



ANÁLISE EXPERIMENTAL DA QUEIMA COMBINADA DE CARVÃO MINERAL E BIOMASSA EM LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE

Mateus de Campos Scarsi¹

Flavio Michels Bianchi²

Pedro Rodrigo Silva Moura³

George Clarke Bleyer⁴

Raiane da Cruz⁵

Reginaldo Rosso Marcello⁶

Resumo: No presente trabalho foram realizados ensaios de queima combinada de carvão mineral e biomassa em um combustor de leito fluidizado borbulhante. O objetivo principal foi analisar as emissões de gases provenientes da combustão, variando o percentual de biomassa na mistura com o carvão mineral além de avaliar a eficiência de operação deste processo. Por oferecer um percentual praticamente nulo de enxofre, altos índices de matéria volátil e poder calorífico, neste caso, maior quando comparada com o carvão mineral, a biomassa proporciona controles mais consentâneos em desfecho da prática operacional. Um fator importante durante os testes foi a escala e administração do excesso de ar, operando nos percentuais de 60, 80, 100 e 120 % para cada amostra. Nota-se que a amostra contendo 10 % de biomassa se mostrou mais conveniente para desempenho da combustão em virtude das temperaturas geradas ao longo do processo quando confrontadas com as demais amostras, embora aplicando variações consideráveis nos excessos de ar. Foram deparados também bons resultados nas concentrações de gases poluentes quando incorporada a biomassa nas misturas para combustão, encontrando reduções na faixa de 10 a 28 % de dióxido de enxofre (SO₂). Outros agentes que indicaram eficácia no processo foram as concentrações de monóxido, dióxido de carbono e o percentual de incombusto das cinzas.

Palavras-chave: Queima combinada. Carvão Mineral. Biomassa. Leito fluidizado. Combustão.

¹ Graduando em Engenharia Mecânica, UniSATC. E-mail: mateus.scarsi@hotmail.com

² Prof UniSATC. E-mail: flavio.bianchi@satc.edu.br

³ Eng. Mecânico. E-mail: pedro.moura@satc.edu.br

⁴ Eng. Mecânico. E-mail: george.bleyer@satc.edu.br

⁵ Eng.^a Química. E-mail: raiane.cruz@satc.edu.br

⁶ Eng. Mecânico. E-mail: Reginaldo.marcello@satc.edu.br



1 INTRODUÇÃO

No cenário mundial é visto a contínua busca por fontes renováveis e tecnologias de aproveitamento para geração de energia. Em âmbito nacional, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (2017), as fontes renováveis já lideram a matriz de geração de energia elétrica com 82,2 % de participação. Estudar tecnologias que contribuam para a melhor proficuidade das fontes renováveis é fundamental para minimizar os impactos socioambientais causados pela queima de combustíveis fósseis, devido principalmente as emissões de gases poluentes.

Assegurando a importância disso, tecnologias de combustão destinadas a combustíveis sólidos são desenvolvidas para minoração de impurezas poluentes ao ambiente. Para Jakobsen (2008), pode-se destacar como um dos principais métodos para comedir a emissão de alguns poluentes, as tecnologias de queima utilizando leito fluidizado. Essas tecnologias permitem relevantes reduções nos percentuais de formação de óxidos de enxofre (SO_x) e de nitrogênio (NO_x).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (2017), a queima de combustíveis fósseis em indústrias e termelétricas causa graves impactos em face da emissão de material particulado e de gases poluentes. Podem ser destacados como gases poluentes o dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e o monóxido de carbono, pois os mesmos são prejudiciais à saúde humana, responsáveis pela formação da chamada chuva ácida e contribuição para o aquecimento global, tendo como consequência a mudança na biodiversidade em escala global.

Foi constatado que o Brasil em 2017 emitiu aproximadamente 2 bilhões de toneladas de gases equivalentes ao dióxido de carbono, o que representou um aumento de 1,2 % em relação a 2016 e 2 % de todas as emissões gasosas do mundo que auxiliam o efeito estufa. O facilitador para esses percentuais teve como causa principal o aumento da participação das fontes não renováveis (ELETRO N., 2018).

Frente a isso, nota-se uma escassez de estudos relevantes e referentes às inteligências aplicadas, que oferecem a possibilidade de aproveitar os combustíveis com menor impacto ambiental em relação a equipamentos convencionais. Devido à sua alta flexibilidade para utilização de múltiplos combustíveis, a queima em leito fluidizado borbulhante apresenta-se como importante ponto a ser avaliado. A operação pode ser com combustíveis fósseis, como o carvão, assim como biomassas e demais resíduos orgânicos.

Portanto, o estudo de tecnologias que atuem na redução de impurezas e trabalhem com combustão eficiente podem proporcionar maiores aproveitamentos de alguns combustíveis quando em queimas combinadas, por exemplo, o carvão mineral e a biomassa. Dada tal importância, é necessário o entendimento dessa coqueima em função das características físicas e químicas dos combustíveis.

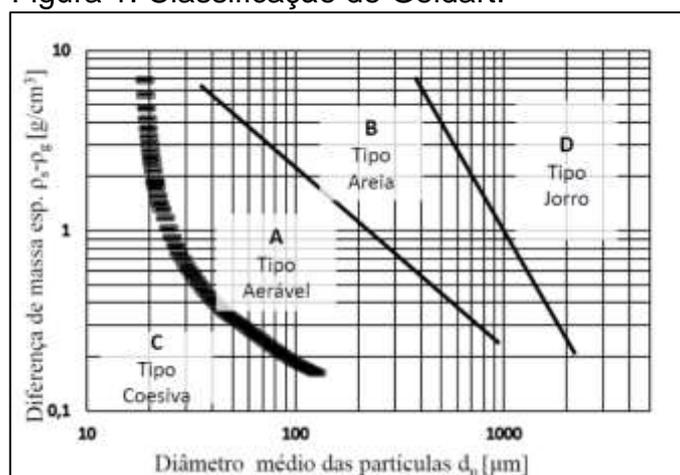
Pelas razões apresentadas, este trabalho tem por objetivo analisar experimentalmente a queima combinada de carvão mineral e biomassa (serragem de madeira de pinus) em um combustor de leito fluidizado borbulhante, analisando as características da combustão e as emissões atmosféricas de gases provenientes da mesma.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CLASSIFICAÇÃO PARA SÓLIDOS PARTICULADOS

Analisando o comportamento da fluidização dos sólidos, baseado na diferença entre as massas específicas do fluido e o respectivo sólido, como também o diâmetro médio das partículas, Geldart (1973) estabeleceu os critérios de classificação, como podem ser observados na Fig. 1.

