

JULIANA ESTEVES FERNANDES CIESLINSKI

**ESTUDO DA EMISSÃO E DO CONTROLE DOS GASES E
PARTICULADOS PROVENIENTES DA QUEIMA DE
BIOMASSA**

Guaratinguetá

2014

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2014

TD 2014	ESTEVES FERNANDES CIESLINSKI, Juliana
------------	---------------------------------------

JULIANA ESTEVES FERNANDES CIESLINSKI

ESTUDO DA EMISSÃO E DO CONTROLE DOS GASES E
PARTICULADOS PROVENIENTES DA QUEIMA DE BIOMASSA

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
do Campus de Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção do título
de Doutor em Engenharia Mecânica na área
de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ventrone
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Angélica Martins Costa

Guaratinguetá

2014

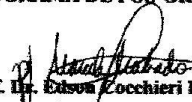
C569e	Cieslinski, Juliana Esteves Fernandes Estudo da emissão e do controle dos gases e particulados provenientes da queima de biomassa / Juliana Esteves Fernandes Cieslinski - Guaratinguetá : [s.n.], 2014 157 f. : il. Bibliografia: f. 143-157 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014. Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ventrone Coorientadora: Prof^a Dr^a Maria Angélica Martins Costa 1. Biomassa 2. Gaseificação de biomassa 3. Biocombustíveis 4. Ar – Poluição I. Título CDU 620.91(043)
-------	---

JULIANA ESTEVES FERNANDES CIESLINSKI

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA"**

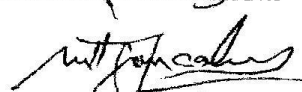
**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS**

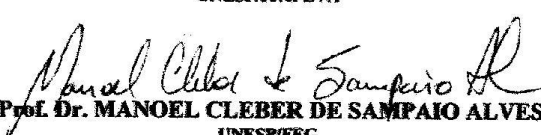
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

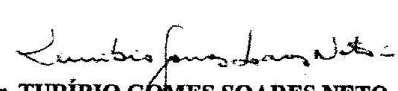

Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARIA ANGÉLICA MARTINS COSTA
Co-Orientadora / UNESP/ITAPEVA


Prof. Dr. MARCOS TADEU TIBÚRCIO GONÇALVES
UNESP/ITAPEVA


Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP/FEG


Prof. Dr. TURÍBIO GOMES SOARES NETO
INPE


Prof. Dr. CELSO LUIZ DA SILVA
UNESP/FEB

Fevereiro de 2014

DADOS CURRICULARES

JULIANA ESTEVES FERNANDES CIESLINSKI

NASCIMENTO	10.06.1979 – MOGI DAS CRUZES / SP.
FILIAÇÃO	Artur Fernandes Olinda de Fátima Esteves Fernandes
1998/2003	Curso de Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Paraná - UFPR
2003/2005	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de Reatores Químicos Heterogêneos e Catálise, nível de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos - UFSCar
2006/2009	Curso de Especialização em Gestão Ambiental e Desenvolvimento Sustentável. Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva – FAIT
2010/2014	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de Materiais, nível de Doutorado. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP

Àqueles que mais amo na vida: meus pais, Artur e Olinda, que me deram a vida e me ensinaram que o trabalho, o estudo, a perseverança e a alegria de viver são as coisas mais importantes na vida, e meu grande amor, Maurício que me dá sempre muito carinho, atenção e me faz ser uma pessoa mais feliz a cada dia.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por estar aqui nesta vida buscando o aprendizado constante.

Aos meus pais, Artur e Olinda, por estarem sempre ao meu lado, principalmente incentivando meus estudos.

Ao meu amado Maurício, pela presença constante em minha vida, mesmo que distante em alguns momentos.

À minha co-orientadora, Prof^a. Dr^a. Maria Angélica Martins Costa, por sua orientação, dedicação, auxílio e amizade.

Ao Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves por sua compreensão em vários momentos na minha vida docente na UNESP-Itapeva.

Aos professores da pós-graduação da UNESP-Itapeva, principalmente àqueles que participaram diretamente da minha formação: Prof. Dr. José Cláudio Caraschi, Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves, Prof. Dr. Gustavo Ventorim, Prof^a. Dr^a. Maria Angélica Martins Costa.

Aos professores da graduação e à seção técnica de apoio acadêmico e administrativo da UNESP-Itapeva pelo companheirismo e pelo auxílio nos primeiros momentos da minha vida de docente no Câmpus de Itapeva.

Aos técnicos de laboratório, especialmente Juscelino de Jesus Pereira Melo e Francisco Almeida Filho, que muito me auxiliaram na parte experimental.

Aos alunos de graduação bolsistas que me ajudaram nos testes experimentais.

À aluna de mestrado Simone Simões Amaral que trabalhou comigo, principalmente nos últimos anos do doutorado.

À Destilaria Iracema, Destilaria Londra, Cooperativa dos cafeicultores da Zona de São Manuel, Turquinho – Comércio de café e Brasília Alimentos que me forneceram os resíduos agrícolas para este estudo. À serraria do Campus da Unesp de Itapeva que me forneceu as biomassas madeireiras.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Campus de Guaratinguetá e Campus de Itapeva.

A todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:

- FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – através de auxílio financeiro para aquisição de equipamentos.
- FUNDUNESP – Fundação para o Desenvolvimento da UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP – através de auxílios financeiros para participação em eventos científicos.
- PROGRAD – Pró-Reitoria de Graduação – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP – através de auxílios financeiros para participação em eventos científicos.
- PROPE – Pró-Reitoria de Pesquisa – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP – através de auxílios financeiros para participação em eventos científicos.
- PROEX – Pró-Reitoria de Extensão Universitária - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP – através de auxílios financeiros para participação em eventos científicos.

“Nunca se afaste de seus sonhos,
pois se eles se forem,
você continuará vivendo,
mas terá deixado de existir”.

Charles Chaplin

CIESLINSKI, J. E. F. **Estudo da emissão e controle dos gases e particulados provenientes da queima de biomassa**. 2014. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

Uma das fontes energéticas que fornecem utilidade, flexibilidade, limpeza e economia é a biomassa, como os resíduos da indústria madeireira (cavacos) e os resíduos agrícolas (bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e casca de café). Entretanto, com a sua crescente oferta e utilização cresce também a preocupação das indústrias em investir no monitoramento e controle de suas emissões para a atmosfera, pois durante a queima de biomassa são emitidas, além dos gases de combustão, partículas finas conhecidas como particulados, as quais muito contribuem para o desencadeamento de sérios problemas de saúde ao homem, além dos danos ambientais. Com isso, este trabalho objetivou realizar o monitoramento das emissões de queima dos diferentes tipos de biomassa mencionados, além de realizar o controle dessas emissões com um lavador Venturi. Para o monitoramento dos particulados foi utilizado o monitor óptico DataRAM 4 (modelo DR-4000) e para o monitoramento dos gases o Unigas3000+. Para o controle dos particulados e dos gases produzidos na queima foi utilizado um lavador Venturi horizontal retangular. Os resultados mostraram que a biomassa casca de café apresentou a maior concentração de particulados ($485119 \mu\text{g}/\text{m}^3$) com diâmetros de partícula entre $0,0602 \mu\text{m}$ e $0,3502 \mu\text{m}$, ou seja, partículas ultrafinas, as mais prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente, sendo que a maior eficiência de coleta de partículas pelo lavador Venturi ocorreu para a queima de casca de arroz (86,3%). As maiores emissões de CO e de NO_x foram observadas, respectivamente, para a casca de café (3500 ppm) e para a casca de arroz (48 ppm), sendo que as eficiências de coleta destes gases pelo Venturi foram maiores para o cavaco de pinus (eficiência de coleta de CO de 97% e de NO_x de 96%).

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa. Gaseificação de biomassa. Biocombustíveis. Ar - Poluição. Lavador Venturi.

CIESLINSKI, J. E. F. **Study the issue and control of gases and particles from biomass burning.** 2014. 157 f. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

One of the alternative energy sources that provide utility, flexibility, cleanliness and economy is biomass, such as wood industry residues (chips) and agricultural residues (sugar cane bagasse, rice husk, coffee husk, etc.). However, with its increasing availability and use is also growing concern of industries to invest in monitoring and control of emissions into the atmosphere, because during biomass burning are issued in addition to combustion gases, fine particles known as particulate, the which greatly contribute to the onset of serious health problems to humans, in addition to environmental damage. Therefore, this study aimed to carry out the monitoring of emissions from combustion of different biomass types mentioned, and perform control these emissions with a Venturi scrubber. For monitoring of particulate optical monitor DataRAM 4 (DR - 4000 model) was used and for the monitoring of the gases Unigas3000 +. For the control of particulates and gases from burning was used a horizontal rectangular Venturi scrubber. The results showed a higher concentration of particulates issued by the coffee husk ($485119 \mu\text{g}/\text{m}^3$) with particle diameters of $0.0602 \mu\text{m}$ and $0.3502 \mu\text{m}$ (ultrafine particles), the more harmful to human health and the environment, and the greater efficiency of particle collection by Venturi scrubber occurred to burning rice husk (86.3 %). The higher emissions of CO and NO_x were observed, respectively, for coffee husk (3500 ppm) and rice husk (48 ppm), and the collection efficiencies of these gases by Venturi was greater for type chip shavings *Pinus* (collection efficiency of 97 % CO and NO_x emissions by 96 %) .

KEYWORDS: Biomass. Biomass gasification. Biofuels. Air - Pollution. Venturi scrubber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática de um sistema calorimétrico.....	18
Figura 2 - Processos de transformação da biomassa em energia.....	21
Figura 3 - Amostragens não-representativas e amostragem representativa para material particulado contido em uma corrente gasosa em duto: (a) e (b) amostragens não-representativas; (c) amostragem representativa (isocinética)	26
Figura 4 - Pontos de amostragem na seção transversal de acordo com a norma BS 3405:1983*. Para o presente trabalho $D = 17,54 \text{ cm}^{**}$	27
Figura 5 – Sistema experimental de Hosseini et al. (2010).....	32
Figura 6 – Equipamento de queima de biomassa florestal amazônica	40
Figura 7 – Representação esquemática do lavador Venturi.....	44
Figura 8 – Trajetória de penetração do jato líquido segundo Viswanathan et al. (1983).....	48
Figura 9 – Rede neural para determinação da eficiência de coleta de material particulado	52
Figura 10 - Biomassas utilizadas neste trabalho: (a) bagaço de cana-de-açúcar; (b) casca de café; (c) casca de arroz; (d) cavaco de eucalipto; (e) cavaco de pinus	61
Figura 11 – Análise de poder calorífico: (a) bomba calorimétrica; (b) calorímetro	66
Figura 12 – Desenho esquemático do sistema de queima de biomassa	68
Figura 13 – Sistema de queima de biomassa - queimador acoplado a um alimentador de biomassa.....	69
Figura 14 – Chaminé do queimador de biomassa (a) e Esquema das posições dos orifícios de amostragem na chaminé (b). Observação: $D = 17,54 \text{ cm}$	70
Figura 15 – Amostrador de material particulado DataRAM 4	70
Figura 16 – Acessórios utilizados com o DataRAM 4: (a) sonda isocinética – com boquilhas encapsuladas por borracha vermelha para proteção; (b) seletor de partículas – já instalado no amostrador; (c) aquecedor.....	72
Figura 17 – Amostrador de gases UniGas 3000+ (a) e sonda de amostragem (b)	74
Figura 18 – Módulo experimental de controle de material particulado e gases	76
Figura 19 – Lavador Venturi em detalhes (a) e Ciclone (b)	77
Figura 20 – Análise química imediata para o bagaço de cana-de-açúcar	81
Figura 21 – Análise química imediata para a casca de café	82
Figura 22 – Análise química imediata para a casca de arroz.....	82
Figura 23 – Análise química imediata para o cavaco de eucalipto.....	83
Figura 24 – Análise química imediata para o cavaco de pinus.....	83

Figura 25 – Poder Calorífico Superior para o bagaço de cana-de-açúcar, para a casca de café e para a casca de arroz.....	84
Figura 26 – Poder Calorífico Superior para o cavaco de eucalipto	85
Figura 27 – Poder Calorífico Superior para o cavaco de pinus	85
Figura 28 - Concentração de particulados <i>versus</i> tempo de queima – bagaço de cana-de-açúcar: (a) testes 1 e 3; (b) teste 2	89
Figura 29 - Concentração de particulados <i>versus</i> diâmetro de partícula – bagaço de cana-de-açúcar: (a) teste 1; (b) teste 2; (c) teste 3	91
Figura 30 - Diâmetro de partícula <i>versus</i> tempo de queima – bagaço de cana-de-açúcar: (a) testes 1 e 3; (b) teste 2.....	93
Figura 31 - Concentração de particulados <i>versus</i> tempo de queima – casca de café	95
Figura 32 – Concentração de particulados <i>versus</i> diâmetro de partícula – casca de café: (a) teste 1; (b) teste 2.....	97
Figura 33 – Diâmetro de partícula <i>versus</i> tempo de queima – casca de café.....	98
Figura 34 - Concentração de particulados <i>versus</i> tempo de queima – casca de arroz.....	100
Figura 35 – Concentração de particulados <i>versus</i> diâmetro de partícula – casca de arroz: (a) teste 1; (b) teste 2.....	101
Figura 36 – Diâmetro de partícula <i>versus</i> tempo de queima – casca de arroz	103
Figura 37 – Concentração de particulados <i>versus</i> tempo de queima: (a) cavaco de eucalipto; (b) cavaco de pinus; (c) cavacos de eucalipto e de pinus (mistura).....	105
Figura 38 – Concentração de particulados <i>versus</i> diâmetro de partícula: (a) cavaco de eucalipto; (b) cavaco de pinus – teste 1; (c) cavaco de pinus – teste 2; (d) cavacos de eucalipto e de pinus (mistura)	108
Figura 39 – Diâmetro de partícula <i>versus</i> tempo de queima – resíduos madeireiros	110
Figura 40 – Concentração de CO em função do tempo de queima – bagaço de cana-de-açúcar – teste 3.....	113
Figura 41 – (a) Concentração de CO ₂ em função do tempo de queima; (b) Temperatura do gás em função do tempo - bagaço de cana-de-açúcar - teste 3	114
Figura 42 – Concentração de NO _x em função do tempo de queima – bagaço de cana-de-açúcar: teste 3.....	115
Figura 43 – Concentração de CO em função do tempo de queima – casca de café – teste 1	116
Figura 44 – (a) Concentração de CO ₂ em função do tempo de queima; (b) Temperatura do gás em função do tempo – casca de café - teste 1	117
Figura 45 – Concentração de NO _x em função do tempo de queima – casca de café – teste 1	118

