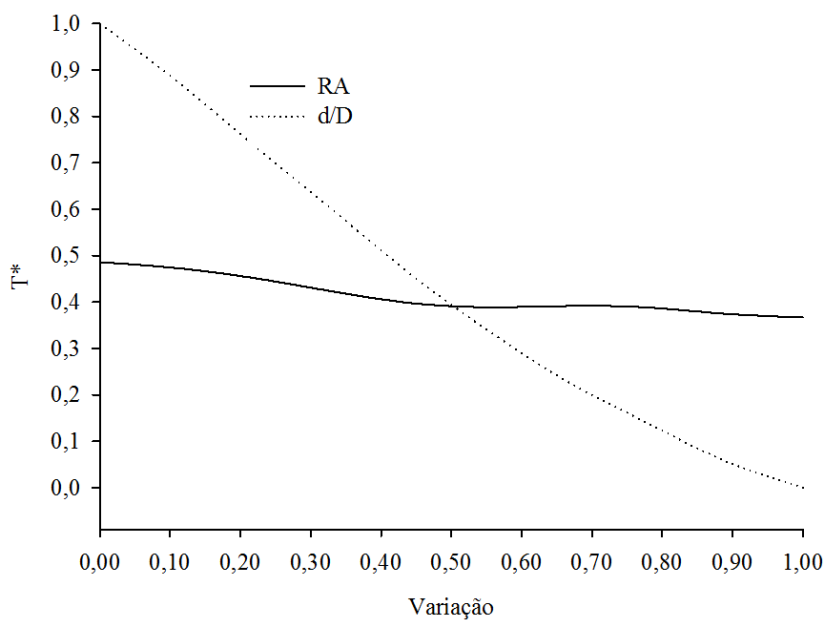


Figura 6 – Análise de sensibilidade para a temperatura média adimensional na câmara de combustão

O número de Reynolds foi fortemente influenciado pela razão (d/D) (Figura 7). Esse fenômeno é explicado pela redução da temperatura na câmara, que eleva levemente a massa específica e a viscosidade dinâmica da mistura gasosa. A análise das 6 e 7 conjuntamente com a Tabela 2 revela que não é interessante, na otimização, buscar maximizar o número de Reynolds da câmara, pois a maximização deste, invariavelmente acarretaria na redução de temperatura.

Tendo em vista o comportamento das variáveis: temperatura (T), Reynolds (Re_D) e concentração de monóxido de carbono, frente aos parâmetros de projeto, o objetivo passou a ser encontrar pontos que satisfizessem as restrições envolvidas.

Nas Figuras 8 e 9 mostram-se as fronteiras de Pareto, em que os valores observados são aqueles em que não há dominância entre os pontos, ou seja, são todos pontos ótimos no sentido de Pareto. Os pontos atrás da fronteira são factíveis, porém dominados por isso não são mostrados.

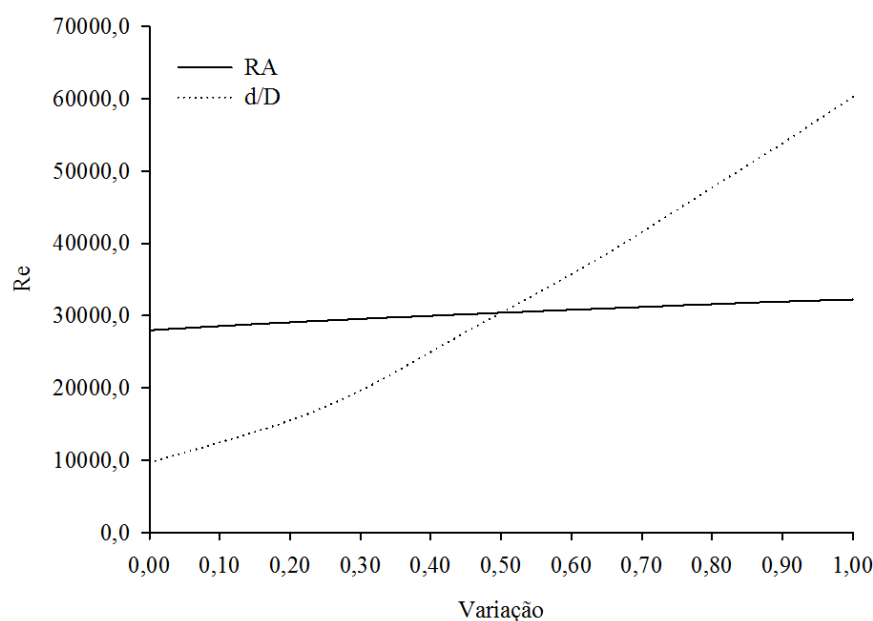


Figura 7 – Análise de sensibilidade para o número de Reynolds na câmara de combustão