Figura 1: Classificação de Geldart.

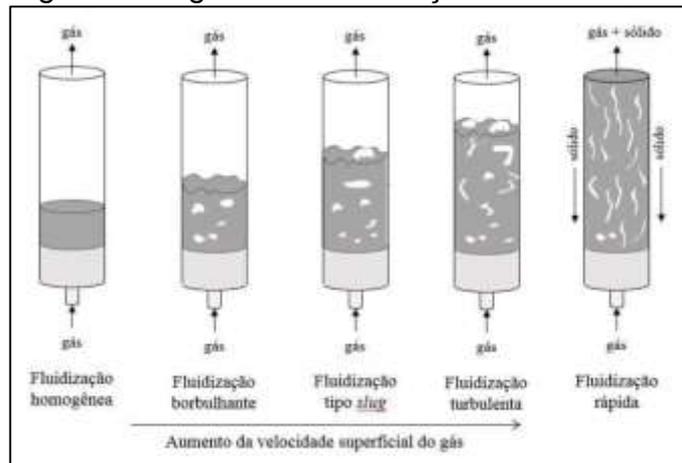


Fonte: GELDART (1973)

Quando submetidas ao processo de fluidização, as partículas dos diferentes grupos se comportam de formas distintas umas das outras (GELDART, 1973). Partículas do tipo B (areia) são típicas em processos de combustão.

De acordo com Kunii e Levenspiel (1991), quando partículas sólidas são suspensas por um gás ou líquido, transformando-as num estado com aspecto de fluido, ocorre o fenômeno chamado de fluidização. Conforme a Fig. 2, as condições de fluidização podem se dividir em 5 tipos, sendo eles: homogênea, regime borbulhante, tipo slug, turbulenta e fluidização rápida. Dependendo das características do fluido, do sólido e do equipamento, os regimes podem variar (CREMASCO, 2012).

Figura 2: Regimes de fluidização.



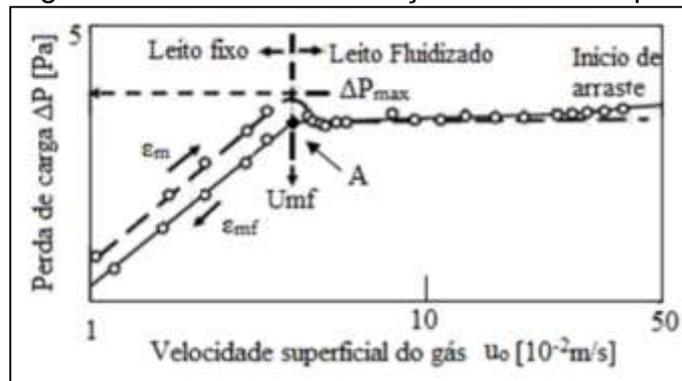
Fonte: CREMASCO (2012)

Nesta análise, adota-se a fluidização em regime borbulhante, pois com o aumento da velocidade, a perda de pressão é reduzida e inicia a formação de bolhas, causando grande agitação e intensificando a mistura para combustão.

2.2 VELOCIDADE TEÓRICA DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO

Kunii e Levenspiel (1991) determinaram que a velocidade de mínima fluidização poderia ser encontrada observando o comportamento gráfico na Fig. 3, através da velocidade superficial do gás e a perda de carga causada no leito.

Figura 3: Curvas de fluidização de material particulado.



Fonte: KUNII e LEVENSPIEL (1991)

Por intermédio dos dados experimentais neste trabalho, é determinada a velocidade mínima de fluidização a partir desse método.

2.3 COMBUSTOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE

Pode-se dividir um sistema de leito fluidizado em três principais partes, sendo elas: o distribuidor de ar, o leito das partículas e a zona localizada acima do leito chamada *freeboard*. Kunii e Levenspiel (1991) descrevem o distribuidor como um componente importante para que o ar tenha uma ação homogênea sob o leito. O mesmo promove e influencia os padrões para circulação dos sólidos. O leito de partículas é composto por sólidos normalmente inertes, que constituem a maior parte do leito, sendo a outra parte partículas combustíveis, cinzas e, em alguns casos, os absorventes (JAKOBSEN, 2008). Já o *freeboard* é o local que permite a separação de gás e partículas carregadas que deixaram o leito. Ocorre também no *freeboard*, a combustão dos voláteis (BASU, 2006).

A fim de garantir melhor troca térmica durante a queima e por já ter aplicações em escala industrial, principalmente em caldeiras a vapor, Basu (2006) coloca que deve ser controlada a temperatura entre 800 a 900 °C.

2.4 PROCESSO DE COMBUSTÃO

Para que ocorra a combustão completa, é necessário fornecer oxigênio suficiente para atender à demanda de combustível. Através da Eq. 1 e Eq. 2 propostas



por Turns (2013), pode-se encontrar a razão ar-combustível estequiométrica para as misturas e determinar se as mesmas são ricas, pobres ou balanceadas.

$$\overline{AF}_{esteq} = \left(\frac{m_a}{m_f} \right)_{esteq} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\overline{AF}_{esteq}}{\overline{AF}} \quad (2)$$

Sabe-se que, em aplicações práticas, a mistura de ar e combustível normalmente não é exata, sendo fundamental determinar o excesso de ar, ou seja, um percentual acima do valor estequiométrico calculado (BASU, 2006). A quantidade de excesso de ar é imprescindível, já que a mesma interfere diretamente na eficiência de combustão. Conforme determina Turns (2013), utiliza-se a Eq. 3 para encontrar o excesso de ar considerando o valor da razão de equivalência.

$$\% \text{ excesso de ar} = \frac{1-\phi}{\phi} \cdot 100 \% \quad (3)$$

2.5 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

Conforme Garcia (2013), durante a combustão, possíveis poluentes se formam, como os materiais particulados, os óxidos de enxofre, óxidos de carbono e óxidos de nitrogênio. A quantidade destes dependerá especificamente da sua concentração nos combustíveis, condições físicas do equipamento e operação. Para controle dos poluentes, o Conama (2006) estabelece na resolução 382 de 2006 as emissões máximas. Pode-se observar na Tab. 1 os limites para queima de madeira.