Figura 46 – Concentração de CO em função do tempo de queima – casca de arroz – teste 2119	
Figura 47 – (a) Concentração de CO ₂ em função do tempo de queima; (b) Temperatura do gás em função do tempo – casca de arroz - teste 2.....	120
Figura 48 – Concentração de NO _x em função do tempo de queima – casca de arroz – teste 2	121
Figura 49 – Concentração de CO em função do tempo de queima – cavacos de eucalipto + pinus.....	122
Figura 50 – (a) Concentração de CO ₂ em função do tempo de queima; (b) Temperatura do gás em função do tempo – cavacos de eucalipto + pinus	123
Figura 51 – Concentração de NO _x em função do tempo de queima – resíduos madeireiros .	124
Figura 52 – (a) Eficiência global média <i>versus</i> vazão de líquido; (b) Penetração do jato e penetração máxima da linha central do jato <i>versus</i> vazão de líquido – bagaço de cana-de-açúcar	125
Figura 53 – Eficiência global média <i>versus</i> razão líquido-gás – bagaço de cana-de-açúcar .	127
Figura 54 – Eficiência global média de coleta de gases <i>versus</i> vazão de líquido – bagaço de cana-de-açúcar.....	128
Figura 55 – (a) Eficiência global média <i>versus</i> vazão de líquido; (b) Penetração do jato e penetração máxima da linha central do jato <i>versus</i> vazão de líquido – casca de café	130
Figura 56 – Eficiência global média <i>versus</i> razão líquido-gás – casca de café.....	131
Figura 57 – Eficiência global média de coleta de gases <i>versus</i> vazão de líquido – casca de café	132
Figura 58 – Eficiência global média de coleta de gases <i>versus</i> vazão de líquido – casca de arroz	134
Figura 59 – Eficiência global média de coleta de gases <i>versus</i> vazão de líquido – cavaco de eucalipto.....	136
Figura 60 – (a) Eficiência global média <i>versus</i> vazão de líquido; (b) Penetração do jato líquido e penetração máxima da linha central do jato <i>versus</i> vazão de líquido – cavaco de pinus	137
Figura 61 – Eficiência global média <i>versus</i> razão líquido-gás – cavaco de pinus	138
Figura 62 – Eficiência global média de coleta de gases <i>versus</i> vazão de líquido – cavaco de pinus.....	139

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fontes e efeitos dos principais poluentes atmosféricos	5
---	---

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrões nacionais de qualidade do ar estabelecidos pelo CONAMA	7
Tabela 2 - Padrões de qualidade do ar estabelecidos pela OMS	8
Tabela 3 - Padrões de qualidade do ar para partículas inaláveis estabelecidos pela OMS	8
Tabela 4 – Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de derivados de madeira (cavaco de eucalipto e cavaco de pinus para este trabalho)	9
Tabela 5 - Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de bagaço de cana-de-açúcar (valores podem ser considerados para as cascas de café e de arroz deste trabalho).....	9
Tabela 6 - Análises químicas imediatas realizadas por diferentes autores para biomassas semelhantes às estudadas neste trabalho.....	17
Tabela 7 – Valores de poderes caloríficos superiores obtidos por diferentes autores para biomassas semelhantes às estudadas neste trabalho	19
Tabela 8 – Etapas da combustão de biomassa	22
Tabela 9 - Concentrações médias de PM _{2,5} e PM ₁₀	30
Tabela 10 – Fatores médios de emissão (g _x /kg de biomassa seca queimada)	39
Tabela 11 – Fatores médios de emissão de CO e NO _x e emissão de CO ₂ para as três fases da combustão	42
Tabela 12 – Eficiências de coleta experimentais e por redes neurais	53
Tabela 13 – Eficiências de coleta de material particulado para diferentes vazões de líquido, velocidades de gás e geometrias de lavador Venturi	54
Tabela 14 – Eficiências de coleta de material particulado para diferentes concentrações (C) de partículas	55
Tabela 15 – Eficiências de coleta de material particulado para diferentes razões líquido-gás	55
Tabela 16 – Eficiências de coleta de material particulado para diferentes vazões de líquido e de gás	56
Tabela 17 – Eficiência de coleta de gases poluentes em função da vazão de gás – vazão de água de 4 L/min e vazões de gás de 3,3, 5, 6,6 e 8,3 m ³ /min	58
Tabela 18 – Eficiência de coleta de gases poluentes em função do líquido utilizado – vazão de líquido de 4 L/min e vazão da corrente gasosa de 3,3 m ³ /min.....	58
Tabela 19 – Eficiência de remoção dos gases poluentes em função da razão líquido-gás – vazão da corrente gasosa de 3,3 m ³ /min e vazões de líquido iguais a 1,5, 4, 6,5, 9 e 11,5	

L/min.....	59
Tabela 20 - Especificações do amostrador de material particulado DataRAM 4	71
Tabela 21 - Especificações do UniGas 3000+	75
Tabela 22 – Parâmetros (variáveis) utilizadas para os testes de controle	78
Tabela 23 – Análise química imediata para este trabalho	81
Tabela 24 – Poder calorífico superior para este trabalho	84
Tabela 25 - Teores de umidade e PCS para o bagaço de cana-de-açúcar.....	88
Tabela 26 - Concentrações máximas e diâmetros correspondentes para o bagaço de cana-de-açúcar	92
Tabela 27 – Diâmetros mínimos e máximos – bagaço de cana-de-açúcar.....	94
Tabela 28 - Teores de umidade e PCS para a casca de café	95
Tabela 29 - Concentrações máximas e diâmetros correspondentes para a casca de café	98
Tabela 30 – Diâmetros mínimos e máximos – casca de café	99
Tabela 31 - Teores de umidade e PCS para a casca de arroz.....	99
Tabela 32 - Concentrações máximas e diâmetros correspondentes para a casca de arroz.....	102
Tabela 33 – Diâmetros mínimos e máximos – casca de arroz.....	103
Tabela 34 - Teores de umidade e PCS para os resíduos madeireiros.....	104
Tabela 35 - Concentrações máximas e diâmetros correspondentes para os resíduos madeireiros	110
Tabela 36 – Média de diâmetros, diâmetros mínimos e máximos – resíduos madeireiros.....	111
Tabela 37 – Eficiência global média de coleta de material particulado, penetração do jato líquido e razão líquido-gás – casca de arroz	133
Tabela 38 – Eficiência global média de coleta de material particulado, penetração do jato líquido e razão líquido-gás – cavaco de eucalipto.....	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CF	carbono fixo
COV	compostos orgânicos voláteis
CZ	cinzas
FMPS	Fast Mobility Particle Sizer Spectrometer = espectrômetro portátil de resposta rápida
MAA	média aritmética anual
MGA	média geométrica anual
MV	materiais voláteis
OMS	organização mundial da saúde
PAN	peroxiacetilnitrato
PCI	poder calorífico inferior
PCS	poder calorífico superior
PI	material particulado inaláveis
PM	material particulado
PTS	material particulado totais em suspensão
US-EPA	United States - Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

Ca	concentração de amostragem (medida) de material particulado
Ce	concentração de escoamento do gás
Ci	concentração de entrada no Venturi
Co	concentração de saída no Venturi
C	carbono
Cl	cloro
CO	monóxido de carbono
CO ₂	dióxido de carbono
d _p	diâmetro de partícula
d ₀	diâmetro do orifício
ΔP	queda de pressão no Venturi
E	eficiência de coleta de material particulado no Venturi
H	hidrogênio
HCl	ácido clorídrico
H ₂ O	água
K	potássio
l*	penetração do jato líquido
l**	penetração máxima da linha central do jato líquido
L/G	razão líquido-gás no Venturi
NaOH	hidróxido de sódio
N	nitrogênio
N ₀	número de orifícios de injeção de líquido
NO	óxido de nitrogênio
NO ₂	dióxido de nitrogênio
NO _x	óxidos de nitrogênio
O	oxigênio
O ₂	gás oxigênio
O ₃	ozônio
ρ _l	densidade do líquido
ρ _g	densidade do gás
Q _l	vazão de líquido introduzida no Venturi

Q_g	vazão de gás no Venturi
S	enxofre
SO_2	dióxido de enxofre
SO_x	óxidos de enxofre
TiO_2	dióxido de titânio
U	umidade
V_a	velocidade de amostragem de material particulado
V_e	velocidade de escoamento do gás
V_g	velocidade de gás na garganta do Venturi
V_j	velocidade do jato líquido
$\mu g/m^3$	micrograma por metro cúbico
μm	micrômetro
cm	centímetro
ft/min	pés por minuto
ha	hectare
L/min	litro por minuto
m	metro
m/s	metro por segundo
m^3/min	metro cúbico por minuto
mg/m^3	miligrama por metro cúbico
mL/min	mililitro por minuto
mm	milímetro
nm	nanômetro
ppm	partes por milhão
ρ_l	densidade do líquido
ρ_g	densidade do gás
s	segundo
% v/v	porcentagem volumétrica ou composição volumétrica

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE QUADROS.....	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES.....	x
SUMÁRIO.....	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA.....	4
3.1.1. Poluentes atmosféricos: conceito e classificação	4
3.1.2. Poluentes atmosféricos: padrões de qualidade do ar.....	6
3.2. BIOMASSA	10
3.2.1. Fontes de biomassa	11
3.2.1.1. Resíduos agrícolas	12
3.2.1.2. Resíduos florestais e resíduos madeireiros.....	13
3.2.2. Caracterização da biomassa	15
3.2.2.1. Análise química imediata de uma biomassa	15
3.2.2.2. Poder calorífico de uma biomassa	17
3.2.3. Processos de transformação da biomassa em energia	19
3.2.4. Queima da biomassa – processo de combustão direta.....	21
3.2.5. Queima da biomassa – emissão de poluentes.....	23
3.2.6. Queima da biomassa – efeitos à saúde humana	24
3.2.7. Queima da biomassa – amostragem de material particulado	25
3.2.7.1. Estudos recentes sobre a emissão e amostragem de material particulado...	28
3.2.8. Queima da biomassa – amostragem de gases.....	37
3.2.8.1. Estudos recentes sobre a emissão e amostragem de gases	38
3.2.9. Queima da biomassa – controle de material particulado e gases	43
3.2.9.1. Trajetória do jato líquido na corrente gasosa.....	47
3.2.9.2. Eficiência de coleta de material particulado em um lavador Venturi	49

3.2.9.3. Eficiência de coleta de gases em um lavador Venturi.....	51
3.2.9.4. Estudos recentes sobre a eficiência de coleta de material particulado e de gases poluentes em um lavador Venturi.....	51
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	61
4.1. MATERIAIS	61
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA.....	62
4.2.1. Análise química imediata.....	62
4.2.1.1. Preparo da amostra.....	62
4.2.1.2. Teor de umidade.....	63
4.2.1.3. Teor de materiais voláteis	63
4.2.1.4. Teor de cinzas	64
4.2.1.5. Teor de carbono fixo	64
4.2.2. Poder calorífico superior	65
4.3. AMOSTRAGEM DE MATERIAL PARTICULADO	66
4.3.1. Local de amostragem	66
4.3.2. Instrumento de amostragem.....	70
4.4. AMOSTRAGEM DE GASES.....	73
4.4.1. Local e instrumento de amostragem	74
4.5. CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO E GASES POLUENTES	75
4.5.1. Local e equipamento de controle	75
4.5.2. Método de controle	78
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	80
5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS	80
5.2. QUEIMA DE BIOMASSA – AMOSTRAGEM DE MATERIAL PARTICULADO.....	87
5.2.1. Bagaço de cana-de-açúcar	88
5.2.2.1. Influência do tempo de queima na emissão de material particulado	88
5.2.2.2. Influência do diâmetro das partículas na emissão de material particulado ..	90
5.2.2. Casca de café.....	94
5.2.2.1. Influência do tempo de queima na emissão de material particulado	95
5.2.2.2. Influência do diâmetro de partícula na emissão de material particulado	96
5.2.3. Casca de arroz.....	99
5.2.3.1. Influência do tempo de queima na emissão de material particulado	100
5.2.3.2. Influência do diâmetro de partícula na emissão de material particulado ..	101
5.2.4. Resíduos madeireiros (cavacos de eucalipto e de pinus).....	104

5.2.4.1. Influência do tempo de queima na emissão de material particulado	105
5.2.4.2. Influência do diâmetro das partículas na emissão de material particulado	107
5.3. QUEIMA DE BIOMASSA – AMOSTRAGEM DE GASES	112
5.3.1. Bagaço de cana-de-açúcar	112
5.3.2. Casca de café	115
5.3.3. Casca de arroz	118
5.3.4. Resíduos madeireiros (cavacos de eucalipto e de pinus)	121
5.4. QUEIMA DE BIOMASSA – CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO E GASES	124
5.4.1. Bagaço de cana-de-açúcar	125
5.4.1.1. Efeito da vazão de líquido na eficiência global média de coleta de material particulado	125
5.4.1.2. Efeito da razão líquido-gás na eficiência global média de coleta de material particulado	127
5.4.1.3. Efeito da vazão de líquido na eficiência global média de coleta de gases	128
5.4.2. Casca de café	129
5.4.2.1. Efeito da vazão de líquido na eficiência global média de coleta de material particulado	129
5.4.2.2. Efeito da razão líquido-gás na eficiência global média de coleta de material particulado	131
5.4.2.3. Efeito da vazão de líquido na eficiência global média de coleta de gases	132
5.4.3. Casca de arroz	133
5.4.4. Cavaco de eucalipto	135
5.4.5. Cavaco de pinus	137
5.4.5.1. Efeito da vazão de líquido na eficiência global média de coleta de material particulado	137
5.4.5.2. Efeito da razão líquido-gás na eficiência global média de coleta de material particulado	138
5.4.5.3. Efeito da vazão de líquido na eficiência global média de coleta de gases	138
6. CONCLUSÕES	140
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143

1. INTRODUÇÃO

As atividades do homem têm contribuído, ao longo da história, no conjunto de emissões para a atmosfera, com impactos variados na saúde pública, no bem estar das comunidades e no meio ambiente. As emissões provenientes dessas atividades, como na queima de madeira e diversos outros tipos de biomassa e de combustíveis fósseis, nos processos industriais, nas atividades agropecuárias, para atendimento aos padrões de consumo e de produção da sociedade, variam ao longo do tempo, em função de um conjunto de fatores culturais e tecnológicos.

De acordo com Philippi Júnior (2005), a gestão da qualidade do ar tem papel importante nas ações que visem à promoção da saúde e à proteção ambiental. A gestão da qualidade do ar inclui as seguintes etapas:

- 1) Processo de avaliação da qualidade do ar: pode ser feito por meio da realização de monitoramento da qualidade do ar que engloba a coleta de dados ou amostragem sistemática e a análise dos dados coletados com base em normas ou padrões de qualidade do ar;
- 2) Planejamento estratégico na formulação de políticas e tomada de decisões: inicia-se com o atendimento a reclamações de incômodos causados pela poluição do ar, levando posteriormente ao estudo de poluentes atmosféricos e seus efeitos e à formulação de padrões de qualidade do ar;
- 3) Desenvolvimento de um conjunto de ações de caráter preventivo e de medidas de controle da poluição: utilização de recursos e ações que visam evitar e reduzir os poluentes para padrões previamente aceitos como adequados (medidas preventivas) e/ou instalar equipamentos adicionais com a finalidade específica de coletar os poluentes, evitando que eles sejam lançados na atmosfera (medidas corretivas).

Os principais poluentes do ar provêm na sua maioria da queima de combustíveis, para fins de transporte e produção industrial. Dentre os vários tipos de combustíveis disponíveis para consumo, recebe cada vez mais destaque a utilização da biomassa, como os resíduos agrícolas, os resíduos da indústria madeireira, entre outros, pois apresentam impactos ambientais muito menores que o uso de combustíveis fósseis e tecnologias flexíveis para suprir energéticos tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transportes.

O Brasil é um país que reúne inúmeras vantagens que o tornam capaz de atuar como líder no mercado mundial de produtos agrícolas, agroindustriais, silviculturais e, com isso, possui grande quantidade de biomassa energética na forma de resíduos dessas atividades.

Com a crescente oferta dessa biomassa como fonte de geração de energia nas diversas atividades industriais, cresce também a preocupação das indústrias em investir no monitoramento e controle de suas emissões para a atmosfera, pois durante a queima de biomassa são emitidos, além dos gases de combustão, partículas finas conhecidas como particulados, as quais muito contribuem para o desencadeamento de sérios problemas de saúde ao homem, já que atingem o trato respiratório causando sérios danos, além dos danos ambientais (COSTA et al., 2009).