4.3.2 Otimização

A configuração do MOGA foi a seguinte:

- Número inicial da população = 100;
- Número indivíduos criados por iteração = 100;
- Taxa de mutação = 1%;
- Taxa de crossover = 98%;
- Número máximo de iterações = 20.

Buscou-se minimizar a fração de CO e maximizar a temperatura e garantir um número de Reynolds (Re_D) turbulento. Entretanto, os objetivos mais importantes foram minimizar a fração de CO e maximizar a temperatura, uma vez que a motivação deste trabalho advém das demandas do setor produtivo de carvão vegetal que visam reduzir as emissões de poluentes e gases de efeito estufa e aproveitar a energia gerada no processo.

Três soluções candidatas foram encontradas e classificadas de acordo com a prioridade atribuída as variáveis de resposta. A classificação é mostrada na Tabela 3. A candidata A foi escolhida, pois foi muito superior as outras em termos de temperatura.

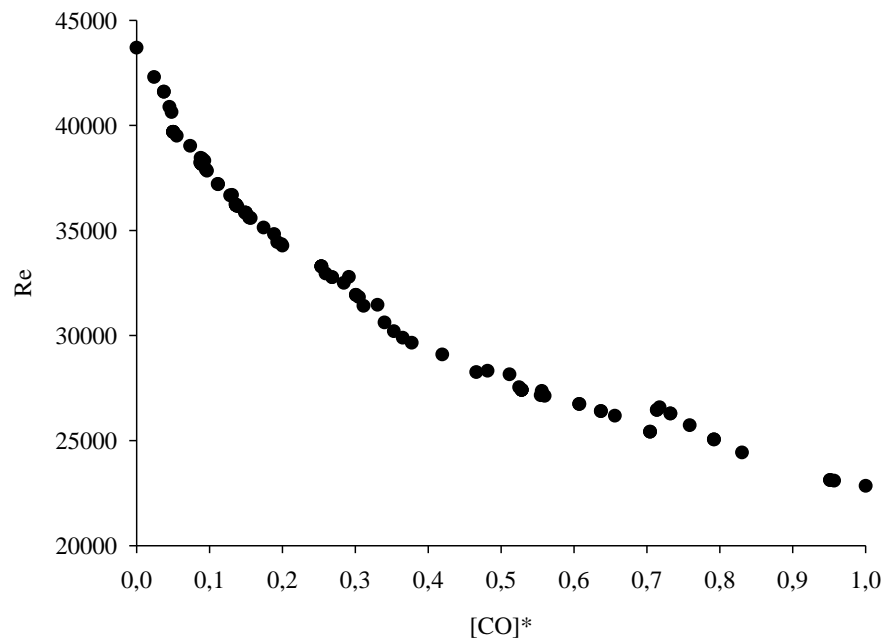


Figura 8 – Fronteira de Pareto [CO]* em função do Re

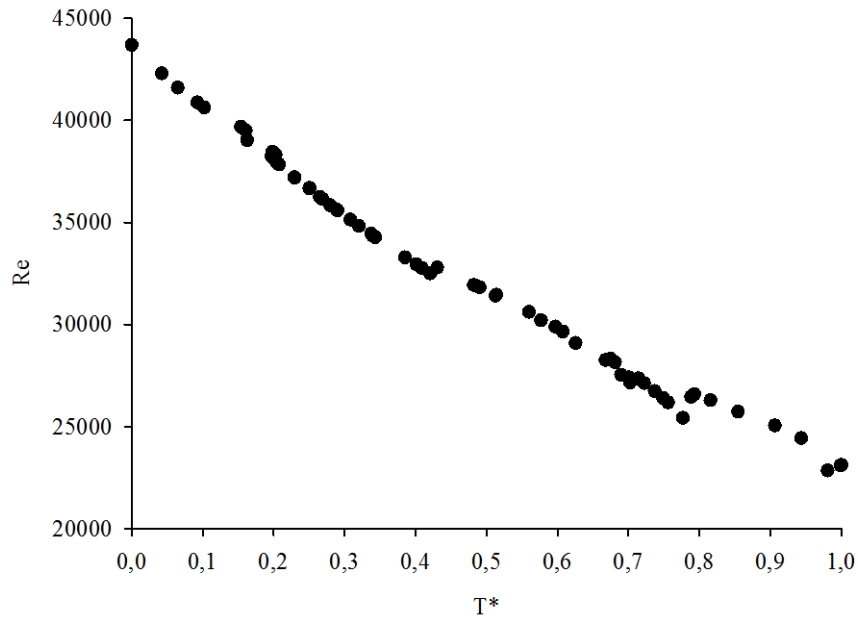


Figura 9 – Fronteira de Pareto T* em função do Re

Tabela 3 – Candidatas a soluções “ótimas” e respectivas verificações em CFD.

Nome	RA	d/D	[CO]*	T*	Re _D
Candidata A	8,1175	0,16091	0,2044	0,622	19581
Verificação A			0,1691	0,621	20355
Candidata B	7,5427	0,20042	0,0563	0,458	29089
Verificação B			0,0590	0,452	28932
Candidata C	7,3522	0,20501	0,0452	0,445	29891
Verificação C			0,0941	0,446	29717

4.3.3 Metodologia para o dimensionamento da câmara de incineração

A partir dos parâmetros da candidata A foi possível determinar uma relação entre Re_d e Re_D , e a partir de tais relações, estabelecer uma metodologia de projeto de câmara de combustão otimizado. Para $Re_{d'} = 6500$, pode-se considerar a seguinte relação:

$$Re_{d'} = 0,319 Re_D \quad (20)$$

ou ainda:

$$\left(\frac{\rho_d \bar{u}}{\mu_d} \right)_{d'} = 0,319 \left(\frac{\rho_c \bar{v}}{\mu_c} \right)_D \quad (21)$$

$$d' = 0,319 \left[\left(\frac{v_d}{v_c} \right) \left(\frac{\bar{v}}{\bar{u}} \right) \right] D \quad (22)$$

No ponto ótimo:

$$\left(\frac{\bar{v}}{\bar{u}}\right) = 2 \text{ e } \left(\frac{v_d}{v_c}\right) = 0,78, \text{ assim, tem-se que:}$$

$$d' = 0,5D \quad (23)$$

O diâmetro do duto (d') é, então, calculado por:

$$d' = \frac{1,9588 \times 10^{-4}}{\mu_d} \dot{m} \quad (24)$$

A taxa de massa média dos gases no duto pode ser medida ou estimada de maneira simples, considerando o tempo efetivo de carbonização, a massa enforada e o rendimento do forno. Valores abaixo da média são toleráveis, pois, com o uso de uma válvula pode-se aumentar a velocidade do escoamento e, conseqüentemente, o número de Reynolds.

Para uma situação em que a taxa média de combustível foi $0,03356 \text{ kg s}^{-1} \pm 0,00905$ (Figura 10), recomenda-se que no dimensionamento, o desvio médio seja adicionado à média por causa das variações inerentes ao processo. Deste modo, a câmara será capaz de suportar tais variações. Assim, para uma viscosidade dinâmica de $1,7 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$ (considerando uma mistura de $0,12\text{CO} + 0,17\text{CO}_2 + 0,04\text{CH}_4 + 0,04\text{H}_2 + 0,63\text{N}_2$) a uma temperatura de 200°C , usando as equações 23 e 24 temos:

$$d' = 0,43 \text{ m e } D = 0,86 \text{ m}$$

$$\frac{H}{D} = 8,1175 \Rightarrow H = 6,98; \quad \frac{d}{D} = 0,16091 \Rightarrow d = 0,14$$