Tabela 1: Limites de poluentes provenientes da queima de derivados da madeira.

Potência Térmica Nominal [MW]	NO _x ⁽¹⁾ (como NO ₂)	Potência Térmica Nominal [MW]	CO ⁽¹⁾
MW < 10	NA ⁽²⁾	MW ≤ 0,05	6.500
10 ≤ MW < 30	650	0,05 < MW ≤ 0,15	3.250
30 ≤ MW < 70	650	0,15 < MW ≤ 1,0	1.700
MW > 70	650	1,0 < MW ≤ 10,0	1.300

¹Os resultados são corrigidos para 8 % de oxigênio em base seca e indicados em unidade de concentração mg/m³.

²Não aplicável

Fonte: CONAMA (2006)

Entretanto, para processos com geração de calor, o Conama (2006) não especifica limites de emissão para a queima de carvão mineral. Faz-se necessário a utilização da Resolução 016/2014 da SEMA do Paraná, que determina os limites máximos de poluentes oriundos da queima de carvão mineral. Observa-se na Tab. 2 os limites para queima de carvão mineral.

Tabela 2: Limites de poluentes provenientes da queima de carvão mineral e combustíveis semelhantes.

Potência Térmica Nominal [MW]	NO _x ⁽¹⁾	CO ⁽¹⁾	SO _x ⁽¹⁾
MW ≤ 10	NA ⁽²⁾	500	NA ⁽²⁾
10 < MW ≤ 50	500	500	3000
50 < MW ≤ 100	500	500	1300
MW > 100	400	250	1300

¹Os resultados são corrigidos para 7 % de oxigênio em base seca e indicados em unidade de concentração mg/m³.

²Não aplicável

Fonte: SEMA (2014)

Darmawan et al. (2017) observou resultados mais positivos de temperatura e concentração de gases em queima combinada de 10 a 25 % de biomassa misturada com carvão de baixo poder calorífico baseado na simulação em forno de queda livre.

2.5.1 Conversão para condições padrões de oxigênio

Os padrões de emissão referem-se às condições de 101.300 Pa a 0 °C em base seca. Portanto, quando definida a condição referencial de oxigênio, utiliza-se a Eq. 4 para converter a concentração do gás medido para os padrões de oxigênio (CONAMA, 2006).

$$C_R = \frac{21 - O_R}{21 - O_M} \cdot C_M \quad (4)$$

2.6 CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS DO LEITO

Na formação do leito no combustor será utilizada areia de fundição empregada na construção de moldes. Para determinar as características do material, é necessário aplicar métodos que identifiquem a massa específica real, aparente, o diâmetro médio das partículas e a porosidade (YANG, 2003).



Conforme a Cremasco (2012), pode definir a massa específica real (ρ_p) através da Eq. 5:

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (5)$$

Para a massa específica aparente (ρ_{ap}), Oka (2004) define como:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ap}}{V_{ap}} \quad (6)$$

Ambas as massas específicas têm relação entre a massa do material seco e seu volume, porém, a diferença entre elas é que a massa específica real despreza os poros permeáveis, enquanto a massa específica aparente considera os poros permeáveis para cálculo.

Referente ao tamanho médio das partículas, o mesmo é definido calculando o diâmetro médio (d_p) de Sauter (PAUDEL e FENG, 2013).

$$d_p = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_i}} \quad (7)$$

A porosidade do leito pode ser encontrada pela relação entre as massas específicas do sólido, sendo elas real e aparente, respectivamente.

Todos os resultados dessas propriedades são base para determinação do grupo na classificação de Geldart e esfericidade das partículas, como também para entender as características de composição do leito.

2.7 COMBUSTÍVEIS EMPREGADOS

Segundo Basu (2006), os leitos fluidizados podem trabalhar com demasiados combustíveis sólidos na forma tipicamente granulada e particular para tal aplicação. Para o presente estudo, os combustíveis utilizados para queima serão: carvão mineral de nome FC PB e serragem de madeira de pinus. Selecionar a faixa de diâmetros médios para os combustíveis é sumamente importante, visto que partículas mais finas tendem a ser arrastadas mais facilmente através do gás de



fluidização (OKA, 2004). Pode-se também observar principalmente o percentual de cinza e enxofre que os combustíveis apresentam e que são fundamentais para a análise do trabalho.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Esta seção tem como propósito apresentar os procedimentos essenciais para execução deste trabalho.

3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA AREIA UTILIZADA NO LEITO

O material particulado empregado na formação do leito é a areia de fundição usada na construção de moldes. A escolha desse material se deu por se tratar de um particulado inerte, com boa regularidade granulométrica, e considerando as características encontradas conforme classificação de Geldart.

Para a caracterização do mesmo, foram realizados os ensaios a fim de descobrir a massa específica real e a aparente, de acordo com a norma ABNT NBR NM 52:2009. Foram também realizados os ensaios de granulometria para a definição do diâmetro médio de Sauter e de fração de vazios para encontrar a porosidade do leito de partículas, pois de acordo com Foust et al. (1982) há uma correlação para determinar a esfericidade das partículas.

Através do ensaio por peneiramento, utilizando a diferença de diâmetro entre peneiras e as concentrações de areia, definiu-se a escala de partículas com diâmetros entre 0,25 mm e 0,35 mm com diâmetro médio de 0,295 mm.

3.2 ENSAIO PARA VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO

Nesta etapa é colocada a areia do leito no equipamento de fluidização a temperatura ambiente para observar seu comportamento quando sujeito a variação da velocidade de insuflamento de ar. O fluxo de ar é controlado de forma gradual, aumentando assim o escoamento até que o leito de partículas apresente o fenômeno de fluidização. Baseando-se no método utilizado por Kunii e Levenspiel (1991), geram-se dados para encontrar, através do gráfico, a velocidade de mínima fluidização.

3.3 CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS

No presente trabalho utilizam-se combustíveis para queima o carvão mineral de nome FC PB e serragem de madeira de pinus. O carvão mineral e a biomassa foram fornecidos pelo Centro Tecnológico SATC (CTSATC). Abaixo na Tab. 3 encontram-se as características também fornecidas pelo CTSATC, após análise em laboratório.

Tabela 3: Características dos combustíveis.