Neste contexto, este trabalho procurou, primeiramente, caracterizar alguns tipos de biomassa mais utilizados como fontes de energia pelas indústrias no Brasil tais como o bagaço de cana-de-açúcar, a casca de café, a casca de arroz e os cavacos tipo maravalha de *Eucalyptus* e *Pinus*; posteriormente, quantificar (amostrar) os poluentes particulados e gases emitidos a partir de sua queima para obtenção de energia e, por último, controlar esses poluentes utilizando um lavador de gases Venturi. Este equipamento de limpeza pode ser utilizado tanto para material particulado quanto para gases poluentes.

Visto que há poucos trabalhos na literatura envolvendo a amostragem de partículas menores que 2,5 μm provenientes da queima de biomassa e o controle por um lavador Venturi dos gases poluentes provenientes da queima de biomassa, este presente trabalho propôs-se a suprir estas lacunas.

2. OBJETIVOS

Este trabalho procurou seguir as orientações para uma boa gestão da qualidade do ar, ou seja, realizar as seguintes etapas:

- 1) Realizar o monitoramento das emissões de gases e particulados para a atmosfera com a queima de diversos tipos de biomassa utilizados pelas indústrias;
- 2) Analisar os dados coletados com base na legislação ambiental nacional e internacional;
- 3) Analisar o controle (medida corretiva) dos poluentes emitidos através de um lavador de gases do tipo Venturi.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura a respeito da poluição atmosférica (conceito, fontes, poluentes e padrões de qualidade) e da biomassa (conceito, energia, fontes, caracterização), além das amostragens de material particulado e de gases provenientes da queima dessa biomassa e seu controle.

3.1. POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A poluição atmosférica origina-se do aumento crescente da concentração de componentes indesejáveis na atmosfera, denominados poluentes, que podem afetar negativamente a saúde, a sobrevivência ou as atividades humanas e de outros organismos vivos.

Basicamente, há dois tipos de fontes de poluição atmosférica: as *estacionárias*, geradas a partir de indústrias, dos próprios processos químicos, dos processos de queima de combustíveis e resíduos, da movimentação e estocagem de combustíveis, etc; e as *móveis*, que são provenientes dos veículos automotores.

Além dessa classificação há ainda, de acordo com Lora (2002) e Philippi Júnior (2005), as fontes *naturais*, causadas por processos naturais, tais como: erupção de vulcão, suspensão de poeira pela ação dos ventos, odores provenientes de processos de decomposição de matéria orgânica, entre outros; e as fontes *antropogênicas ou antrópicas*, provocadas pela ação do homem e incluem os resíduos gasosos da queima de combustíveis fósseis, incineração, inseticidas, efluentes gasosos de processos industriais, queima de biomassa, etc.

3.1.1. Poluentes atmosféricos: conceito e classificação

Poluente atmosférico é qualquer forma de matéria sólida, líquida ou gasosa e de energia que, presente na atmosfera, pode torná-la poluída. O Quadro 1 apresenta os principais poluentes atmosféricos, suas fontes e os efeitos causados à saúde e ao meio ambiente.

Quadro 1 - Fontes e efeitos dos principais poluentes atmosféricos

Poluente	Fontes Principais	Efeitos na Saúde	Efeitos no Ambiente
Material Particulado (PM)	Processos industriais, veículos a diesel, poeira da rua	Aumento da incidência de doenças respiratórias e bronquite crônica	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade
Dióxido de enxofre (SO ₂)	Queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel	Agravamento das doenças respiratórias e cardiovasculares, em concentrações altas pode ser fatal	Formação de chuva ácida, corrosão de materiais e danos à vegetação
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	Processos industriais, processos de combustão, veículos automotores	Aumento da sensibilidade à asma e bronquite, diminuição da resistência a infecções, alterações celulares	Pode levar à formação de chuva ácida e danos à vegetação
Monóxido de carbono (CO)	Combustão incompleta em veículos automotores	Diminui a oxigenação do sangue, causa tonturas e vertigens e pode ser fatal em altas concentrações	Efeito estufa
Ozônio (O ₃)	Luz solar sobre compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio	Irritação nos olhos e vias respiratórias, diminuição da capacidade pulmonar	Danos à colheita, vegetação natural e plantações agrícolas
Compostos orgânicos voláteis (COV) ¹	Queima incompleta dos combustíveis	Aumento da incidência de câncer, irritação nos olhos, pele e aparelho respiratório	Danos à vegetação

Fonte: (PHILIPPI JÚNIOR, 2005)

As principais classificações dos poluentes atmosféricos, de acordo com Dashefsky (2001), Lora (2002) e Philippi Júnior (2005) são quanto à sua formação e quanto ao seu estado físico:

1) Quanto à sua formação:

a) Poluentes primários: aqueles emitidos diretamente pelas fontes, como por exemplo, as emissões provenientes de veículos movidos à gasolina que englobam o CO₂, H₂O, CO, NO_x, SO_x, hidrocarbonetos, entre outros.

b) Poluentes secundários: aqueles poluentes não emitidos diretamente por fontes, porém formados a partir de reações fotoquímicas ocorridas na troposfera² entre os poluentes

¹ Compostos orgânicos voláteis (COV) = hidrocarbonetos do tipo aldeídos, cetonas, solventes clorados, substâncias refrigerantes, etc. São gases na temperatura ambiente. Alguns deles são tóxicos e carcinogênicos (Dashefsky, 2001 e Lora, 2002).

² Troposfera = É a camada da atmosfera em que vivemos e respiramos. Ela vai do nível do mar até 15 km de altura. É nesta camada que ocorrem os fenômenos climáticos (chuvas, formação de nuvens, relâmpagos) e que residem todas as formas de vida do planeta. É também na troposfera que ocorre a poluição do ar. Os aviões de transporte de cargas e passageiros voam nesta camada (LORA, 2002 e PHILIPPI JÚNIOR, 2005).

primários. Assim, tem-se o O_3 e o Peroxiacetilnitrato (PAN). O primeiro é formado pela transformação fotoquímica (sob ação de raios ultravioleta) do NO_2 em NO e oxigênio atômico. Este oxigênio atômico reage com O_2 para formar o O_3 . Com o PAN ocorre a reação entre os NO_x e os hidrocarbonetos presentes na atmosfera.

2) Quanto ao seu estado físico:

a) Material particulado: qualquer substância, à exceção da água líquida, que existe como líquido ou sólido na atmosfera e tem dimensões microscópicas ou submicroscópicas, porém maiores que as dimensões moleculares. O material particulado frequentemente atrai e carrega substâncias químicas através do ar. De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2011), o material particulado pode ser classificado de acordo com seu diâmetro aerodinâmico³ em partículas totais em suspensão – PTS (com diâmetro aerodinâmico inferior a 50 μm) e partículas inaláveis – PI (com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 μm). Estas últimas podem, ainda, ser divididas em partículas inaláveis grossas (com diâmetro aerodinâmico entre 2,5 e 10 μm) e partículas inaláveis finas (com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 μm). As partículas finas, devido ao seu tamanho diminuto, podem atingir os alvéolos pulmonares, já as grossas ficam retidas na parte superior do sistema respiratório.

b) Gases: poluentes na forma molecular, como por exemplo, CO, CO_2 , NO_x , etc.

3.1.2. Poluentes atmosféricos: padrões de qualidade do ar

A determinação sistemática da qualidade do ar é limitada a um número pequeno de poluentes por serem de maior ocorrência e pelos efeitos adversos que causam ao meio ambiente. Segundo Derisio (1992), um padrão de qualidade do ar define legalmente um limite máximo para a concentração de um componente atmosférico que garanta a proteção da saúde e do bem-estar das pessoas.

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), pela Resolução nº 03/90, estabeleceu os padrões nacionais de qualidade do ar (Tabela 1). Essa resolução inclui

³Diâmetro aerodinâmico = Diâmetro de uma partícula esférica com densidade unitária que possui a mesma velocidade terminal que a partícula considerada (IBAMA, 2011).

normas relativas a padrões primários e secundários. Os padrões primários podem ser entendidos como níveis máximos toleráveis de poluentes atmosféricos e, se ultrapassados, podem afetar a saúde da população. Os padrões secundários constituem os níveis desejados de concentração dos poluentes (LORA, 2002).

Tabela 1 - Padrões nacionais de qualidade do ar estabelecidos pelo CONAMA

Poluente	Tempo de Amostragem	Padrão Primário (µg/m³)	Padrão Secundário (µg/m³)
Partículas totais em suspensão (PTS)	24 horas [*]	240	150
	MGA ^{**}	80	60
Partículas inaláveis (PI)	24 horas [*]	150	150
	MAA ^{***}	50	50
Dióxido de enxofre (SO ₂)	24 horas [*]	365	100
	MAA ^{***}	80	40
Monóxido de carbono (CO)	1 hora [*]	40000 (35ppm)	40000 (35ppm)
	8 horas [*]	10000 (9ppm)	10000 (9ppm)
Ozônio (O ₃)	1 hora [*]	160	160
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	1 hora [*]	320	190
	MAA ^{***}	100	100

*não deve ser excedido mais que uma vez ao ano;

**média geométrica anual;

***média aritmética anual.

Fonte: Resolução CONAMA nº 03/90

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA) (2012), a Organização Mundial da Saúde (OMS) estabeleceu, também com o objetivo de qualificar o ar, em 2005, padrões de qualidade do ar. Esses padrões variam de acordo com a abordagem adotada para balancear riscos à saúde, viabilidade técnica, considerações econômicas e vários outros fatores políticos e sociais, que por sua vez, dependem do nível de desenvolvimento e da capacidade de cada país de gerenciar a qualidade do ar. As diretrizes recomendadas por essa organização levam em conta esta heterogeneidade e reconhecem que ao formularem políticas de qualidade do ar, os governos devem considerar cuidadosamente suas características locais antes de adotarem os valores propostos como padrões nacionais.

De acordo com Saúde em movimento (2012), todos os grandes centros urbanos do

Brasil estão fora dos novos padrões mundiais de qualidade do ar anunciados pela OMS (Tabela 2).

Tabela 2 - Padrões de qualidade do ar estabelecidos pela OMS

Poluente	Tempo de Amostragem	Padrão estabelecido ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Partículas inaláveis (PI)	24 horas*	50
Dióxido de enxofre (SO_2)	24 horas*	20
Ozônio (O_3)	1 hora*	100

*não deve ser excedido mais que uma vez ao ano.

Fonte: (SAÚDE EM MOVIMENTO, 2012)

Os demais poluentes encontrados na Tabela 1 e não encontrados na Tabela 2 não sofreram alterações. Especificamente com relação às partículas inaláveis (PI), a OMS realizou um estudo mais apurado (pela primeira vez para material particulado) e estabeleceu padrões (Tabela 3):

Tabela 3 - Padrões de qualidade do ar para partículas inaláveis estabelecidos pela OMS

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão estabelecido ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Partículas inaláveis (PI)	Partículas inaláveis finas -	24 horas*
	$\text{PM}_{2,5}$	MAA**
		25
		10
	Partículas inaláveis grossas -	24 horas*
	PM_{10}	MAA**
		50
		20

*não deve ser excedido mais que uma vez ao ano;

**média aritmética anual.

Fonte: (WHO, 2012)

Com relação aos limites de emissão para fontes fixas de geração de combustão, ou seja, para processos industriais de geração de calor, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através da Resolução nº 382/06 estabeleceu os valores constantes nas Tabelas 4

e 5 para as biomassas estudadas neste trabalho.

Tabela 4 – Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de derivados de madeira (cavaco de eucalipto e cavaco de pinus para este trabalho)

Poluente	Potência térmica nominal do queimador (MW)	Limite de emissão (mg/Nm ³)
Material particulado (MP)	Menor que 10*	730 (730000 µg/m ³)
	Entre 10 e 30	520
	Entre 30 e 70	260
	Maior que 70	130
Monóxido de carbono (CO)	Até 0,05	6500
	Entre 0,05 e 0,15	3250
	Entre 0,15 e 1,0*	1700 (1,7 ppm)
	Entre 1,0 e 10	1300
Óxidos de nitrogênio (NOx)	Menor que 10*	n.a.**
	Entre 10 e 30	650
	Entre 30 e 70	650
	Maior que 70	650

* Potência do queimador deste trabalho = 0,36 MW (menor que 10 MW)

** não aplicável

Fonte: Resolução CONAMA nº 382/06

Tabela 5 - Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de bagaço de cana-de-açúcar (valores podem ser considerados para as cascas de café e de arroz deste trabalho)

Poluente	Potência térmica nominal do queimador (MW)	Limite de emissão (mg/Nm ³)
Material particulado (MP)	Menor que 10*	280 (280000 µg/m ³)
	Entre 10 e 75	230
	Maior que 75	200
Monóxido de carbono (CO)	Até 0,05	6500
	Entre 0,05 e 0,15	3250
	Entre 0,15 e 1,0*	1700 (1,7 ppm)
	Entre 1,0 e 10	1300
Óxidos de nitrogênio (NOx)	Menor que 10*	n.a.**
	Entre 10 e 75	350
	Maior que 75	350

* Potência do queimador deste trabalho = 0,36 MW (menor que 10 MW)

** não aplicável

Fonte: Resolução CONAMA nº 382/06

3.2. BIOMASSA

Segundo Landim et al. (2001), a biomassa pode ser considerada como sendo toda a matéria orgânica capaz de, ao ser queimada, decomposta ou reciclada, gerar direta ou indiretamente, alguma forma de energia. Desse modo, resíduos agrícolas, rejeitos de animais, dejetos humanos, resíduos urbanos orgânicos e resíduos de plantas como o bagaço de cana e os provenientes dos processos de beneficiamento da madeira, podem ser utilizados como combustível em queimadores de biomassa.

A biomassa é uma fonte renovável para produção de energia em escala suficiente para desempenhar um papel expressivo no desenvolvimento de programas vitais de energias renováveis e na criação de uma sociedade ecologicamente mais consciente.

Ainda, a biomassa oferece flexibilidade, pois tem várias aplicações e pode ser usada na produção de diversos combustíveis. Ela pode ser queimada para produzir eletricidade ou calor, ou pode ser convertida em combustíveis sólidos, gasosos e líquidos por meio de tecnologias de conversão como a fermentação, empregada para produzir alcoóis, a digestão bacteriana, para produzir biogás, e a gaseificação, para produzir um substituto do gás natural (ROSILLO-CALLE; BAJAY; ROTHMAN, 2005).

Embora seja uma fonte de energia primitiva, apenas há pouco mais de 100 anos a biomassa começou a perder cada vez mais sua liderança histórica para a energia do carvão, e depois, com o crescimento contínuo do petróleo e do gás natural, a utilização da biomassa foi reduzida praticamente às residências particulares em regiões agrícolas (ROSILLO-CALLE; BAJAY; ROTHMAN, 2005 e CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

A produção de energia no século 20 foi dominada por combustíveis fósseis⁴ (carvão, petróleo e gás natural) que representavam, ainda no século 21, cerca de 80% de toda a energia produzida no mundo. Além dos combustíveis fósseis, energia nuclear e energia hidrelétrica tinham pequenas participações, bem como as novas fontes renováveis de energia (solar, eólica, geotérmica) que são as mais atraentes do ponto de vista ambiental. No total, todas representavam 10% da produção de energia. Os outros 10% se originavam da biomassa (GOLDEMBERG, 2009).