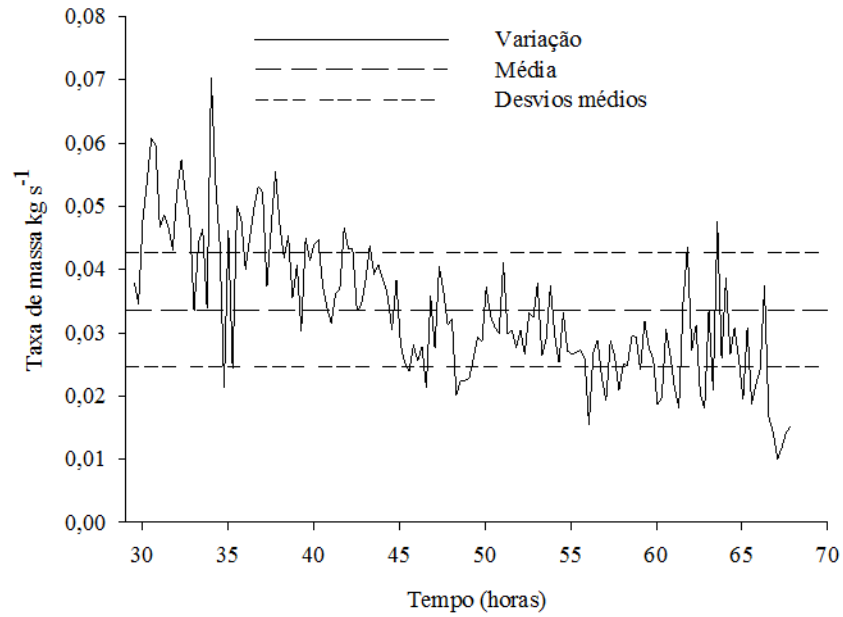


Figura 10 – Variação da taxa de massa em um experimento.

Os resultados para uma taxa de massa média de 0,03356 e para uma taxa elevada de 0,07 kg s⁻¹ (a mais alta verificada experimentalmente) são mostrados nas Figuras 11 e 12, respectivamente. Taxas abaixo de 0,07 kg s⁻¹ apresentaram oxidação completa do monóxido de carbono.

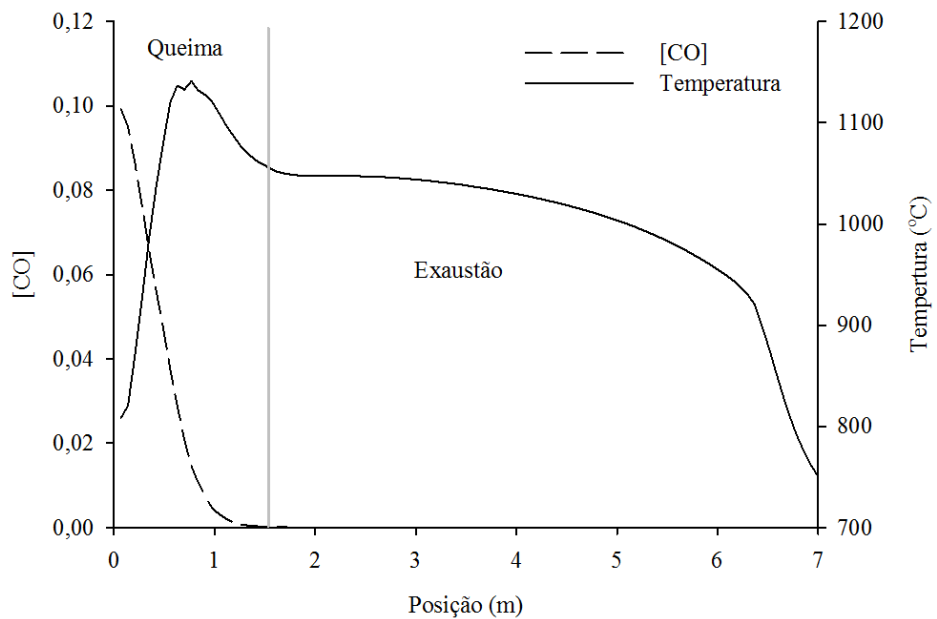


Figura 11 – Resultados obtidos a partir do projeto baseado nas Equações 20 a 24 e taxa de massa de 0,03356 kg s⁻¹

O tempo de residência do combustível na zona de queima foi calculado com base no tempo em que as linhas de corrente permaneceram na zona de queima e variou entre 2,48 e 3 s, ou seja, superior aos 2 segundos recomendados para câmaras de incineração de resíduos perigosos (cuja queima pode liberar organoclorados, ácidos etc.) [23].