Característica	Serragem Pinus	FC PB
ITEM		
PCS (kcal/kg)	4.670,00	3.828,78
PCI (kcal/kg)	4.345,00	3.301,68
Faixa granulométrica (mm)	0,59 a 2,00	0,60 a 2,00
Umidade Higroscópica (%)	3,54	1,25
BASE SECA		
Carbono (%)	52,44	40,95
Hidrogênio (%)	6,29	2,29
Nitrogênio (%)	0,04	0,83
Oxigênio + Halogênios (%)	41,23	0,69
Enxofre (%)	0,00	2,60
Cinzas (%)	0,00	52,64
BASE ÚMIDA		
Carbono (%)	51,36	40,44
Hidrogênio (%)	6,16	2,26
Nitrogênio (%)	0,04	0,81
Oxigênio + Halogênios (%)	40,38	0,68
Enxofre (%)	0,00	2,57
Cinzas (%)	0,00	51,98

Fonte: do Autor (2019)

% = g/100 g

Observa-se que o respectivo carvão possui um teor alto de cinza, o que indica um sólido com baixa qualidade energética. Em comparação com o carvão, a biomassa oferece um percentual praticamente nulo de cinza e enxofre, porém com valores maiores de umidade e poder calorífico.

3.4 AMOSTRAS PARA QUEIMA

Na Tab. 5 estão identificadas as amostras para os testes a serem realizados. Importante destacar que a escolha dos percentuais para cada combustível,

principalmente para a biomassa, tem influência considerável na operação do alimentador e processo de combustão devido ao fenômeno de arraste das partículas.

Tabela 5: Porcentagem mássica dos combustíveis.

Amostra	Identificação	Carvão (%)	Biomassa (%)	Poder Calorífico (kcal/kg)
1	C100B0	100,0	0,0	3.301,68
2	C95B5	95,0	5,0	3.353,85
3	C90B10	90,0	10,0	3.406,01
4	C85B15	85,0	15,0	3.458,18

Fonte: do Autor (2019)

3.5 OPERAÇÃO EM COMBUSTOR DE LEITO FLUIDIZADO

Pode-se observar na Fig. 4, o combustor de leito fluidizado a nível de bancada que foi utilizado para os testes de queima combinada com carvão mineral e biomassa, como também para a queima simples de carvão mineral.

Figura 4 – Combustor de leito fluidizado



Fonte: do Autor (2019)

O funcionamento do equipamento pode ser descrito pelas seguintes etapas:

I – O ar é fornecido por uma linha de ar comprimido, onde a vazão volumétrica é identificada através de um rotâmetro.

II – Antes de ser injetado na câmara plena, o ar passa por um pré-



aquecedor. Este equipamento aquece o ar ambiente até temperaturas aproximadas de 300 °C por meio de resistências elétricas. Após pré-aquecido, o ar entra na câmara plena para fluidizar o material presente no leito.

III – Os termopares estão predispostos para monitorar as temperaturas na câmara de combustão e demais pontos importantes do reator. O T3 encontra-se dentro do leito de partículas; T4 está posicionado logo acima do leito, na zona de combustão; T5 localiza-se no meio do *freeboard* e T6 na parte superior do combustor.

É possível também visualizar as temperaturas por meio de gráficos do sistema de controle do equipamento.

IV – O combustor é envolto por resistências elétricas para pré-aquecimento do equipamento até temperaturas de 550 °C, fornecendo condição mais acordante para iniciar a queima dos combustíveis.

V – A alimentação é através de uma válvula rotativa aliada a um injetor helicoidal e ajustável conforme calibração para as respectivas frações de carvão e biomassa. O acionamento dessa válvula é por meio de um motor elétrico com frequência variável, que controla o fornecimento de material para dentro da câmara de combustão.

VI – Assim que acontece a combustão, os gases de exaustão são direcionados para o ciclone que realiza a separação das partículas arrastadas pelos gases. Na base do ciclone está posicionado o coletor de cinzas, enquanto que a saída do gás purificado para a atmosfera ocorre na parte superior.

3.5.1 Calibração do Alimentador

A alimentação do combustível na câmara de combustão ocorre por meio de uma válvula rotativa aliada a um injetor helicoidal. Com o aumento gradual da frequência, atinge-se o nível estabelecido para cada amostra. O controle da frequência é realizado pelo inversor disposto no painel elétrico.

Nesta etapa é realizada a calibração do alimentador através de testes com as frações mássicas de carvão singular e mistura com biomassa. Os testes foram realizados operando o alimentador com frequência de 1,0 Hz até 3,7 Hz, subindo a frequência do motor da válvula rotativa em 0,3 Hz.

Como foram calibradas as quatro amostras (conforme Tab. 5) e em triplicatas para cada faixa de frequência, contabilizam um total de 120 testes. O



objetivo foi determinar a curva de calibração do alimentador e a equação que relaciona a frequência que irá fornecer à vazão mássica necessária para o combustor.

3.6 PARÂMETROS DE ENSAIOS

Nesta etapa é levada em consideração a avaliação dos parâmetros principais, sendo eles: operação no regime de fluidização, quantidade de excesso de ar e escolha da amostra. Os ensaios são divididos entre preliminar e real.

Com o intuito de obter os parâmetros para execução, primeiramente é realizado o teste preliminar com a amostra de carvão simples (C100B0). Portanto, os resultados servem para definir com mais assertividade e entender melhor o regime de fluidização, a pré-operação do equipamento, funcionalidade de todos os acessórios e os gases de exaustão. Dessa forma, garante-se maior efetividade para os testes reais, realizando ajustes caso necessários.

3.6.1 Condições de operação

Na Tab. 6 apresentam-se os parâmetros que são considerados para execução dos ensaios deste trabalho no combustor.

Tabela 6: Parâmetros de ensaios.

Descrição	Condição
Vazão volumétrica de ar (l/min)	160,0
Excesso de ar (%)	60; 80; 100; 120
Regime de fluidização	Borbulhante
Velocidade de fluidização (m/s)	3 vezes a U_{mf} (aproximadamente)
Material do leito	Areia de fundição (sílica)
Número de ensaios	16

Fonte: do Autor (2019)

Para controle do excesso de ar, mantém-se fixa a vazão volumétrica de ar em 160,0 litros por minuto, preservando-se assim o regime de fluidização, e altera-se a vazão mássica de alimentação das amostras combustíveis. A respeito da velocidade de fluidização, adota-se a densidade do ar a 800 °C, por ser próxima das temperaturas de operação do leito.