A maioria dos países, em maior ou menor intensidade, está promovendo ações para que as energias renováveis⁵ tenham participação significativa em suas matrizes energéticas. A

⁴Combustíveis fósseis = carvão, petróleo, gás natural. São considerados não-renováveis (energia não-renovável), uma vez que não estão sendo repostos e irão se esgotar com o tempo (DASHEFSKY, 2001).

⁵Energia renovável = energia que vem dos recursos naturais como o vento, sol, chuva, marés, etc. que são

motivação para essa mudança de postura é a necessidade de redução do uso de derivados do petróleo e, conseqüentemente, da dependência energética desses países em relação aos países exportadores de petróleo. Além disso, a redução no consumo dos derivados do petróleo também diminui a emissão de gases promotores do efeito estufa (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Quando produzida de forma eficiente e sustentável, a energia da biomassa traz inúmeros benefícios ambientais e sociais em comparação com os combustíveis fósseis. Esses benefícios incluem o melhor manejo da terra, a criação de empregos, o fornecimento de vetores energéticos modernos a comunidades rurais, a redução dos níveis de emissão de CO₂, o controle de resíduos e a reciclagem de nutrientes (ROSILLO-CALLE; BAJAY; ROTHMAN, 2005).

Nesse sentido, conforme o Plano Nacional de Energia 2030 publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) (2012), que traz dados energéticos de hoje e faz previsões até 2030, a competitividade da biomassa cana-de-açúcar para fins energéticos no Brasil é o principal elemento que justifica a expansão expressiva da produção de etanol hoje, inclusive com excedentes exportáveis. E, neste sentido, há um aumento da produção dos demais derivados da cana-de-açúcar, em especial da biomassa destinada à geração de energia elétrica, com destaque para o crescimento do consumo interno de energia no setor de transportes em face, principalmente, do aumento da frota de veículos leves que utilizam mais de um combustível. Nessas condições, em 2030, segundo o Plano, a cana e seus derivados passarão a ser a segunda fonte de energia mais importante da Matriz Energética Brasileira, com 18,5% de participação, inferior apenas à participação do petróleo e derivados.

Além da cana-de-açúcar há, ainda segundo o Plano Nacional de Energia 2030, outras três vertentes da agroenergia: as florestas energéticas cultivadas, os resíduos agroflorestais e o biodiesel. A experiência exitosa do álcool encoraja a pensar em ampliar a utilização desses outros energéticos, que permitem a associação com políticas de cunho social, ambiental e econômico.

3.2.1. Fontes de biomassa

Segundo Cortez, Lora e Gómez (2008), a biomassa pode ser obtida de vegetais lenhosos,

como é o caso da madeira e seus resíduos de colheita (resíduos florestais) e de processamento (resíduos madeireiros) e de resíduos orgânicos, nos quais encontram-se os resíduos agrícolas, urbanos e de animais. Assim como também se pode obter biomassa dos biofluidos, como os óleos vegetais (mamona, soja, etc.).

3.2.1.1. Resíduos agrícolas

Os resíduos agrícolas são aqueles resultantes das atividades da colheita dos produtos agrícolas cultivados para a alimentação humana. São constituídos basicamente de palha, folhas, cascas e caules.

Segundo Nonhebel (2007), a biomassa mais significativa para produção de energia é a obtida de resíduos agrícolas.

O Brasil é um grande produtor agrícola, sendo que nos últimos anos a área plantada e a produção tiveram um crescimento importante. Entretanto, segundo Cortez, Lora e Gómez (2008), esses resíduos vegetais não são totalmente aproveitados para produção de energia, ou seja, parte dos resíduos não utilizados na produção de energia é destinada para a ração animal e para as áreas de medicina e fertilizantes.

a) Cana-de-açúcar

Rosillo-Calle; Bajay e Rothman (2005) e Goldemberg (2009) já mencionavam o que ainda hoje ocorre com a cana-de-açúcar no Brasil: utilização prioritária na produção de açúcar e álcool combustível (etanol), sendo este último o maior sucesso comercial dos combustíveis de biomassa. Entretanto, há um grave problema com a cultura da cana no Brasil: a queima antes da colheita. Essa queima causa problemas ambientais, principalmente a poluição do ar, e já existem leis federais e estaduais a controlando, mesmo que nem sempre respeitadas.

b) Café

Segundo Webioenergias (2011), há mais no café do que o seu sabor: o processamento dos grãos gera um resíduo que pode ser utilizado como fonte de energia, diminuindo custos e reduzindo a poluição ambiental.

Durante o cultivo do café, aproximadamente dois milhões de toneladas de cascas de grãos são produzidas por ano no Brasil. Esse subproduto normalmente vai para o lixo ou é usado para a forração dos terrenos dos cafezais. Mas, a casca do café tem um potencial

energético que pode, em alguns casos, torná-la substituta do carvão vegetal, sendo uma opção mais barata e ecologicamente correta para empresas que usam a madeira na geração de energia.

A casca tem um potencial energético próximo ao da madeira. Experimentos permitiram identificar que a queima de cada quilo do material seco gera 16467 kJ/kg (PCS), número considerado excelente se comparado ao carvão vegetal, principal fonte usada pelas empresas, que produz 20649 kJ/kg (PCS) (WEBIOENERGIAS, 2010).

c) Arroz

A casca de arroz ou palha de arroz é um resíduo agroindustrial, subproduto do beneficiamento do arroz, de extrema importância no Brasil, tendo em vista a produção nacional que passa dos 10 milhões de toneladas de casca (IBGE, 2013).

A sua utilização para geração de energia elétrica, além de proporcionar melhorias ao meio ambiente, pode agregar valor ao arroz produzido pelas indústrias, pois a cinza gerada pela queima controlada de sua casca pode ser usada em vários ramos industriais, tais como eletrônica, construção civil, cerâmica, química, entre outros. Além disso, a queima controlada da casca de arroz (combustão direta) pode ser utilizada diretamente na secagem do arroz com o emprego dos gases quentes emitidos com a queima (MAYER et al., 2006).

Outro processo de aproveitamento energético da casca de arroz é a densificação, mediante briquetagem⁶, pois soluciona um dos principais problemas na utilização da casca de arroz que é a sua baixa densidade. Além disso, a densificação eleva o poder calorífico da casca em torno de 2,5 vezes (MAYER et al., 2006).

3.2.1.2. Resíduos florestais e resíduos madeireiros

Os resíduos florestais são constituídos por todo aquele material que é deixado para trás na coleta da madeira, tanto em florestas e bosques naturais como em reflorestamento. Os resíduos madeireiros são resultado da serragem e aparas produzidas no processamento da

⁶Briquetagem = aglomeração de partículas finas com auxílio de pressão. Destacou-se como método adequado ao processamento desses materiais e tornou-se o método pioneiro de aglomeração. A primeira patente relacionada à briquetagem foi concedida a William Easby, em 1848. O processo desenvolvido por Easby possibilitava a formação de aglomerados sólidos de tamanho e forma variados, a partir de frações finas de qualquer tipo de carvão, por meio da pressão exercida sobre esse material. Por esse processo, materiais de pequeno ou quase nenhum valor agregado podiam ser transformados em um produto de elevado valor combustível para máquinas a vapor, forjas, culinária e outras aplicações (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004).

madeira (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

O Brasil está entre os melhores exemplos de potencialidade para o uso de resíduos madeireiros para a geração de energia térmica e elétrica, em co-geradoras, que podem ser usadas no local de geração (energia térmica) ou em outras regiões, longe do local de geração (energia elétrica) (REFERÊNCIA, 2005).

a) Eucalipto

O gênero *Eucalyptus* é originário da Austrália e conta com mais de 700 espécies. Nos últimos anos o gênero tem sido apontado como uma das melhores opções para a produção de energia devido, principalmente, ao grande número de espécies (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

b) Pinus

O gênero *Pinus* engloba mais de 100 espécies com grande potencial a ser explorado, sendo que as mais difundidas são: *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.

No Brasil, espécies desse gênero vêm sendo plantadas há mais de um século, tendo sido, inicialmente introduzidas para fins ornamentais. Somente a partir da década de 1960 é que se iniciou o plantio de pinus em escala comercial, principalmente nas regiões sul e sudeste do país.

A sua madeira é usada pelas indústrias de madeira, de serrados e laminados, de chapas, de resina e de celulose e papel (AGUIAR; SOUSA; SHIMIZU, 2011).

Além desses usos, segundo Brand (2008), os galhos, serragem, cavacos e maravalha de pinus também são muito utilizados como recursos energéticos, as chamadas florestas energéticas.

As biomassas citadas foram escolhidas porque são realmente ou potencialmente utilizadas como fontes de energia, principalmente no Brasil. Em especial, a queima do bagaço de cana-de-açúcar por algumas destilarias já é capaz de suprir suas necessidades energéticas sem a necessidade de compra da rede fornecedora de energia. A casca de arroz já é queimada em alguns estados do sul do Brasil para fornecimento de energia. Os cavacos de madeira aparecem em grande quantidade como resultado do processamento da madeira e possuem alto potencial para produção de energia através da sua queima. E, por último, devido à grande produção de café no Brasil há também muita casca resultante que poderia ser utilizada para produção de energia.

3.2.2. Caracterização da biomassa

Para poder determinar a potencialidade (eficiência) de uma biomassa como combustível, seu comportamento e compostos gerados durante a combustão deve se conhecer as suas características químicas e térmicas fundamentais. Essas características fundamentais são a composição imediata (umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo), determinada por análise química imediata e poder calorífico (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Segundo Sánchez (2010), a caracterização da biomassa deve ainda ser baseada em seu uso e trazer elementos para a compreensão das propriedades determinantes, particulares a cada aplicação.

3.2.2.1. Análise química imediata de uma biomassa

A composição química imediata de uma biomassa refere-se ao conteúdo percentual de umidade (U), materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF).

a) Umidade

Há duas formas de umidade importantes para a biomassa: a intrínseca e a extrínseca. A primeira traz a umidade do material sem a influência das condições meteorológicas e a última considera estas condições. Em termos práticos é o teor de umidade extrínseca que é relevante, já que o intrínseco normalmente só é alcançado sob condições de laboratório (MCKENDRY, 2002). Pode-se dizer que seu teor é inversamente proporcional ao poder calorífico do combustível, ou seja, a umidade dificulta a ignição e a queima da biomassa (influenciam no comportamento da pirólise da biomassa, o primeiro passo dos processos de combustão) e também aumenta os produtos indesejáveis da combustão (gases poluentes e material particulado) (GONÇALVES e SOARES NETO, 2013).

Segundo Fernandes (2009), o teor de umidade ótimo para minimizar as emissões de material particulado durante a combustão da madeira (e também da biomassa) está no máximo entre 20 e 30%.

Segundo Cunha et al. (1989), quanto maior o conteúdo de umidade da madeira, menor é o seu poder de combustão, devido ao processo de evaporação da umidade, o qual absorve energia do processo de combustão.

b) Materiais voláteis

São os gases produzidos pelo processo de pirólise (decomposição térmica de materiais orgânicos, na ausência de oxigênio) da biomassa. São os hidrocarbonetos leves, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio, umidade, metano, entre outros. Seu teor expressa a facilidade de ignição e queima do combustível, e influi muito no perfil de escoamento gasoso no forno e na velocidade química de reação, ou seja, os voláteis têm um papel importante durante a ignição e as etapas iniciais de combustão da biomassa, além de determinarem a estabilidade da chama durante a combustão. Quanto maior o teor de materiais voláteis, maior a velocidade de queima e menor a estabilidade da chama (APOSTILA... 2005, CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008 e GONÇALVES; SOARES NETO, 2013). Além disso, quanto maior o poder calorífico de um combustível maior o seu teor de materiais voláteis.

Williams et al. (2012), descrevem que o teor de voláteis da biomassa contribui normalmente com cerca de 70% do calor da combustão, que é comparado com cerca de 36% para voláteis durante a combustão do carvão. Portanto, concluem estes autores, a combustão de voláteis domina em processos de combustão de biomassa.

Segundo McKendry (2002), o teor de voláteis é a parte impulsionada como um gás por aquecimento, ou seja, é quantificado medindo-se a fração de massa da biomassa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 850°C num forno mufla por 6 minutos.

c) Cinzas

São os resíduos resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidações dos inorgânicos. Com isso, as cinzas são resultado da combustão da biomassa, processada a altas temperaturas, tornando-se necessário o seu conhecimento para evitar operações inadequadas. As cinzas podem conter elementos metálicos já presentes no combustível, argila, areia e sais que possam estar na biomassa e ainda por solos misturados à biomassa durante a colheita ou manuseio. Dentre os principais constituintes das cinzas destacam-se o cálcio, potássio, magnésio, sulfato, fosfato, carbonato, silicato e pequenas quantidades de outros elementos. Em alta concentração podem diminuir o poder calorífico, causar perda de energia e também afetar a transferência de calor sendo, portanto, necessária a sua remoção (RENDEIRO et al., 2008 e KLAUTAU, 2008).

d) Carbono fixo

Trata-se da massa restante após a liberação dos materiais voláteis, excluindo as cinzas e a umidade. Compõe-se principalmente de carbono, embora possa conter outros elementos não liberados durante a volatilização (MCKENDRY, 2002).

Com relação a biomassas semelhantes às estudadas neste presente trabalho (cavaco de eucalipto, cavaco de pinus, casca de café, casca de arroz e bagaço de cana-de-açúcar), autores como Souza et al. (2007), Sánchez (2010) e Gonçalves e Soares Neto (2013) realizaram análises químicas imediatas chegando aos resultados constantes na Tabela 6.

Tabela 6 - Análises químicas imediatas realizadas por diferentes autores para biomassas semelhantes às estudadas neste trabalho

Biomassa	U(%)	MV(%)	CZ(%)	CF (%)
Bagaço de cana-de-açúcar	6,4 ^b	86,4 ^b	4,4 ^b	9,2 ^b
Borra de café	5,70 ^b	83,5 ^b	2,6 ^b	13,90 ^b
Casca de arroz	10,61 ^a	64,26 ^a	23,84 ^a	11,9 ^a
	10,0 ^b	72,2 ^b	15,80 ^b	12,0 ^b
Serragem de <i>E. grandis</i>	12,90 ^b	84,20 ^b	0,60 ^b	15,20 ^b
<i>Pinus elliottii</i>	12,02 ^c	87,44 ^c	2,8 ^c	9,76 ^c

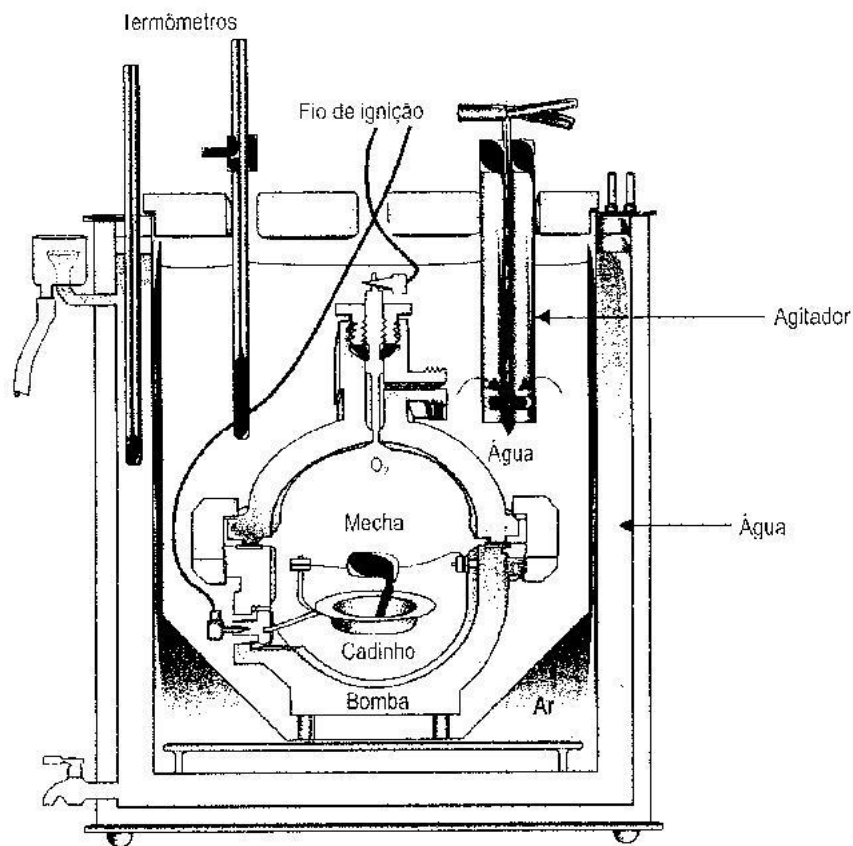
Fonte: ^a (SOUZA et al., 2007); ^b (SÁNCHEZ, 2010); ^c (GONÇALVES e SOARES NETO, 2013)

3.2.2.2. Poder calorífico de uma biomassa

Com relação ao poder calorífico, na análise de um combustível (no caso a biomassa), é importante levar em consideração o seu poder calorífico, que pode ser definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa do combustível, estequiometricamente. O valor quantitativo desse parâmetro pode variar muito de acordo com o teor de umidade da biomassa (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008 e HILSDORF et al., 2009).