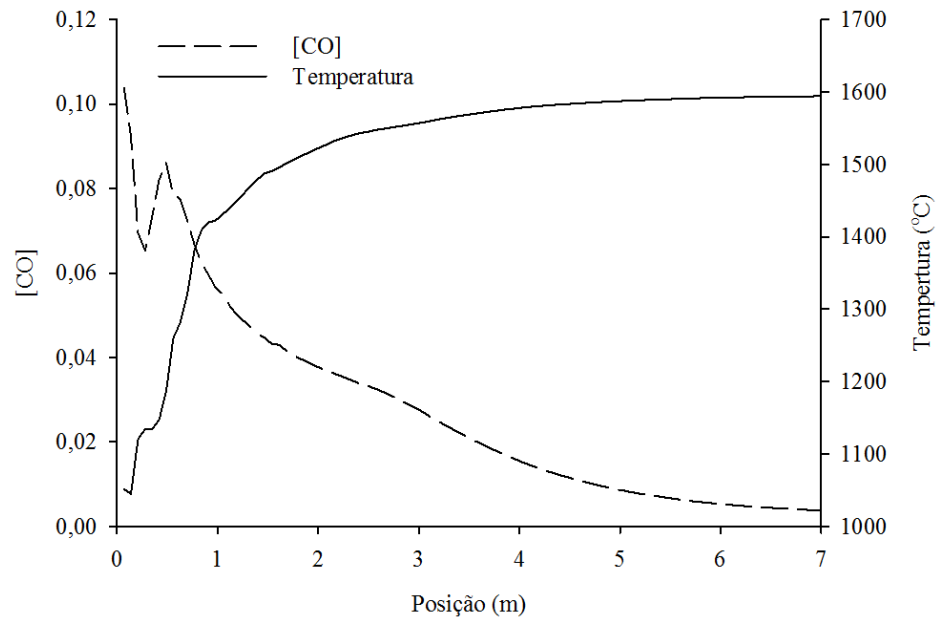


Figura 12 - Resultados obtidos a partir do projeto baseado nas Equações 20 a 24 e taxa de massa de $0,07 \text{ kg s}^{-1}$

A análise da Figura 12 permite dizer que a câmara de combustão, mesmo dimensionada para um número de Reynolds específico, na verdade se comporta adequadamente para uma longa faixa de Reynolds. Como os picos de taxa de massa são pontuais, é possível dizer que a câmara funcionará adequadamente.

4.4 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo determinar parâmetros para o projeto de câmaras de combustão cilíndricas para a queima de gases advindos do processo de carbonização. Neste sentido:

- Um metamodelo baseado no método de kriging foi utilizado para gerar inferências mais rápidas às alterações de parâmetros de projeto no comportamento das variáveis de interesse, tornando possível estabelecer funções objetivo a serem maximizadas, minimizadas ou atingirem certos níveis de interesse.
- O método de otimização multi-objetivo foi utilizado para encontrar um conjunto de soluções Pareto ótimas e, a partir de um conjunto de critérios baseados em experimentos anteriores, selecionar três candidatas Pareto ótimas.
- A melhor candidata foi escolhida e seus parâmetros serviram de base para a formulação de equações para o projeto de câmaras de combustão para gases de carbonização.
- As equações foram desenvolvidas para um número de Reynolds no duto de admissão de gás combustível de 6500, porém são válidas para valores uma faixa de Re_d de 4647 a 24860.
- Foi verificado que o sistema de queima proposto é adequado para operar nesta faixa de Re_d , demonstrando que a câmara consegue queimar com eficiência uma ampla faixa de valores de taxa de massa.