3.7 MEDIÇÃO DOS GASES DE COMBUSTÃO

Como se deseja verificar os gases da combustão provenientes do combustor, é utilizado o equipamento da marca ECIL Chemist 500. O mesmo tem capacidade para detectar gases como O₂, CO, NO/NO_x, SO_x e CO₂. As medidas são realizadas após os gases passarem pelo ciclone de separação e comparadas com as legislações específicas, como a da Sema (2014) e do Conama (2006), que apresentam os limites máximos para emissão atmosférica de poluentes.

3.7.1 Metodologia para coleta de dados

Por tratar-se de um equipamento térmico, é necessário realizar as medições dos gases de saídas após a temperatura do leito estabilizar, já que a mesma interfere na dinâmica da combustão. Cada análise é executada com tempo de duração de 10 minutos para cada um dos 16 ensaios.

Para identificar a estabilidade da temperatura do leito e controle dos demais pontos do combustor, utiliza-se um programa de supervisão desenvolvido propriamente para o equipamento.

4 ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados após execução e validação dos testes para caracterização do material utilizado no leito. Também é realizado todo o processamento e análise desejada através dos dados coletados durante os ensaios de queima das amostras.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO NO LEITO

Pode-se observar na Tab. 7 as propriedades físicas do sólido particulado utilizado para composição do leito. A compreensão das mesmas é importante para avaliar o comportamento da fluidização durante os ensaios.

Tabela 7: Características da areia.

Característica	Valor
Diâmetro médio de Sauter (mm)	0,295
Faixa granulométrica partícula (mm)	0,25 a 0,35
Massa específica real (kg/m ³)	2.263
Massa específica aparente (kg/m ³)	2.191
Porosidade (adimensional)	0,281
Classificação de Geldart	Grupo B

Fonte: do Autor (2019)

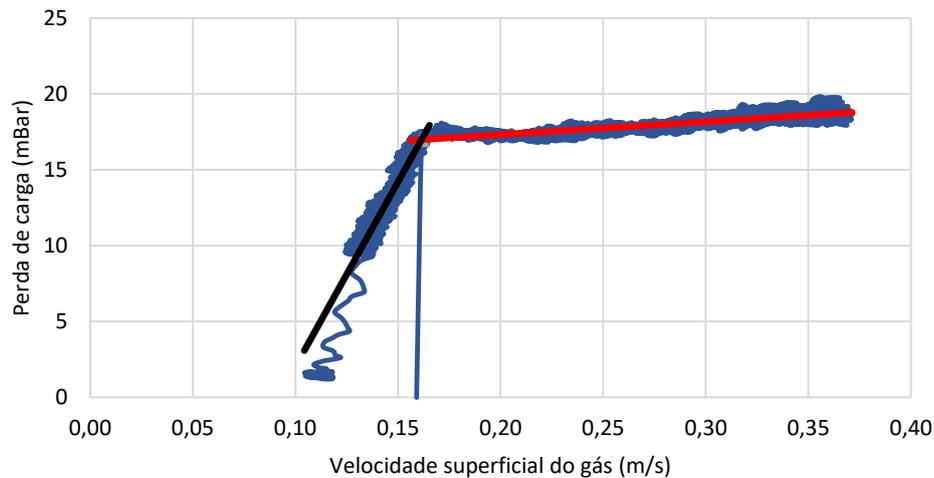
Pode-se verificar nos resultados dos ensaios que o valor da densidade aparente é menor que a real. Segundo Oka (2004), isto ocorre pois existem espaços vazios na microestrutura interna do particulado. Utilizando a diferença de diâmetro entre peneiras e as concentrações de areia no ensaio de granulometria, definiu-se o diâmetro médio de Sauter. Considerando este valor e a diferença de massa específica, a areia de fundição classifica-se no grupo B de Geldart. Outro ponto é referente ao valor respectivo da fração de vazios, que para este material corresponde a um grau maior de compactação no leito.

São esses fatores que conciliam para a melhor escolha da areia como o material a ser utilizado no leito, de modo a permitir possibilidades de diferentes regimes de fluidização, sendo um particulado habitualmente utilizado em processos fluidizados e de fácil obtenção.

4.1.1 Análise fluidodinâmica

Na Fig. 7 pode-se observar as curvas de fluidização e defluidização da areia utilizada no leito. Através da metodologia de intersecção das curvas, encontra-se um U_{mf} igual a 0,1615 m/s.

Figura 7: Velocidade de mínima fluidização.



Fonte: do Autor (2019)

Percebe-se que a curva para velocidade de mínima fluidização apresenta comportamento similar ao descrito por Kunii e Levenspiel (1991) para esse tipo de particulado. Considera-se a velocidade de mínima fluidização encontrada como ideal para a execução dos ensaios, visto que velocidades muito elevadas influenciam em maior arraste de partículas com baixa granulometria, comprometendo assim a composição do leito.

4.2 CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO COMBUSTOR

No decurso para execução dos ensaios, foram constatadas situações referentes ao desempenho operacional do equipamento. Conseqüentemente, as mesmas influenciavam ou sofriam influência por parte dos critérios adotados para realização dos procedimentos experimentais.

4.2.1 Condições de calibração do alimentador

Devido ao fato do alimentador trabalhar com diferentes combinações dos combustíveis, faz-se necessário identificar a vazão mássica para cada amostra de acordo com a frequência de alimentação. Observou-se que os resultados dos testes são consistentes, pois apresentaram boa linearidade.