O poder calorífico superior (PCS), que considera a água formada na combustão no estado líquido, pode ser determinado utilizando-se uma bomba calorimétrica inserida num sistema calorimétrico (Figura 1). Este PCS é determinado a volume constante e pode ser convertido para poder calorífico inferior (PCI) por métodos analíticos conforme a Equação (1). O PCI considera a água formada na combustão no estado vapor, ou seja, não considera o calor latente de condensação da umidade dos produtos da combustão. A diferença entre PCS e PCI é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível e a água de formação obtida a partir da oxidação do hidrogênio do combustível (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008).

Figura 1 – Representação esquemática de um sistema calorimétrico



Fonte: (SÁNCHEZ, 2010)

$$PCI = PCS - 2440 \times (9H + u) \quad (1)$$

Onde:

H = teor de hidrogênio do combustível, kg/kg em base seca

u = teor de umidade do combustível, kg de água/kg de combustível seco

Resultados de poderes caloríficos observados para biomassas semelhantes às estudadas neste trabalho obtidos por Quirino et al. (2005) e Sánchez (2010) encontram-se demonstrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de poderes caloríficos superiores obtidos por diferentes autores para biomassas semelhantes às estudadas neste trabalho

Biomassa	PCS (J/g)
Bagaço de cana-de-açúcar	16700 ^b
Casca de café	21800 ^b
Casca de arroz	15600 ^b
Maravalha de <i>E. grandis</i>	18000 ^b
Maravalha de <i>P. elliottii</i>	20038 ^a

Fonte: ^a (QUIRINO et al., 2005); ^b (SÁNCHEZ, 2010)

3.2.3. Processos de transformação da biomassa em energia

O Brasil é o campeão mundial no uso eficiente de energia de fontes renováveis. Mais de 90% do seu consumo energético provém de usinas hidrelétricas. É o único país a possuir uma rede nacional de combustíveis baseados na biomassa (etanol) (DIAS, 2004).

Para que esse quadro continue e o uso da biomassa seja melhorado no Brasil, é preciso que, além do avanço tecnológico, sejam desenvolvidos modelos de gestão que garantam a sustentabilidade técnica, econômica e ambiental dessa fonte energética.

Existem vários métodos para a transformação de biomassa em energia, embora os mais utilizados sejam os termoquímicos e os biológicos.

Os métodos termoquímicos baseiam-se na utilização de calor como fonte de transformação da biomassa. São métodos desenvolvidos para a conversão da biomassa

residual obtida a partir das atividades agrícolas e florestais e das indústrias de transformação agroalimentar e da madeira. Existem três tipos de processos (que dependem da quantidade de oxigênio presente no momento da transformação) (BRÁS et al., 2006):

a) Combustão direta

A biomassa é submetida a altas temperaturas na presença de oxigênio. É o método tradicional de produção de calor nos processos domésticos e industriais ou de energia elétrica. Quase todos os tipos de biomassa podem ser queimados por combustão direta, sendo os resíduos florestais e agrícolas os mais comuns. Existem vantagens e desvantagens no uso da biomassa de combustão direta. A poluição proveniente da biomassa de combustão direta é um assunto importante, pois produz grandes quantidades de material particulado que contribuem para a poluição do ar (DASHEFSKY, 2001).

b) Pirólise

A biomassa é submetida a temperaturas relativamente baixas na ausência de oxigênio, dando lugar à formação de um resíduo sólido rico em carbono (carvão) e uma fração volátil composta de gases e vapores orgânicos condensáveis (licor pirolenhoso) (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008 e BEENACKERS; BRIDGWATER, 1989).

c) Gaseificação

Processo termoquímico de conversão de um insumo sólido ou líquido num gás com características basicamente combustíveis, através de sua oxidação parcial a temperaturas intermediárias, ou seja, temperaturas acima das recomendadas nos processos de pirólise e abaixo das recomendadas nos processos de combustão. O gás produzido a partir da gaseificação da biomassa tem muitas aplicações práticas, desde a combustão em motores alternativos de combustão interna e turbinas a gás para a geração de energia mecânica e elétrica, para a geração direta de calor, ou como matéria-prima na obtenção de combustíveis líquidos, tais como diesel e gasolina, metanol, etanol, amônia, hidrogênio, e outros produtos químicos, através de processos de síntese química catalítica (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Os métodos biológicos baseiam-se na utilização de diversos tipos de microorganismos que, por sua vez, transformam as moléculas em compostos mais simples, mas com alto valor energético. São exemplos destes métodos (BRÁS et al., 2006):

- a) Fermentação alcoólica para produção de etanol.
- b) Digestão anaeróbia para produção de metano.

Os processos mencionados acima podem ser melhor visualizados na Figura 2.

Figura 2 - Processos de transformação da biomassa em energia



Fonte: (VERDESIO, 2007)

3.2.4. Queima da biomassa – processo de combustão direta

Segundo Carvalho Júnior e McQuay (2007), o processo de combustão pode ser caracterizado por uma reação exotérmica muito rápida entre combustível e oxidante (comburente), acompanhada por liberação de calor, geralmente proporcionada pelos elementos químicos C, H e S presentes no combustível.

Williams et al. (2012) mencionam que a combustão de biomassa consiste em seis etapas demonstradas na Tabela 8.

Tabela 8 – Etapas da combustão de biomassa

Biomassa úmida → aquecimento / secagem → Biomassa seca	(1)
Biomassa seca → voláteis (alcatrão + gases) + carvão	(2)
Voláteis + ar → CO + CO ₂ + hidrocarbonetos não queimados + fuligem + aerossóis inorgânicos	(3)
Carvão + ar → CO + CO ₂	(4)
Voláteis (N, S, K, etc.) → poluentes baseados em N, S, K	(5)
Carvão (N, S, K, etc.) → poluentes baseados em N, S, K	(6)

Fonte: (Williams et al., 2012)

Simoneit (2002) explica o processo de combustão da seguinte forma: quando a biomassa é aquecida, os seus constituintes começam a hidrólise, a oxidação, a desidratação e a pirólise. Com o aumento da temperatura ocorre a formação de compostos voláteis, alcatrão e carvão. Os compostos resinosos e produtos de decomposição da celulose, hemicelulose e lignina juntamente com o vapor de H₂O são removidos, ocorrendo uma combustão tanto parcial (incompleta) como completa na zona de chama. Durante a fase de chama ocorre continuamente a carbonização até que o fluxo de combustível volátil diminua abaixo do nível mínimo necessário para a propagação de uma chama. Durante o processo de combustão o calor produzido é o suficiente para propagar o processo de carbonização, assim como o lançamento de outros voláteis provenientes da decomposição da biomassa.

Há, ainda, a descrição do processo de combustão através da classificação visual, quanto à existência ou não de chama, em três etapas: fase de ignição (ignition), fase de chama (flaming), fase de incandescência (smoldering). Este método foi o utilizado neste trabalho.

- a) Fase de ignição: ocorre a deposição de calor externo no combustível, forçando o início da combustão, sendo que apenas parte do material é tomado por chama intensa.
- b) Fase de chama: ocorre a queima predominante de material volátil. Observa-se pontos de

chama em quase todo o combustível.

c) Fase de incandescência: não há mais chama, ou seja, ocorre a queima propriamente dita.

Há a degradação térmica e carbonização de material virgem, com desenvolvimento de fumaça e brilho visível (RABELO, 2003).

3.2.5. Queima da biomassa – emissão de poluentes

Apesar das vantagens citadas até então, a utilização da biomassa em larga escala para produção de energia também requer alguns cuidados, pois podem ocorrer impactos ambientais preocupantes (SOARES, 1995).

A quantificação das emissões de gases e material particulado associados à queima de biomassa é essencial para investigação dos processos atmosféricos, assim como para as autoridades governamentais que estabelecem padrões de qualidade do ar. Atualmente ainda há falta de bases de dados consistentes de emissões, o que dificulta a modelagem climática, a modelagem fotoquímica, os inventários de emissão e a identificação das fontes emissoras (FERNANDES, 2009).

A queima de biomassa emite grandes quantidades de carbono nas formas de CO₂, CO, CH₄ e material particulado e as concentrações destes poluentes dependem do tipo de biomassa queimada (composição química) e das condições de queima (FERNANDES, 2009 e BARKER et al., 2007). Quando a combustão da biomassa é completa, as substâncias liberadas são H₂O e CO₂, além do calor. Entretanto, na prática, a combustão dificilmente é completa e, com isso, existe liberação também de material particulado, CO e outros produtos considerados poluentes (SOARES, 1995). As emissões desses poluentes pela combustão incompleta são, em grande parte, influenciadas pelo equipamento e pelo processo, ou seja, curto tempo de residência na câmara de combustão, baixa temperatura de combustão ou insuficiente mistura combustível-ar (carência de oxigênio).

Com relação às fases de combustão (ignição, chama, incandescência), as emissões (concentrações) de material particulado alcançam os máximos valores durante a fase de chama e diminuem ao longo do processo de combustão, apresentando menores valores para a fase de incandescência, além disso, as maiores concentrações relacionam-se com menores diâmetros de partículas (HOSSEINI et al., 2010 e COSTA et al., 2012). Quanto aos poluentes gasosos produzidos por combustão incompleta (CH₄, CO, entre outros) são principalmente emitidos na fase de incandescência, enquanto que a maior parte de CO₂ (produto de

combustão completa) é emitida durante a fase de chama (SOARES NETO et al., 2011; OZGEN, CERNUSCHI e GIUGLIANO et al., 2013 e AMORIM et al., 2013). Ou seja, as concentrações dos poluentes provenientes de combustão incompleta aumentam à medida que a concentração de CO₂ diminui (AMORIM et al., 2013).

3.2.6. Queima da biomassa – efeitos à saúde humana

Com a queima de biomassa em ambientes fechados (internos) observa-se que os efeitos à saúde, decorrentes da exposição por longos períodos à fumaça produzida por essa queima podem estar associados com infecções respiratórias agudas em crianças, doença pulmonar obstrutiva crônica, catarata, cegueira, tuberculose pulmonar e efeitos adversos na gestação (ARBEX et al., 2004).

A quantidade de partículas ultrafinas (menores que 0,1 µm) emitidas com a queima de biomassa interna é de grande preocupação, pois são as mais prejudiciais à saúde humana, sendo capazes de atingir as regiões mais profundas do sistema respiratório, desencadeando processos inflamatórios no interstício pulmonar. A deposição dessas partículas, ao transpor a barreira do epitélio alveolar, induz à liberação de mediadores químicos que levam a respostas locais (hipoventilação, obstrução, inflamação e infecção pulmonares) e sistêmicas, devido ao transporte desses mediadores pela circulação, agindo, inclusive, diretamente nas células cardíacas (SILVA et al., 2010 e COSTA et al., 2012).

Já com relação à queima da biomassa em ambientes abertos (externos), a intensidade e a gravidade dos efeitos dos poluentes à saúde dependem de uma série de fatores, tais como: características dos poluentes, características da população exposta, exposição individual e suscetibilidade do indivíduo exposto (ARBEX et al., 2004).

Estrellan e Lino (2010), descrevem que a queima aberta de vários resíduos de produtos agrícolas (biomassa vegetal) mostram uma variedade de emissões como, a fuligem e material particulado, CO, CH₄, e COV. Estes mesmos autores destacam que, inicialmente visível como nuvem de fumaça, a fuligem e o material particulado fino dispersam-se em ar ambiente, e quando inalados provocam efeitos agudos em pessoas com delicados problemas respiratórios.

3.2.7. Queima da biomassa – amostragem de material particulado

Nevers (1995) cita em seu livro que existem basicamente dois grupos de amostragens requeridos dentro de um programa de controle ambiental:

- 1) Amostragem do ar ambiente para monitoramento da qualidade do ar;
- 2) Amostragem na fonte, ou em dutos.

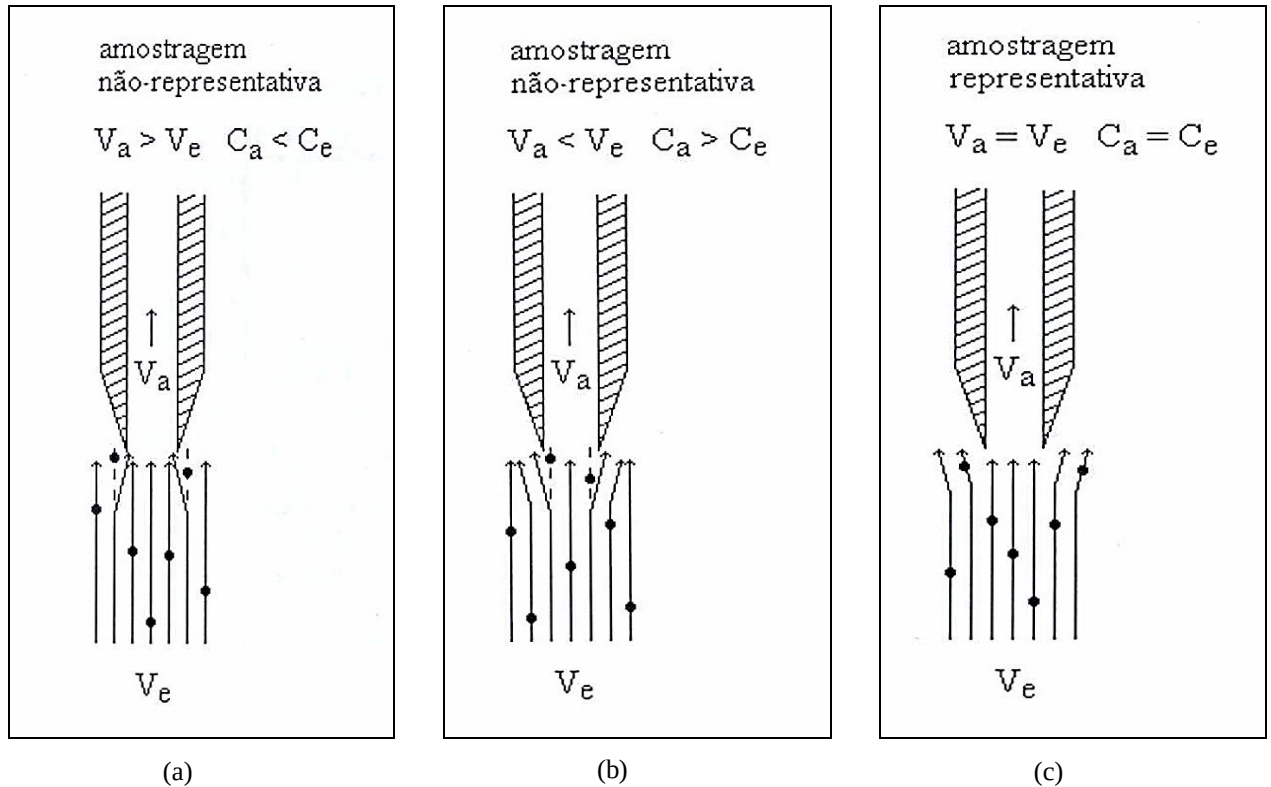
No primeiro grupo objetiva-se a determinação da concentração do ar público, geralmente para verificar se a concentração dos poluentes encontra-se dentro dos padrões. No segundo grupo objetiva-se a determinação de taxas de emissão de uma fonte poluidora.