4.5 LITERATURA CITADA

- [1] **FUJIHARA, M. A.; GOULART, L. C.; MOURA, G.** Cultivated Biomass for Pig Iron in Brazil. In: Silveira S, editor. Bioenergy – Realizing the Potential. 2005, pp. 189-199.
- [2] **PALÁEZ-SANTIAGO, M. R.; GARCIA-PEREZ, M.; CORTEZ, L. B.; ROSILLO-CALLE, F.; MESA, J.**Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2008, Vol. 12, pp. 1063-1086.
- [3] **BAER FILHO, R.** Aspectos econômicos, ambientais e técnicos de três tecnologias para produção de carvão vegetal. s.l. : Monografia. Universidade Federal de Viçosa, 2008.
- [4] **REZENDE, J. B.; SANTOS, A. C.** A cadeia produtiva do carvão vegetal em Minas Gerais: pontos críticos e potencialidades. Viçosa, MG : U.R. EPAMIG ZM, 2010. p. 80.
- [5] **VALE, AT e GENTIL, LV.** Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: Oliveira JTS, Fiedler NC, Nogueira M. Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro. 2008, Vol. III, pp. 196-246.
- [6] **HALL, J.; MATOS, S.; SILVESTRE, B.; MARTIN, M.** Managing technological and social uncertainties of innovation: The evolution of Brazilian energy and agriculture. Technological Forecasting and Social Change. 2011, 78, pp. 1147-1157.
- [7] **PIKETTY, M-G.; WICHERT, M.; FALLOT, A.; AIMOLA, L.** Assessing land availability to produce biomass for energy: The case of Brazilian charcoal for steel making. Biomass and Bioenergy. 2009, 33, pp. 180-190.
- [8] **BANDYOPADHYAY, S., SHYAMSUNDAR, P.; BACCINI, A.** Forest, biomass use and poverty in Malawi. Ecological Economics, 2011, Vol. 70, pp. 2461-2471.
- [9] **JOAQUIM, M. S.** Carvão Vegetal: uma alternativa para os produtores rurais do sudoeste goiano. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 2009.
- [10] **FOWLES, M.** Black carbon sequestration as na alternative to bioenergy. Biomass and Bioenergy. 2007, Vol. 31, pp. 426-432.
- [11] **BARROW, C. J.** Biochar: Potential for countering land degradation and for improving agriculture. Applied Geography. May de 2012, Vol. 34, pp. 21-28.
- [12] **KHUNDI, F.; JAGGER, P.; SHIVELY, G.; SERUNKUUMA, D.** Income, poverty and charcoal production in Uganda. Forest Policy and Economics, 2011, Vol. 13, pp. 199-205.
- [13] **OPENSHAW, K.** Biomass energy: Employment generation and its contribution to poverty alleviation. 2010, Biomass and Bioenergy. Vol. 34, pp. 365-378.

- [14] **MCHENRY, M. P.** Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk. *Agriculture, Ecosystem and Environment*. 2009, Vol. 129, pp. 1-7.
- [15] **OLIVEIRA, A. C.** Sistema forno-fornalha para a produção de carvão vegetal: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2012.
- [16] **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. *Revista Cerne*. 2010, Vol. 16, pp. 115-124.
- [17] **PARK, KYOUNGWO, OH, PARK-KYOUNG; LIM, HYO-JAK.** The application of the CDF model and Kriging method to an optimization of a heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006, 49, pp. 3339-3447.
- [18] **BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.** *Statistics for Experimenters*. Nova York: John Wiley & Sons, 1978.
- [19] **DESHPANDE, SEGAR. S.; MAHESH, T. DHOTRE.; GUENTAY, SALIH.** CFD simulation of internal air lift reactors: Design optimization. *Chemical Engineering Science*. 2011, doi: 10.1016/j.ces.2011.01.050.
- [20] **QUEIPO, N. V.; HAFTKA, R. T.; SHYY, W.; GOEL, T.; VAIDYANATHAN, R.; KELVIN, T. P.** Surrogate-based analysis and optimization. *Progress in Aerospace Sciences*. 2005, 41, pp. 1-28.
- [21] **ORBAY, R. C.; NOGENMRY, K. J.; KLINGMANN, J.; BAI, X. S.** Swirling turbulent flows in a combustion chamber with and without heat release. *Fuel*. 2013, 104, pp. 133-146.
- [22] **BULAT, G.; JONES, W. P.; MARQUIS, A. J.** Large Edge Simulation of an industrial gas-turbine combustion chamber using sub-grid PDF method. *Proceedings of the combustion institute*. 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2012.07.031>.
- [23] **LIN, HAI; MA, XIAOQIAN.** Simulation of co-incineration of a sewage sludge with municipal solid waste in a grate furnace incinerator. *Waste Management*. 2012, 32, pp. 561-567.
- [24] **YANG, YONGXIANG, REUTER, MARKUS A.; HARTMAN, DERK T. M.** CFD Modelling for control of hazardous waste incinerator. *Control Engineering Practice*. 2003, 11, pp. 93-101.
- [25] **COSTA, M., DELL'ISOLA, M.; MASSAROTTI, N.** Temperature and residence time of the combustion products in a waste-to-energy plant. *Fuel*. 2012, 102, pp. 92-105.
- [26] **WEN, XIAOPING; YU, MINGGAO; LIU, ZHICHAO; SUN, WENCE.** Large Edge Simulation of Methane-air deflagration in an obstructed chamber using different