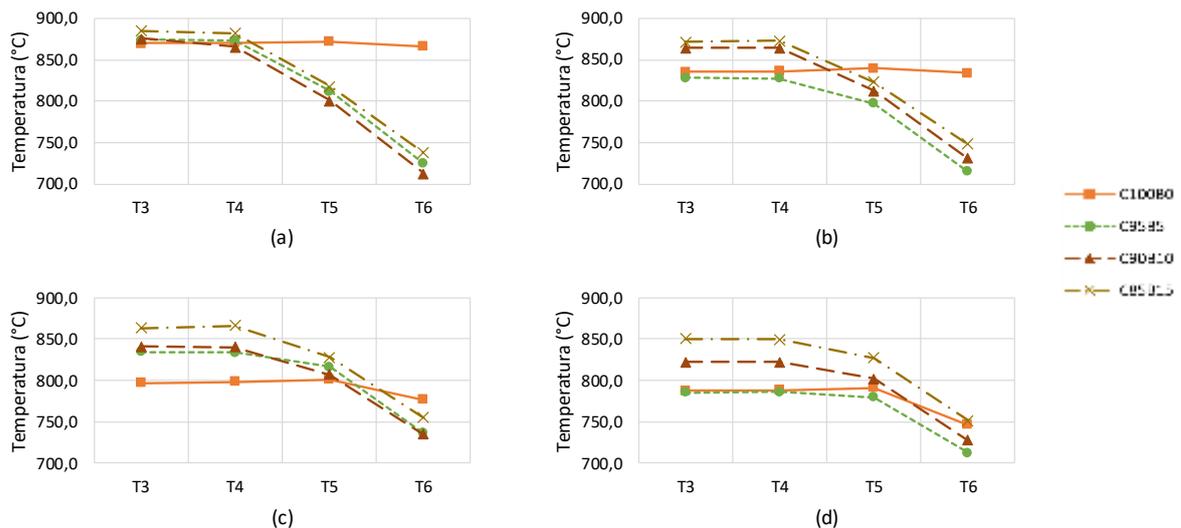
Durante os ensaios de calibração, identificou-se uma dificuldade de operação do alimentador quando o mesmo trabalhava com baixas frequências nas

amostras que continham maiores percentuais de biomassa. Isto é devido principalmente à compleição física do combustível em formato de fibras e também limitação geométrica quanto ao modelo do alimentador para este trabalho.

4.2.1 Temperaturas de operação

Conforme previsto em metodologia, as temperaturas de operação no leito variaram no intervalo de 780 °C a 880 °C de acordo com cada amostra e parâmetro de excesso de ar. Segue abaixo Fig. 9 na qual verificam-se os perfis característicos de temperatura no decorrer do combustor.

Figura 9: Curvas de temperaturas no regime permanente em excesso de ar de 60 % (a), 80 % (b), 100 % (c) e 120 % (d).



Fonte: do Autor (2019)

Observam-se aumentos de temperatura condizentes com maiores percentuais de biomassa para cada mistura. Isto ocorre devido à biomassa possuir um potencial energético e material volátil maiores quando equiparada com o carvão mineral.

Considerando maior excesso de ar no regime de trabalho, nota-se uma queda na temperatura do leito ocasionada por uma massa maior de ar de entrada, portanto sendo necessária maior energia calorífica para aquecimento do sistema. Outro fator que influencia a diminuição da temperatura é devido à quantidade de



nitrogênio que atravessa o processo, pois o mesmo minimamente reage com demais reagentes, removendo assim mais calor do sistema.

Também a partir da análise dos perfis de temperatura ao longo da subida no combustor é possível observar sensível queda na temperatura das regiões mais afastadas do leito, especialmente para as misturas contendo biomassa. Este fato deve ser motivado pela mais alta reatividade da biomassa em comparação à reatividade do carvão. Uma vez que a biomassa é alimentada e toca a região do leito, a mesma proporciona rápida reação promovendo o aumento da temperatura naquela região e desfavorecendo as zonas subsequentes.

Para os resultados contendo apenas carvão, foi notada uma maior homogeneidade das temperaturas ao longo do combustor, possivelmente ocasionada por uma menor reatividade do carvão, realizando uma queima mais lenta das frações finas e voláteis que são arrastados para as partes mais superiores do equipamento.

4.2.2 Análise de Perda ao Fogo das cinzas

Com o intuito de analisar e retratar como os parâmetros empregados influenciam na combustão das diversificadas amostras para este trabalho, foram realizadas análises de perda ao fogo nos subprodutos da queima, são eles: as cinzas volantes ou leves, coletadas após passagem pelo ciclone, e as cinzas de fundo ou pesadas, coletadas no leito.

Este ensaio foi baseado na ASTM D7348-07 (Métodos de teste padrão para perda por ignição de resíduos de combustão sólida) e realizado para a cinza leve e cinza pesada de cada amostra de combustível pelo laboratório do Centro Tecnológico SATC (CTSATC).

O teste por ignição consiste no aquecimento das respectivas amostras até as temperaturas pré-determinadas para verificar e medir a presença da massa de umidade e material volátil ainda presentes. Seguem na Tab. 8 os resultados encontrados.



Tabela 8: Resultados de perda ao fogo.

Amostra	Cinza Leve (%)	Cinza Pesada (%)
C100B0	9,36	0,29
C95B5	8,97	0,31
C90B10	9,61	0,32
C85B15	8,89	0,30

Fonte: do Autor (2019)

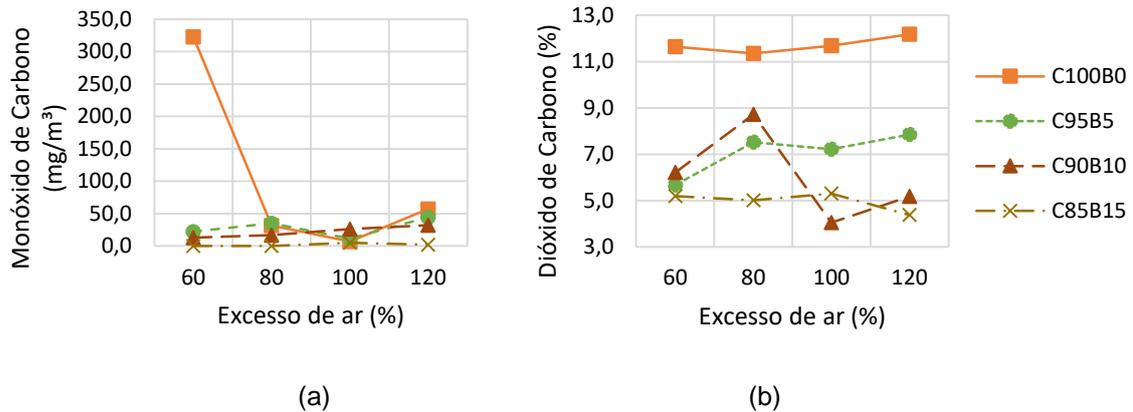
Observa-se um comportamento muito natural, visto que as mesmas sofreram pequena perda de massa durante os ensaios, especialmente a cinza pesada comparada com a cinza leve, mostrando boa conversão do material e eficiência do processo de combustão. Isto fica mais evidente com os resultados encontrados nas concentrações de CO expostos no item a seguir.