No caso de processos que envolvem a combustão, por exemplo, a taxa de emissão de partículas na atmosfera pode ser feita com medidas em chaminés, determinando a concentração das partículas no gás efluente e a vazão do mesmo (COSTA, 1998).

Portanto, a amostragem de material particulado na fonte, para o caso da combustão (queima) da biomassa, consiste na coleta de uma amostra do volume de gás em movimento pelo duto ou chaminé do queimador de biomassa de forma a obter uma fração representativa do fluxo total. A concentração dentro do instrumento utilizado para realizar a medida tem que ser necessariamente a mesma daquela no escoamento ($C_a = C_e$) do qual a amostra é extraída. A velocidade de amostragem deve ser idêntica à velocidade do escoamento ($V_a = V_e$), o que caracteriza uma *amostragem isocinética* (Figura 3 (c)) (CARVALHO JUNIOR; LACAVA, 2003).

De acordo com Carvalho Júnior e Lacava (2003), se a amostra for coletada em uma velocidade maior que a velocidade de escoamento ($V_a > V_e$), a concentração medida será menor que a concentração no escoamento ($C_a < C_e$), pois as partículas possuem inércia e as mais pesadas não seguem as linhas de corrente do escoamento gasoso e não entram na sonda de amostragem (Figura 3 (a)). Por outro lado, se a amostra for coletada em uma velocidade menor que a velocidade de escoamento ($V_a < V_e$) uma concentração maior que a verdadeira será verificada ($C_a > C_e$), como pode ser visualizado na Figura 3 (b).

Figura 3 - Amostragens não-representativas e amostragem representativa para material particulado contido em uma corrente gasosa em duto: (a) e (b) amostragens não-representativas; (c) amostragem representativa (isocinética)



Fonte: (CARVALHO JÚNIOR; LACAVA, 2003)

Entretanto, segundo Esmanhoto (2010), não basta ajustar a velocidade dos gases no ponto de amostragem e depois ajustar a vazão da boquilha⁷ da sonda de amostragem para que a velocidade na boquilha seja equivalente, pois:

- a) a velocidade dos gases na chaminé varia em função do sistema de alimentação utilizado;
- b) a obtenção de uma amostragem representativa implica em coletar vários pontos, no sentido de acompanhar o movimento das partículas no fluxo gasoso que, em alguns casos, apresenta segregação ou distribuição não uniforme, devido à força centrífuga ou por sedimentação nos dutos ou chaminé.

Portanto, qualquer fluido em movimento dentro de um duto apresenta um perfil de velocidade. À medida que se muda a posição da boquilha dentro do duto, a velocidade em

⁷Boquilha = colocada na extremidade da sonda de amostragem é a peça que entra em contato com o fluxo de gás com particulados e é projetada sempre para uma vazão específica de gás no duto. Com esse aparato de diâmetro específico amostra-se o fluxo de gás isocineticamente, desde que a velocidade de sucção da amostra seja a mesma que a do fluxo. A saída da sonda de amostragem (pequeno tubo metálico em forma de L) é conectada a um equipamento coletor onde é efetuada a contagem das partículas e demais análises (COSTA, 1998).

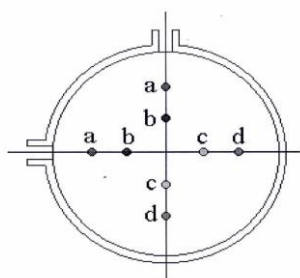
cada ponto mudará e será preciso ajustar a vazão da bomba para que a velocidade na entrada da boquilha mantenha-se isocinética. Para a realização da amostragem é necessário que os equipamentos permitam medir constantemente a velocidade dos gases e, também, que possa ser ajustada a sua vazão. O sistema deve operar de maneira contínua e rápida, pois ao mudar a posição da boquilha dentro da chaminé, mesmo que a vazão permaneça constante, a velocidade dos gases, nestes diferentes pontos será diferente (ESMANHOTO, 2010).

Ainda de acordo com Esmanhoto (2010), a sonda de amostragem deve ter sua seção de entrada o mais perpendicular possível ao escoamento. E, como em um duto não existe uniformidade no fluxo de gás e consequentemente não uniformidade da concentração de partículas, é extremamente importante que o local dos pontos de amostragem seja criteriosamente selecionado.

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), através da norma técnica L9.221:1990, indica que para chaminés ou dutos de seção circular, deve-se escolher uma seção transversal que fique a pelo menos 8 diâmetros internos à jusante e a 2 diâmetros internos à montante de qualquer distúrbio de fluxo como curvas, expansão, contrações, entradas e saídas.

Além da seção transversal, deve-se atentar para os pontos de amostragem nesta seção. Para BSI Standards, através da norma BS 3405:1983, a amostragem deve ser efetuada com 4 ou 8 pontos de amostragem localizados em 2 ou 4 linhas de amostragem e os pontos vão do centro de 4 ou 8 áreas iguais. A localização dos pontos mencionados pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 - Pontos de amostragem na seção transversal de acordo com a norma BS 3405:1983*. Para o presente trabalho $D = 17,54 \text{ cm}^{**}$



Ponto de amostragem*	Distância da parede de acordo com a norma*	Distância da parede (cm) para o presente trabalho**
a	0,065 D	1,1
b	0,250 D	4,4
c	0,750 D	13,2
d	0,935 D	16,4

Fonte: Norma BS 3405:1983 da BSI Standards e adaptação para o presente trabalho

3.2.7.1. Estudos recentes sobre a emissão e amostragem de material particulado

a) Ambientes abertos

Mazzoli-Rocha et al. (2008) estudaram a toxicidade respiratória provocada por partículas produzidas pelo tráfego de veículos e pela queima de cana-de-açúcar nas cidades de São Paulo e Araraquara, respectivamente.

Inicialmente, foram realizadas amostragens de partículas totais em suspensão (PTS) com filtros de fibra de vidro utilizando um amostrador de médios volumes operando a uma vazão de 200 L/min. As partículas provenientes do tráfego de veículos foram coletadas na cidade de São Paulo, nos jardins da Escola Paulista de Medicina que está localizada no centro da cidade, no cruzamento de duas ruas muito movimentadas. As partículas provenientes da queima de biomassa (cana-de-açúcar) foram amostradas na área urbana de Araraquara em dias de queima nas plantações de cana. Em São Paulo e Araraquara as médias dos diâmetros das partículas foram 5,54 μm e 3,21 μm , respectivamente, ou seja, partículas inaláveis PM_{10} (MAZZOLI-ROCHA et al., 2008).

Posteriormente, as partículas retidas nos filtros de amostragem foram extraídas em água destilada por ultrassons num banho de água durante cerca de 8 horas. Uma suspensão de 15 μg , tanto de partículas de tráfego quanto de biomassa, em 15 mL de água destilada foi injetada de forma intranasal em ratos para análise das reações. Como resultado, Mazzoli-Rocha et al. (2008) observaram que uma única injeção intranasal de PTS de ambas as áreas urbanas e queima de cana-de-açúcar provocou um aumento significativo no colapso alveolar, ou seja, uma inflamação respiratória aguda.

Estrellan e Lino (2010) realizaram uma compilação de dados de estudos reais e simulações sobre emissões de poluentes provenientes da queima aberta (céu aberto) de diferentes tipos de biomassa (queima de resíduos agrícolas, queima de resíduos domésticos e de madeira para aquecimento e cozimento, incêndios florestais, etc.) e chegaram, especialmente, à seguinte conclusão quanto à queima de resíduos da agricultura:

- A queima aberta de resíduos da agricultura é um método de baixo custo para o controle de insetos, doenças e a invasão de espécies daninhas. Entretanto, enquanto os benefícios econômicos e práticos da queima desses resíduos é aparente, os riscos ambientais e de saúde desta atividade precisam ser reconhecidos. Amostragens de queima aberta de vários resíduos de produtos

agrícolas como o arroz e a cana-de-açúcar mostraram uma variedade de emissões de poluentes como material particulado, monóxido de carbono, metano, compostos orgânicos voláteis, etc. Por exemplo, amostragens de material particulado proveniente das queimas das culturas de arroz em Taiwan feitas por Cheng et al. (2009) mostraram um significativo aumento nas concentrações de $PM_{2,5}$ e PM_{10} no ar durante estes períodos de queima. A quantidade de partículas finas ($PM_{2,5}$) subiu de $32,61 \text{ g/m}^3$ (período de não-queima) para $123,61 \text{ g/m}^3$ (período de queima). Estes valores são bem superiores ao padrão da OMS ($25 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ para 24 horas de amostragem) e também, como mencionam os autores, ao padrão estabelecido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) ($35 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ para 24 horas de amostragem);

Alves et al. (2011) realizaram um estudo sobre a queima ambiental de espécies florestais da Amazônia Brasileira, que consistiu na amostragem de partículas emitidas utilizando filtros de Teflon e de policarbonato para coleta, respectivamente, de PM_{10} e $PM_{2,5}$. As amostragens foram feitas nos meses de agosto a dezembro de 2008. A concentração média de PM_{10} no período foi de $25,2 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, sendo que nos meses de agosto a outubro a concentração foi maior (máximo de $60 \text{ }\mu\text{g/m}^3$) devido às queimadas mais frequentes. Entretanto, na sua maioria, as concentrações não ultrapassaram o limite de $50 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ para 24 horas de amostragem estabelecido pela OMS para PM_{10} . As partículas $PM_{2,5}$ também resultaram mais pronunciadas nos meses citados, chegando a um máximo de $70 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ em outubro, superando o valor máximo estabelecido pela OMS para um período de amostragem de 24 horas de $25 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ para $PM_{2,5}$, com uma média de $27,9 \text{ }\mu\text{g/m}^3$.

Ram, Sarin e Tripathi (2012) realizaram as primeiras medições e análise de dados sobre as concentrações atmosféricas de $PM_{2,5}$, PM_{10} , compostos inorgânicos, espécies carbonáceas entre outros na cidade de Kanpur na planície do Ganges. Uma larga área dessa planície é influenciada por emissões de queima pós-colheita e emissões veiculares. Na Tabela 9 encontram-se as concentrações médias de $PM_{2,5}$ e PM_{10} atingidas no período de outubro de 2008 à abril de 2009 (período de amostragem).

Tabela 9 - Concentrações médias de $PM_{2,5}$ e PM_{10}

	Out-nov		Dez-fev		Mar-abr
	$PM_{2,5}$	PM_{10}	$PM_{2,5}$	PM_{10}	PM_{10}
Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	189	247	127	225	138

Fonte: (RAM, SARIN e TRIPATHI, 2012)

De acordo com os dados constantes da Tabela 9, os limites estabelecidos pela OMS para $PM_{2,5}$ de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e para PM_{10} de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos para um tempo de amostragem de 24 horas, foram ultrapassados em todo o período de amostragem de Ram, Sarin e Tripathi (2012), o que levou os autores a concluírem ser essencial a documentação contínua da variabilidade espacial e temporal da composição química e das propriedades ópticas dos aerossóis ambientais através de medições de concentrações atmosféricas, já que os mesmos foram os primeiros a efetuarem estes estudos.

Prado et al. (2012), assim como Mazzoli-Rocha et al. (2008) também realizaram um estudo sobre os efeitos à saúde daqueles que estão em contato com os poluentes emitidos com a queima pré-colheita da cana-de-açúcar e observaram que as concentrações de $PM_{2,5}$ emitidas nos períodos de não-colheita e colheita foram, respectivamente, $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $23,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, chegando a $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na área de plantio em época de colheita (canavial).

O estudo de Prado et al. (2012) foi conduzido na cidade de Mendonça – SP, localizada na maior região de produção de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo. Foram coletados dados individuais dos trabalhadores e residentes da cidade (avaliações clínicas, testes de laboratório, testes pulmonares, etc.) e dados ambientais em um canavial localizado a aproximadamente 30 km de Mendonça. As concentrações de $PM_{2,5}$ mencionadas acima foram medidas através de um espectrômetro de massa. A média diária de emissão de $PM_{2,5}$ de $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante o período de colheita é preocupante pois é quase 2,5 vezes maior que o padrão de qualidade do ar estabelecido pela OMS de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para um período de 24 horas e 6 vezes maior que a concentração máxima anual de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

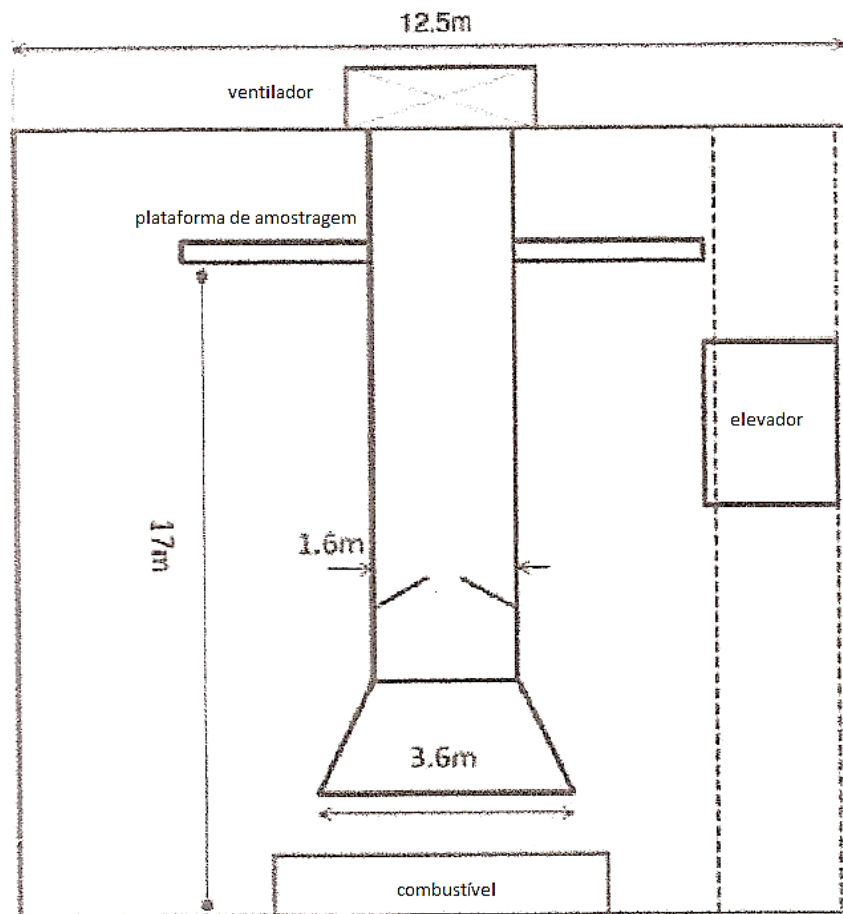
Engling et al. (2013) observaram a queima da casca de arroz, realizando um estudo da queima ambiental dessa biomassa durante os meses de inverno até o verão em Taiwan, coletando as suas emissões com um amostrador de grandes volumes e um de médios volumes. O amostrador de médios volumes foi empregado para coletar partículas de $PM_{2,5}$ (partículas

inaláveis finas – menores que $2,5\ \mu\text{m}$), enquanto que o amostrador de grandes volumes coletou partículas PTS (partículas totais em suspensão – menores que $50\ \mu\text{m}$). Os resultados encontrados mostraram que as concentrações de partículas $\text{PM}_{2,5}$ e PTS foram altas durante o inverno (dezembro de 2006) (110 e $44,6\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente), enquanto que no verão (junho e julho de 2007) foram de $60,5$ e $23,1\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. As menores concentrações no verão foram devido à remoção mais eficiente dos aerossóis pela deposição úmida (período de chuvas). Com relação à adequação aos limites impostos pela OMS de $25\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ para uma amostragem de 24 horas de $\text{PM}_{2,5}$ e pelo CONAMA de $240\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (padrão primário) e $150\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (padrão secundário) para uma amostragem de 24 horas de PTS, observou-se que as partículas inaláveis finas ($\text{PM}_{2,5}$) resultaram acima do padrão da OMS durante todos os períodos de queimas.