combustion models. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2012, 25, pp. 730-738.

[27]**PITSCH, H.; PETERS, N.** A Consistent Flamelet Formulation for Non-Premixed Combustion Considering Differential Diffusion Effects. *Combustion and Flame*. 1998, 114, pp. 26-40.

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

[29] **GONZALES, A.; PENEDO, M.; MAURIS, E.; FERNÁNDEZ-BERRIDI, M. J.; IUSTRA, L.; IRUIN, J.** Pyrolysis analysis of different Cuban natural fibres by TGA and GC/FTIR. *Biomass and Bioenergy*, 2010, Vol. 34, pp. 1573-1577.

[30]**BRIDGWATER, A. V.; PEACOCKE, G. V. C.** Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2000, 4, pp. 1-73.

[31]**JAOJARUEK, K.; KUMAR, S.** Numerical simulation of pyrolysis zone in a downdraft gasification process. *Bioresour Technol*. 2009, 100, pp. 6052-6058.

[32]**YAMAN, S.** Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion and Management*. 2004, 45, pp. 651-671.

[33]**DI BLASI, C.** Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2009, Vol. 35, pp. 121-140.

[34]**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.

[35]**POISSON, T.; VEYNANT, D.** Theoretical and Numerical Combustion. Nova York : McGraw-Hill, 2001.

[36]**LAW, C. K.** Combustion Physics. s.l. : Cambridge university press, 2006. p. 347.

[37]**POPE, S. B.** Pdf methods for turbulent reactive flows. *Progress Energy Combustion Science*. 1985, 11, p. 119.

[38]**GERARDIN, J.; SEILER, N.; RUYER, P.; TROVALET, L.; BOULET, P.** P1 approximation, MDA and IDA for the simulation of radiative transfer in a 3D geometry for an absorbing scattering medium. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2012, 13, pp. 140-149.

[39]**MALISKA, C.R.** Transferencia de calor e mecânica dos fluidos computacional. 2a. Rio de Janeiro : LTC, 2003. p. 453.

[40]**MONTGOMERY, D. C.** Design and analysis of experiments. 5th. New York : Wiley, 2001. p. 699.

- [41]**JIN, R.; CHEN, W.; SIMPSON, T. W.**Comparative Studies of Metamodeling Techniques Under Multiple Modeling Criteria.Proceedings of the 8th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Multidisciplinary Analysis & Optimization Symposium.Long Beach, 2000., AIAA 2000-4801.
- [42]**LOPHAVEN, S. N., NIELSEN, H. B. e SONDERGAARD, J.**DACE: a matlab kriging tollbox. Informatics and Mathematical Modelling. Technical University od Denmark, 2002. p. 28. (Technical Report, IMM-TR-2002-12).
- [43]**CRESSIE, N. A. C.**Statistics for Spatial Data, Revised. New York : John Wiley & Sons, 1993.
- [44]**SIMPSON, T.W., MAUERY, T.M., KORTE, J.J., MISTREE, F.**Comparison of Response Surface and Kriging Models for Multidisciplinary Design Optimization. 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis & Optimization. St. Louis, 1993. Vol. 1, pp. 381-391. AIAA-98-4755, September 2-4.
- [45] **HOU, TUNG-HSU e HU, WEI-CHUNG.**An integrated MOGA approach to determine the Pareto-optimal kaban number and size for a JIT system. Expert Systems with Applications. 2011, 28, pp. 5912-5918.
- [46]**PARK, CHEONG HOON.; JOO, JIN GUL.; KIN, JOONG HOON.** Integrated washland optimization model for flood mitigation using multi-objective genetic Algorithm. Joiurnal of Hydro-environment Research. 2012, 6, pp. 119-126.
- [47]**PARK, KYOUNGWOO.;JUHEE, LEE.** Optimal design of two-dimensional wings in ground effect using multi-objective genetic algorithm. Ocean Engineering. 2010, 37, pp. 902-912.
- [48]**AUGUSTO, O. B.; RABEAU, S.; DÉPINCÉ, PH.; BENNIS, F.** Multi-objective genetic Algorithms: A way to improve the convergence rate. Engineering Applications of Artificial Inteligence. 2006, 19, pp. 501-510.