4.3 ANÁLISE DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Neste item em questão, serão avaliadas as concentrações dos gases provenientes da combustão, considerando os limites de emissões dos poluentes atmosféricos perante as normas ambientais e também suas influências na qualidade do ar.

4.3.1 Eficiência na conversão de Carbono (CO e CO₂)

Durante o processo de combustão, a medição da concentração dos gases CO e CO₂ é fundamental para identificar a eficiência da queima. Portanto, os mesmos funcionam como “termômetro” para o processo. Por se tratar de um gás eminentemente perigoso devido à sua toxicidade e inflamabilidade, o monóxido de carbono (CO) tem, por legislação ambiental, limitações quanto à quantidade emitida, sendo necessário levar em consideração baixos índices desse poluente gasoso em processos de queima. Por outro lado, otimizar a formação de dióxido de carbono (CO₂) é essencial para uma combustão com melhor qualidade, resultando em menor exaustão de gases poluentes e aproveitamento de calor gerado. Observa-se na Fig. 10 as concentrações desses gases de acordo com as condições de operação e após correção para o referencial de oxigênio conforme legislação adotada.

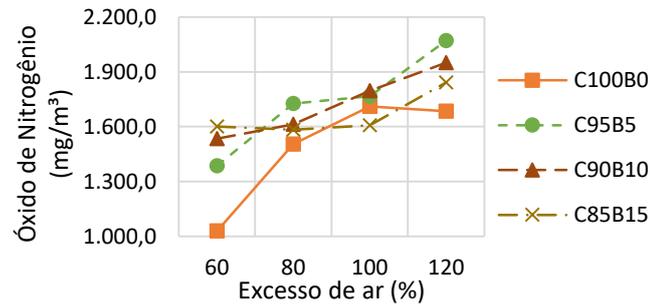
Figura 10: Concentrações de CO (a) e CO₂ (b).

Fonte: do Autor (2019)

Nota-se que as concentrações de ambos os gases não sofreram grandes alterações a partir de maiores excessos de ar, como também pequenas diferenças com inserção do aumento percentual de biomassa no combustível. Uma justificativa plausível para este caso é que o processo com maior excesso de ar, considerando também temperatura adequada de operação do equipamento, permite uma maior disponibilidade de oxigênio, facilitando a combustão e mantendo as emissões de CO baixas e as de CO₂ constantes. Conforme apontam os dados, pode-se então destacar exíguas concentrações de CO, mostrando uma alta eficiência na combustão para os ensaios realizados. Em virtude do Conama (2006) não especificar limite para emissão de CO na queima de carvão mineral, compara-se com a Resolução 016/2014 da SEMA do Paraná, na qual estipula limite de 500 mg/m³ para equipamentos com potência nominal menor ou igual a 10 MW. Portanto, todas as condições de ensaio se encaixam dentro do parâmetro estabelecido.

4.3.2 Emissões de Óxido de Nitrogênio (NO_x)

O lançamento de óxido de nitrogênio à atmosfera, dependendo da concentração, gera diversos malefícios. Acarreta em solos mais ácidos, danos a animais e risco à saúde humana. Soluções para mitigar esse poluente são geralmente significativas quando aplicados excessos de ar e temperaturas harmoniosas no processo de combustão. A Fig. 11 exibe os dados resultantes dos ensaios quanto à exaustão de NO_x.

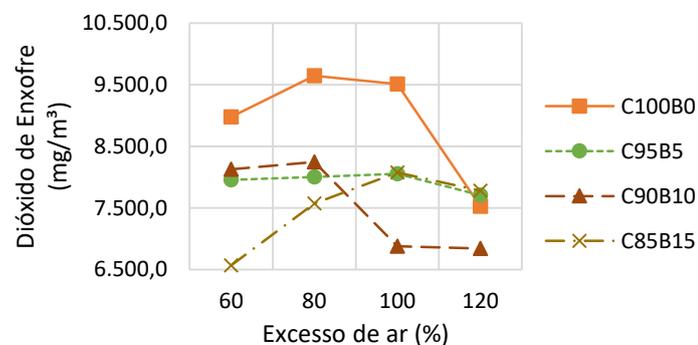
Figura 11: Concentrações de NO_x.

Fonte: do Autor (2019)

Em comparação com a legislação ambiental, a Resolução 016/2014 da SEMA do Paraná não estipula limite para concentração de NO_x em virtude da baixa potência nominal do combustor. De qualquer modo, nota-se na curva dos resultados uma tendência no aumento de formação de NO_x quando maior disponibilidade de ar e adição de biomassa. Apesar de trabalhar com temperaturas amenas, uma possível justificativa para o aumento das emissões de NO_x é devido ao mecanismo de formação térmico associado a maior disponibilidade de nitrogênio proporcionada pelo excesso de ar.

4.3.3 Emissões de Dióxido de Enxofre (SO₂)

As concentrações de dióxido de enxofre foram verificadas considerando como um dos principais objetos dos ensaios realizados neste trabalho. Observam-se na Fig. 12 os resultados coletados durante os testes de combustão.

Figura 12: Concentrações de SO₂.

Fonte: do Autor (2019)



Observa-se que as queimas combinadas de carvão mineral e biomassa resultaram em quantidades menores nas concentrações de SO₂. Portanto, ratifica que as emissões desse poluente estão fortemente ligadas e são sensíveis quando há acréscimo de biomassa na mistura se comparada com a combustão simples de carvão mineral. Contrastando-se as amostras contendo biomassa com a amostra singular de carvão nos regimes de excesso de ar em 60 e 80 %, as diferenças de concentrações variam de 1.000 até 2.500 mg/m³ a menor, ou seja, reduções de até 28% nas emissões de SO₂. A visualização deste efeito é importante, pois as emissões de óxidos de enxofre são prejudiciais tanto aos equipamentos quanto à saúde humana. Além disso, suas emissões são limitadas, principalmente para maiores escalas, o que requer a aplicação de insumos, como calcário para a remoção do enxofre durante a combustão ou a utilização de equipamentos para a dessulfuração dos gases de exaustão que implicariam em maiores custos.