b) Ambientes fechados

Hosseini et al. (2010) destacam em seu estudo sobre as distribuições de tamanho (diâmetro) de partículas emitidas com a queima de biomassa em escala de laboratório utilizando instrumentos de respostas rápidas que essa distribuição é um importante parâmetro que afeta a qualidade do ar, os modelos climáticos e a saúde humana podendo diferir de acordo com cada fase da combustão (ignição / chama / incandescência), com as condições e tipos de combustíveis utilizados. Com isso foram queimados 8 diferentes tipos de combustíveis florestais (coletados na Califórnia e Arizona, Estados Unidos) em laboratório, utilizando o sistema experimental apresentado na Figura 5. A plataforma de amostragem (onde o amostrador de material particulado foi instalado) foi colocada a $17\ \text{m}$ acima do local onde o combustível era queimado. O amostrador de material particulado utilizado foi um espectrômetro portátil de resposta rápida (FMPS) capaz de medir o diâmetro das partículas emitidas com a queima.

Figura 5 – Sistema experimental de Hosseini et al. (2010)



Fonte: (HOSSEINI et al., 2010)

A média de diâmetros encontrada para os diferentes tipos de combustíveis florestais estudados em função do tempo de queima (desde a ignição até o final da fase de incandescência) variou entre 29 nm (0,029 μm) e 52 nm (0,052 μm) em distribuições unimodais (um pico de concentração) (HOSSEINI et al., 2010). Apenas alguns combustíveis mostraram distribuições bimodais (dois picos de concentração), com o menor diâmetro de 10 nm (0,010 μm).

Hosseini et al. (2010) também fizeram a observação da distribuição dos diâmetros em cada fase de queima, chegando aos seguintes resultados:

- A maioria das partículas foi emitida durante a fase de chama, com distribuição unimodal;
- A distribuição durante a fase de incandescência foi bimodal para todos os tipos

de combustível, com primeiro pico em torno de 10 nm (0,010 μm);

- As concentrações de partículas durante a fase de incandescência apresentaram-se com duas ordens de grandeza menores (10^5) que as observadas na fase de chama (10^7).

De acordo com Springsteen et al. (2011), resíduo de biomassa lenhosa é gerado em toda a Califórnia (manejo florestal e operações agrícolas). Muitas vezes, a opção mais econômica de acabar com esse resíduo é queimando-o em pilhas a céu aberto, entretanto há emissão de poluentes atmosféricos com essa queima. Uma estrutura está sendo desenvolvida para quantificar a redução das emissões para a atmosfera de projetos que, alternativamente, utilizarem resíduos de biomassa como combustível para produção de energia. Um projeto de demonstração foi realizado envolvendo resíduos de coníferas da Serra Nevada como combustível em uma unidade de cogeração de energia de biomassa. Em comparação com o método tradicional da queima em pilha, este projeto de demonstração mostrou que houve uma queda de 98% na emissão de material particulado, 54% de NO_x e 97% de CO.

Com o objetivo de desenvolver fatores de emissão (FE) para poluentes atmosféricos gasosos e $\text{PM}_{2,5}$ provenientes da pré-queima da cana-de-açúcar, Hall et al. (2012) utilizaram uma câmara de combustão laboratorial simuladora dessa queima no campo (queima aberta). A biomassa foi obtida das plantações de cana-de-açúcar da Flórida, Estados Unidos. A maioria dos testes utilizou folhas de cana secas, as quais foram introduzidas na câmara de combustão a uma taxa de cerca de 100 gramas a cada 40 segundos para manter as condições quase constantes de queima. Alguns testes foram realizados utilizando talos inteiros de cana, que continham ambas as folhas secas e verdes para investigar os efeitos da composição da biomassa e das condições de queima nos fatores de emissão.

As amostras de gases e particulados foram coletadas do duto de exaustão da câmara seguindo métodos de amostragem da Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA). O gás de exaustão foi amostrado isocineticamente, com posteriores passagens por um seletor de partículas para remoção das partículas maiores que 2,5 μm e, finalmente, por um filtro de fibra de vidro para coletar o material particulado (HALL et al., 2012).

O cálculo dos fatores de emissão de partículas $\text{PM}_{2,5}$ ($\text{FE}_{2,5}$) baseou-se na concentração de partículas medida acima do ambiente (ΔC_x), na vazão através da câmara de combustão ($Q_{\text{câmara}}$), no tempo de amostragem (t) e na massa de biomassa queimada (m_{queimada}), conforme a Equação (2) (HALL et al., 2012).

$$FE_{2,5} = \frac{(\Delta C_x \times Q_{câmara} \times t)}{m_{queimada}} \quad (2)$$

A média dos FE para as partículas PM_{2,5} resultou em 2,49±0,66 g/kg, baseada em testes com folhas secas. Este valor está de acordo com o determinado por Yokelson et al. (2008) de 2,17 g/kg e com a faixa de valores estabelecida pela EPA para pré-queima da cana (2,3 – 3,5 g/kg).

Hossain et al. (2012) realizaram um estudo laboratorial simulado da queima ambiental de diferentes tipos de biomassa como a casca de arroz (10,8% de umidade), o carvalho (10,6% de umidade) e pinheiro (11,2% de umidade). A casca de arroz é um dos principais resíduos queimados nos campos agrícolas da Coreia ou em países do leste da Ásia, enquanto o carvalho e o pinheiro são abundantes em florestas coreanas e estão frequentemente envolvidos com incêndios florestais.

Para as queimas foi utilizado um fogão comercial para simular as condições de queima ambiental. Uma amostragem isocinética foi assegurada através da colocação da sonda de amostragem em diferentes posições e, com isso, dois fluxos foram medidos (um na extremidade de saída da chaminé e outro dentro da chaminé, no centro). Além disso, as fases de chama, de incandescência e as condições de queima a céu aberto foram simuladas no estudo de Hossain et al. (2012).

As distribuições de diâmetro das partículas foram medidas com um scanner portátil de partículas (SMPS) e os diâmetros equivalentes das partículas foram medidos com um analisador de diâmetros de partículas (PSD) (HOSSAIN et al., 2012).

Com isso, Hossain et al. (2012) chegaram aos seguintes resultados:

- Para as três condições de combustão (chama, incandescência e queima aberta) as distribuições de diâmetros das partículas para a queima da casca de arroz resultaram em distribuições unimodais (140,7 nm, 88,2 nm e 53,3 nm, respectivamente). Uma razão para esta ordem decrescente de distribuição pode ser devido à frações de carbono orgânico volátil serem influenciados pelas diferentes temperaturas nas diferentes condições de queima (227°C, 193°C e <<<193°C, respectivamente). A ordem das distribuições dos diâmetros foi a mesma que a ordem de temperaturas (decrescente);

- Para o carvalho e o pinheiro, as distribuições de diâmetros foram bimodais para as fases de chama e incandescência, sendo que na primeira fase as maiores modas (concentrações) ocorreram para o menor diâmetro (em torno de 100 nm) e para a segunda fase ocorreram para o maior diâmetro (em torno de 600 nm), ou seja, menores diâmetros na fase de chama;
- Carvalho e pinheiro apresentam massas consolidadas, enquanto que a casca de arroz é uma massa vazia com uma estrutura porosa portanto, a queima desta última é mais uniforme e eficiente, resultando numa distribuição de diâmetros de partículas unimodal.

Costa et al. (2012), assim como e Alves et al. (2011) também realizaram um estudo sobre a emissão de material particulado a partir da queima de biomassa da floresta Amazônica, agora em laboratório. Foi dado ênfase às partículas $PM_{2,5}$ com utilização do mesmo amostrador de material particulado utilizado neste presente trabalho (DataRAM 4, descrito no item 3.3.2).

Segundo os autores, na fase de incandescência foram coletadas as partículas com maiores diâmetros, chegando a uma média de diâmetro de $0,5\ \mu m$, enquanto que as partículas com menores diâmetros foram coletadas na região de transição entre as fases de chama ($0,15\ \mu m$) e incandescência ($0,30\ \mu m$).

Costa et al. (2012) também observaram que a queima da biomassa amazônica apresentou alta concentração de partículas ultrafinas, menores que $0,1\ \mu m$, sendo que o menor valor amostrado foi de $0,068\ \mu m$ a uma concentração de $100000\ \mu g/m^3$. Os maiores valores de concentração ficaram em torno de $350000\ \mu g/m^3$ na fase de chama e de $100000\ \mu g/m^3$ para a fase de incandescência.

Limousy et al. (2013), sabendo que o café é uma das mais importantes commodities no mundo, sendo a segunda maior depois do petróleo e que sua indústria é responsável pela geração de elevada quantidade de resíduos, realizaram um estudo das emissões de produtos gasosos (serão descritas na seção 2.2.9.1) e de material particulado proveniente da queima residencial de pellets de grãos de café puros gastos (borra de café) ou misturados com serragem de pinho. A borra de café é um resíduo sólido orgânico com partículas finas e alta umidade (cerca de 80-85%).

As amostras para estudo (pellets) foram preparadas a partir da borra do café processado no leste da França, sendo que a umidade inicial foi fixada em 12% (pellets de borra de café),

enquanto que para os pellets com serragem de pinho foi de 10%. Os testes foram realizados numa caldeira de 12 kW equipada especificamente para testes de combustão. As emissões de material particulado foram coletadas por um impactador elétrico de baixa pressão com determinação da concentração em massa e da distribuição de diâmetros de partículas (LIMOUSY et al., 2013).

De acordo com os resultados obtidos por Limousy et al. (2013), as emissões de partículas de pellets de borra de café + serragem de pinho foram menores comparadas às dos pellets de borra de café apenas. Os valores obtidos foram de 310 mg/m^3 ($310 \times 10^3 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) e 1071 mg/m^3 ($1071 \times 10^3 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) para a mistura borra de café + serragem de pinho e borra de café, respectivamente.

Quanto à distribuição de diâmetros das partículas emitidas, Limousy et al. (2013) observaram que as concentrações de partículas ultrafinas emitidas com a queima de pellets de borra de café unicamente foram maiores (máximo de $1,6 \times 10^6$ partículas por segundo de partículas com $0,2 \text{ } \mu\text{m}$) que as observadas para os pellets da mistura borra de café + serragem de pinho (máximo de 9×10^5 partículas por segundo de partículas com $0,2 \text{ } \mu\text{m}$).

Com isso, Limousy et al. (2013) concluíram que o uso de biomassa peletizada de café (sem outro tipo de biomassa adicionado) não é aconselhável em ambiente residencial por sua queima apresentar emissão de altas quantidades de partículas ultrafinas, as mais prejudiciais à saúde humana.

Ozgen, Cernuschi e Giugliano (2013) realizaram um estudo sobre a queima de biomassa em pequenos aparelhos domésticos como lareiras e fogões, pois em países da União Europeia há o incentivo para a utilização de energias renováveis (aparelhos alimentados com biomassa, por exemplo) para aquecimento e geração de energia elétrica devido a menor emissão de gases estufa.

Entretanto, estes aparelhos em batelada têm reportado altas emissões de material particulado devido à baixa eficiência de combustão (baixa razão ar/combustível), baixa qualidade do combustível e falta de controle das emissões. O estudo dos diferentes diâmetros de partículas emitidas com a combustão mostra que as maiores concentrações de partículas menores ocorre na fase de chama, diminuindo ao longo da queima, assim como já relatado por Hosseini et al. (2010).

A amostragem do material particulado foi realizada em uma lareira com uma potência calorífica de 11 kW queimando lenha. O gás de combustão foi encaminhado, através da

chaminé da lareira, para um túnel de pré-diluição com ar ambiente e, posteriormente, as concentrações de partículas foram amostradas utilizando um instrumento de medição de quantidade de partículas (impactador elétrico de baixa pressão) ligado a um ciclone para seleção daquelas com diâmetro superior a $2,5\mu\text{m}$. Este esquema de amostragem é semelhante ao citado por especificações técnicas europeias como método de teste de partículas em aparelhos de queima residencial de combustíveis sólidos. O número médio de partículas amostrado foi de $9,6 \times 10^7 / \text{cm}^3$ com diâmetros variando de 35 nm ($0,035 \mu\text{m}$) até 159 nm ($0,159 \mu\text{m}$).

3.2.8. Queima da biomassa – amostragem de gases

Os poluentes atmosféricos possuem um grande volume por unidade de massa e, uma vez lançados na atmosfera, misturam-se com o ar e são levados pelas correntes de vento, em um movimento basicamente não controlável. Frequentemente pode-se ver e sentir o cheiro dos poluentes atmosféricos, e não é necessário dispor de uma instrumentação exótica para verificar sua presença em muitos locais (CARVALHO JÚNIOR e LACAVA, 2003).

Carvalho Júnior e Lacava (2003) ainda afirmam que uma das maiores fontes de emissão de poluentes são os gases resultantes de dispositivos que aproveitam a energia térmica liberada pelas reações de combustão, como na queima de biomassa, por exemplo.

A medida da concentração dos componentes dos gases de combustão fornece inúmeras informações importantes ao processo de combustão e, em geral, os instrumentos que realizam essa medida fornecem valores em base seca, isto é, sem a água. A água pode se liquefazer dentro do aparelho analisador interferindo em seu sistema de medição (CARVALHO JÚNIOR e LACAVA, 2003).

A amostragem e o acondicionamento dos gases a serem analisados pode ser feita de forma contínua ou descontínua, através da extração de uma fração desses gases e direcionamento até o equipamento de análise ou diretamente no local (chaminé do queimador de biomassa) em processo de medição contínua (ALMEIDA FILHO, 2008).