5. CONCLUSÕES GERAIS

- A estrutura metálica da chaminé revestida com manta cerâmica se mostrou bastante adequada, pois atendeu às condições do processo de combustão, sem problemas em sua estrutura. A estrutura metálica modulada tem como vantagem principal a possibilidade de ser montada e desmontada com facilidade, e deslocada para outra praça de carbonização.
- A baixa inércia térmica da manta cerâmica faz com que ocorram variações abruptas de temperatura demandando uma quantidade considerável de combustível auxiliar para manter a base aquecida. Logo, o uso de tijolos refratários para a construção da base é uma alternativa mais adequada.
- A câmara de combustão funcionou adequadamente como queimador de gases, promovendo a queima dos gases durante 32 % do tempo total de carbonização. No entanto houve interrupção da chama devido a variação de vazão dos gases.
- O gasto de combustível auxiliar para abastecimento da câmara de combustão na fase de baixa vazão de gases foi considerada pequena.
- Houve redução da concentração de metano e monóxido de carbono emitidos durante a carbonização com queima dos gases.
- A queima dos gases não afetou o rendimento e a qualidade do carvão vegetal.
- As temperaturas médias medidas durante o funcionamento da câmara de combustão evidenciam o grande potencial energético que pode ser aproveitado.
- Outros estudos para verificar as dimensões corretas, bem como as melhores características construtivas do sistema de combustão devem ser conduzidos para melhorar o controle da carbonização e aproveitamento da energia gerada no processo.
- Um modelo para simular o funcionamento de uma câmara de combustão de gases provenientes da carbonização de madeira foi apresentado e validado. O modelo se mostrou eficaz na previsão do comportamento da queima, resultando em valores coerentes com os resultados experimentais.
- A distribuição gama da taxa de massa, verificada durante o processo de carbonização, deve ser mais bem investigada, pois caso se confirme, simulações transientes mais elaboradas poderão ser desenvolvidas, inserindo uma função geradora de números aleatórios (segundo a distribuição gama) nas simulações, assim, resultados mais próximos da realidade poderão ser alcançados.

- A análise térmica e fluidodinâmica da câmara simulada permite afirmar que ainda é possível melhorar o desempenho do sistema, pois em algumas situações foi verificado que a combustão se estendeu por toda a chaminé, o que resultou na liberando monóxido de carbono nestes casos.
- Trabalhos futuros, utilizando esse modelo poderão ser desenvolvidos, para projetar ou analisar câmaras de combustão, buscando mais eficiência em parâmetros importantes como, por exemplo, aumentar a temperatura no interior da câmara para fins de aproveitamento energético com mínima emissão de monóxido de carbono e metano.
- Um metamodelo baseado no método de kriging foi utilizado para gerar inferências mais rápidas às alterações de parâmetros de projeto no comportamento das variáveis de interesse, tornando possível estabelecer funções objetivo a serem maximizadas, minimizadas ou atingirem certos níveis de interesse.
- O método de otimização multi-objetivo foi utilizado para encontrar um conjunto de soluções Pareto ótimas e, a partir de um conjunto de critérios baseados em experimentos anteriores, selecionar três candidatas Pareto ótimas.
- A melhor candidata foi escolhida e seus parâmetros serviram de base para a formulação de equações para o projeto de câmaras de combustão para gases de carbonização.
- As equações foram desenvolvidas para um número de Reynolds no duto de admissão de gás combustível de 6500, porém são válidas para valores uma faixa de Re_d de 4647 a 24860.
- Foi verificado que o sistema de queima proposto é adequado para operar nesta faixa de Re_d , demonstrando que a câmara consegue queimar com eficiência uma ampla faixa de valores de taxa de massa.