Tratando-se de legislação ambiental, a Resolução 016/2014 da SEMA do Paraná não define parâmetros para controle da quantidade de SO₂, pois a mesma não se aplica às potências nominais menores que 10 MW.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em vista dos argumentos apresentados, pode-se concluir, a partir da execução dos ensaios e análises dos resultados coletados, que a areia utilizada no leito se revelou como oportuna, levando também em consideração as características apresentadas pela mesma, observando sua influência para a velocidade de fluidização condicionada para este trabalho.

Foi fundamental a realização de testes preliminares, tanto na calibração do alimentador como para definição dos parâmetros considerados na matriz para execução dos testes reais. Os mesmos apontaram que maiores percentuais de biomassa interferem na operação do sistema de alimentação, mostrando-se como um limitador nesse aspecto, principalmente para misturas acima de 10%. Em virtude do que foi mencionado, aponta-se então como necessidade a alteração para um sistema de alimentação mais adequado e condizente para próximos estudos relacionados.

Os resultados mostraram que é possível a combustão de carvão mineral com incremento de biomassa em combustor de leito fluidizado borbulhante. Observa-se também que a queima combinada desses combustíveis é bastante vantajosa



quando analisadas as concentrações de poluentes após combustão e os perfis de temperatura. Esses mostraram que o sistema trabalhou em condições típicas se comparadas as misturas com a queima simples de carvão mineral, durante o regime de fluidização e parâmetros controlados no equipamento.

Por todos os pontos apresentados, a mistura com 10 % de biomassa mostrou-se mais conveniente para desempenho da combustão, pois as temperaturas de operação tiveram menor variação quando confrontadas com as demais amostras, ficando na escala de 820 °C a 880 °C, mesmo com uma faixa maior de excesso de ar (60 a 120 %).

Baseando-se na pesquisa por parâmetros mais adequados, é imprescindível que se ponderem técnicas para priorizar uma melhor otimização da queima de combustíveis mediante à emissão de gases poluentes. Isto fica visível quando se observa a diminuição nas emissões de enxofre neste trabalho em até 28 % com a introdução de biomassa. Visualizando esse método para plantas de grande porte, tende-se a diminuir suscetivelmente os custos para controle nas emissões de SO_x, pois alavanca-se a possibilidade de substituição dos sistemas mais custosos, como o de dessulfurização de gases.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Parte II: Fontes não-renováveis**. 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par2_cap5.pdf>. Acesso em: 01 de março de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. 2 ed. Rio de Janeiro. 6 p. 2009.

BASU, Prabir. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. Boca Raton. Taylor & Francis, 2006.

CARVALHO, João A. de; MCQUAY, Mardson Q. **Princípios de Combustão Aplicada**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO 382: Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas**. 2006. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res38206.pdf>>. Acesso em: 01 de março de 2019.



CREMASCO, Marco A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. São Paulo: Blucher, 2012.

DARMAWAN, Arif; BUDIANTO, Dwika; AZIZ, Muhammad; TOKIMATSU, Koji. *Cofiring Assessment of Hydrothermally-Threated Empty Fruit Bunch and Low Coal in a Drop Tube Furnace*. **Energy Procedia**, v.105, p. 1545-1550, 2017.

ELETRO NUCLEAR. Ministério de Minas e Energia. **Oferta e demanda de energia**. 2018. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Imprensa-e-Midias/Documents/Resenha%20Energ%C3%A9tica%202018%20-MME.pdf>>. Acesso em: 01 de março de 2019.

FOUST, Alan S; WENZEL, Leonard A; CLUMP, Curtis W; MAUS, Louis; ANDERSEN, Bryce L. **Princípio das operações unitárias**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

GARCIA, Roberto. **Combustíveis e Combustão industrial**. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

GELDART, Derek. *Types of Gas Fluidization*. **Powder Technology**, v.7, p.285-292, 1973.

GRUPO ECIL. **Analísadores de Gases de Combustão**. 2019. Disponível em: <<http://www.ecil.com.br/temperatura-industrial/analísadores-de-gases-de-combustao/>>. Acesso em: 20 de março de 2019.

JAKOBSEN, H. *Chemical Reactor Modeling*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008

KUNII, Daizo; LEVENSPIEL, Octave. *Fluidization Engineering*. 2 ed. Newton (MA): Butterworth-Heinemann, 1991.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Fontes renováveis representam 82,2 % da matriz de geração elétrica**. 2017. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/fontes-renovaveis-representam-82-2-da-matriz-de-geracao-eletrica>. Acesso em: 01 de março de 2019.

OKA, Simeon N. *Fluidized Bed Combustion*. New York: Marcel Dekker, 2004.

PAUDEL, B.; FENG, Z. G. *Prediction of minimum fluidization velocity for binary mixtures of biomass and inert particles*. **Powder Technology**, v.237, p.134-140. 2013.

SEMA, Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Resolução 016 de 15 de abril de 2014. Legislação Ambiental**. Disponível em: <<http://www.meioambiente.pr.gov.br/>> Acesso em: 01 de março de 2019.

URNS, Stephen R. **Introdução à Combustão: Conceitos e Aplicações**. Porto Alegre: AMGH, 2013.



YANG, W. C. *Handbook of Fluidization and fluid-particle system*. New York: Marcel Dekker, 2003.

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	[kg/m ³]	Massa específica do fluido
d_p	[mm]	Diâmetro médio de Sauter
ΔP	[Pa]	Perda de carga
U_{mf}	[m/s]	Velocidade de mínima fluidização
\overline{AF}	[---]	Relação ar-combustível na mistura
\overline{AF}_{esteq}	[---]	Relação ar-combustível estequiométrica na mistura
m_a	[kg]	Massa de ar
m_f	[kg]	Massa de combustível
ϕ	[---]	Razão de equivalência
C_R	[mg/m ³]	Concentração do poluente corrigida para condições referenciais
O_R	[%]	Concentração referencial de oxigênio
O_M	[%]	Concentração medida de oxigênio
C_M	[mg/m ³]	Concentração do poluente medida
ρ_p	[kg/m ³]	Massa específica real
m_p	[kg]	Massa do sólido particulado
V_p	[m ³]	Volume do sólido particulado
ρ_{ap}	[kg/m ³]	Massa específica aparente
m_{ap}	[kg]	Massa da amostra
V_{ap}	[m ³]	Volume da amostra
X_i	[%]	Fração mássica
d_i	[mm]	Diâmetro da peneira – análise granulométrica