3.2.8.1. Estudos recentes sobre a emissão e amostragem de gases

Fernandes (2009) em seu trabalho de mestrado realizou uma série de testes para caracterizar a composição dos gases de exaustão resultantes da combustão doméstica em lareiras e fogões em Portugal. Foram queimadas 7 espécies lenhosas representativas da floresta portuguesa (*Pinus pinaster*, *Eucalyptus globulus*, *Quercus suber*, *Acácia longifolia*, *Quercus faginea*, *Olea europea*, *Quercus ilex rotundifolia*) e briquetes de resíduos de biomassa. A amostragem de gases foi realizada junto à exaustão da chaminé do fogão e da lareira, com início a frio e a quente. As experiências de combustão com início a frio iniciaram-se com o arranque dos sistemas de amostragem de material particulado e gases, em simultâneo (semelhante ao método utilizado neste presente trabalho) e as com início a quente começaram com as condições terminais dos ensaios com início a frio.

As concentrações dos gases CO e CO₂ em função do tempo de queima para a lareira apresentaram pouca variabilidade comparativamente com as verificadas no fogão, pois há um excesso de ar admitido na lareira durante a combustão. No fogão, devido a um maior controle do ar para combustão, as concentrações de CO e CO₂ foram mais elevadas (FERNANDES, 2009).

Na determinação dos fatores de emissão observou-se, na generalidade, uma contribuição superior por parte das lareiras comparativamente com o fogão. Os fatores de emissão obtidos oscilaram entre 43 – 149 g de CO/kg de biomassa seca, 326 – 2699 g de CO₂/kg de biomassa seca.

Com relação às concentrações dos poluentes emitidos ao longo das queimas, Fernandes (2009) observou os seguintes resultados para o *Eucalyptus globulus*, especialmente:

- concentração máxima de CO em torno de 4500 ppm;
- concentração máxima de CO₂ em torno de 6%.

Assim como Araújo et al. (2008), Mcilveen-Wright et al. (2011) realizaram uma avaliação técnico-econômica da redução das emissões de CO₂ através da utilização da co-combustão da biomassa e observaram que o uso sustentável da biomassa como combustível único ou co-alimentado com carvão é um modo eficiente de reduzir as emissões de CO₂ de um processo de combustão, pois como as emissões de CO₂ são reduzidas quando a biomassa é utilizada, o efeito do seu uso no preço de venda da eletricidade seria contrabalançado com a redução de um importante poluente atmosférico (CO₂).

Soares Neto et al. (2011) avaliaram laboratorialmente as emissões gasosas provenientes

da queima de biomassa oriunda da floresta Amazônica. Foram medidas as concentrações de CO₂, CO, NO_x e hidrocarbonetos não queimados com auxílio de analisadores de gases da *Rosemount Analytical*. Além disso, as temperaturas, as taxas de queima, a eficiência de combustão e os fatores de emissão médios (FE_x) para CO₂, CO e NO_x também foram avaliados e estes últimos encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Fatores médios de emissão (g_x/kg de biomassa seca queimada)

gás de combustão (x)	FE_x
CO ₂	1565±128
CO	50,3±17,1
NO _x	2,74±0,75

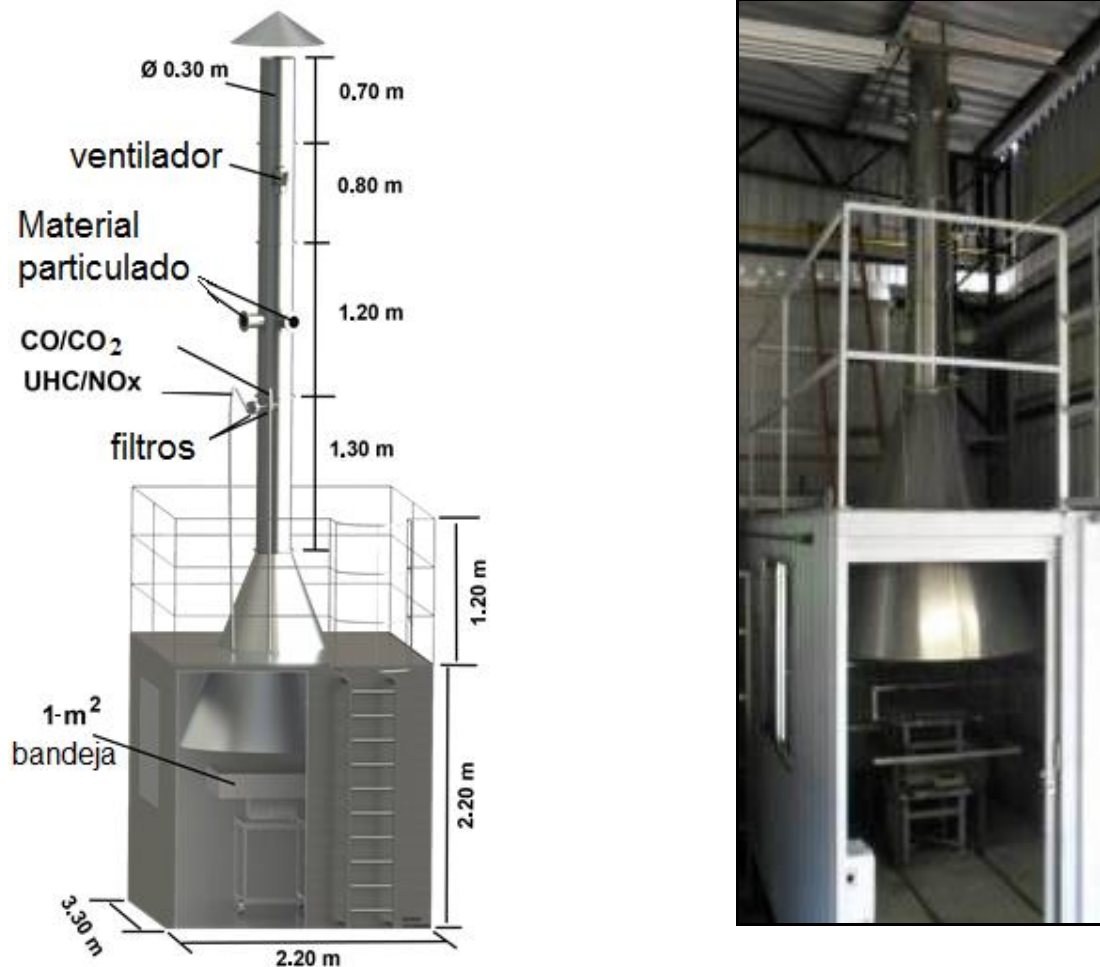
Fonte: (SOARES NETO et al., 2011)

O cálculo dos fatores de emissão médios de gases (FE_x) baseou-se no volume total do fluxo gasoso na chaminé durante a queima (V_{total-chaminé}), na concentração média da espécie x ([]_{x-gás}), na massa molecular da espécie x (M_x), na quantidade de combustível seco consumido (m_{comb (base seca)}) e no volume molar do gás nas CNTP de 0,0224 m³ para 1 mol a 1 atm e 0°C (V_x), conforme a Equação (3).

$$FE_x = \frac{V_{total-chaminé}}{m_{comb(base\ seca)}} \cdot \frac{[]_{x-gás}}{V_x} \cdot M_x \quad (3)$$

As queimas de biomassa florestal amazônica foram realizadas no equipamento laboratorial mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Equipamento de queima de biomassa florestal amazônica



Fonte: (SOARES NETO et al., 2011)

Com relação às emissões de gases em função do tempo de queima, Soares Neto et al. (2011) observaram que:

- as curvas de concentração de CO_2 (%) e NO_x (ppm), e a de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), ambas em função do tempo de queima (s), apresentaram o mesmo comportamento, com altas concentrações de CO_2 e NO_x associadas a altas temperaturas e vice-versa;
- as concentrações de CO (ppm) em função do tempo de queima (s) aumentaram na fase de incandescência.

Fernández et al. (2012), realizaram a comparação de seis tipos mais comuns de biomassa (casca de amêndoa, casca de arroz, palha de arroz, bagaço de vinho, pellets de madeira, carvão vegetal) presentes na Espanha que podiam ser utilizados como combustíveis

substituintes dos combustíveis fósseis. Tais biomassas foram caracterizadas (morfologia, composição) e posteriormente queimadas para análise dos gases emitidos (O_2 , CO , CO_2 , NO_x , SO_2) utilizando o analisador de gases Testo 350 XL- Testo 454 da Testo do Brasil Ltda.

- Com relação à emissão de CO , as biomassas carvão vegetal e pellets de madeira apresentaram os maiores valores durante a queima: 2000 e 6000 ppm, respectivamente. Os autores explicam que algumas biomassas, como a casca de amêndoa, precisam de um suprimento de ar muito baixo para obter a combustão completa, enquanto que amostras como pellets de madeira e carvão vegetal apresentam as piores taxas de combustão (necessitam de grande quantidade de ar). A casca de arroz apresentou emissão em torno de 600 ppm;
- Quanto à relação entre CO e CO_2 , as biomassas carvão vegetal e pellets de madeira apresentaram os maiores valores, novamente sugerindo que seja descartado o uso dessas biomassas como combustíveis. Quanto maior a relação CO/CO_2 , pior é a taxa de combustão;
- Os pellets de madeira, além da alta concentração de CO emitida, também apresentaram alta concentração de NO_x durante a queima (próxima de 100 ppm), enquanto as outras biomassas, como a casca de arroz, emitiram em torno de 10 a 20 ppm.

Ozgen, Cernuschi e Giugliano (2013) também realizaram a amostragem de poluentes atmosféricos gasosos provenientes da queima biomassa em pequenos aparelhos domésticos como lareiras e fogões em países da União Europeia. A amostragem de material particulado pelos autores já foi discutida no item 3.2.7.1.

Os principais gases produzidos com a combustão (CO , CO_2 , NO , NO_2) foram constantemente monitorados em um túnel de diluição juntamente com alguns outros parâmetros (temperatura do gás de exaustão, taxa de consumo de combustível, conteúdo de oxigênio no gás de exaustão). Foram utilizados analisadores automáticos baseados nos seguintes princípios: paramagnetismo⁸ para O_2 , analisador de infravermelho não-dispersivo⁹

⁸Paramagnetismo = O analisador paramagnético de gases é um instrumento analítico que permite determinar, em uma mistura de dois ou mais gases, um dos componentes. Esta determinação é feita por meio das propriedades magnéticas apresentadas pelo gás a ser analisado. Entre todos os gases industriais existentes, o oxigênio é o único que apresenta propriedades magnéticas excepcionais (VIANA, 1999).

⁹Analisador de infravermelho não-dispersivo = Baseia-se na absorção de luz pela molécula em questão, em um determinado comprimento de onda, na região infravermelha (ABREU e MELO, 1997).

para CO e CO₂ e quimioluminescência¹⁰ para NO_x. Os resultados obtidos pelos autores encontram-se na Tabela 11:

Tabela 11 – Fatores médios de emissão de CO e NO_x e emissão de CO₂ para as três fases da combustão

	Ignição	Flaming (chama)	Smoldering (incandescência)
CO (g/kg)	58	27	59
NO _x (mg/kg)	535	793	780
CO ₂ (%)	7,6	7,6	7,4

Fonte: (OZGEN, CERNUSCHI e GIUGLIANO, 2013)

Segundo os autores, a fase de ignição foi seguida pela fase de chama (flaming) com emissão de produtos de combustão completa (CO₂) e com baixa emissão de CO (proveniente de combustão incompleta) bem como com temperaturas mais elevadas. Na fase de incandescência (smoldering) houve o aumento da combustão incompleta (aumento da emissão de CO) e uma ligeira diminuição da emissão de CO₂.

Gonçalves e Soares Neto (2013) estudaram as concentrações de espécies químicas liberadas durante a combustão de biomassa, em especial o *Pinus elliottii*. Os experimentos de queima foram realizados em um container contendo uma bandeja de queima de 1 m². Os gases proveniente da queima foram analisados por um sistema de amostragem de gases constituído por dois filtros, uma válvula de pressão e um controlador de vazão. Este sistema permitiu uma amostragem constante a uma determinada vazão e pressão. Com as amostras coletadas nos experimentos os autores puderam determinar as concentrações dos gases da combustão por cromatografia gasosa. As concentrações médias obtidas ficaram em torno de 5000-5500 ppm de CO₂; 54-58 ppm de CO e 4-5 ppm de NO_x. Em todos os experimentos foram observadas altas concentrações de CO₂ mostrando que o *Pinus elliotti* teve uma boa

¹⁰Quimioluminescência = o analisador que opera pelo princípio da quimioluminescência serve à detecção de NO_x. A base do método analítico é a reação do NO com o O₃ para formar NO₂ e O₂. Cerca de 10% do NO₂ formado encontra-se em um estado de energia excitado (moléculas NO₂*) e retornam imediatamente ao nível básico de energia emitindo fótons que são direcionados a um tubo fotomultiplicador o qual produz um sinal elétrico que se relaciona à concentração original de NO_x. Portanto, o retorno espontâneo das moléculas de NO₂ excitadas, em relação ao seu estado normal de não excitação acompanha-se de uma emissão luminosa que é captada por um foto-multiplicador e amplificada (LACAVA; MARTINS, 2010).

queima e uma baixa emissão de CO.

3.2.9. Queima da biomassa – controle de material particulado e gases

Existem vários equipamentos utilizados para controlar a emissão de particulados emitidos pelas indústrias, entre eles os ciclones, filtros, precipitadores eletrostáticos, sedimentadores, etc. Uma dessas opções é a adoção de lavadores de gases, também conhecidos por *scrubbers*.

Os lavadores são usados não somente como equipamentos de controle de poluentes particulados, mas também de poluentes gasosos (COSTA, 2002 e PHILIPPI JÚNIOR, 2005). Os elementos limpadores são as gotas formadas a partir da injeção de um líquido, geralmente água, no gás contendo contaminantes (GUERRA, 2009).

Portanto, neste tipo de equipamento, o gás carregando partículas é forçado a passar por meio de uma aspersão de gotas de água, com as quais as partículas se chocam e nelas são depositadas, aumentando de tamanho e possibilitando a sua coleta (PHILIPPI JÚNIOR, 2005).

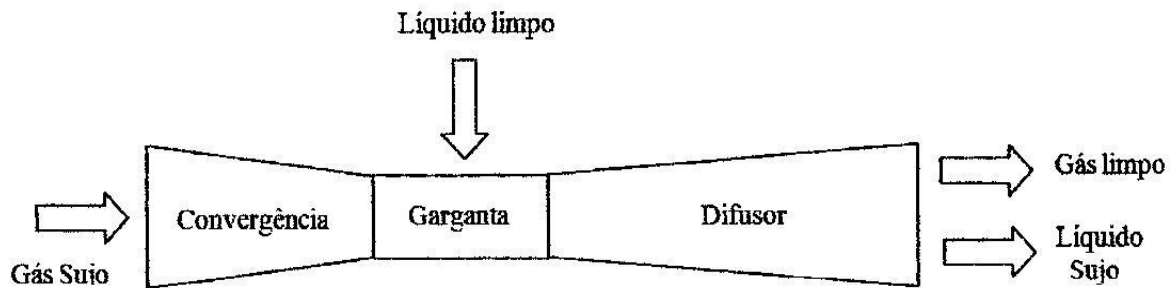
De acordo com Theodore e Buonicore (1988), os lavadores de gases podem ser classificados em três grandes grupos:

- a) Torres de nebulização;
- b) Instalações de leito empacotado;
- c) Lavadores Venturi.

Entre os lavadores mencionados, o Venturi é o mais eficiente (superior a 90%), embora tenha o mais alto custo operacional.

Segundo Costa et al. (2008), a composição do lavador Venturi consiste num duto de seção transversal circular ou retangular, dividido em três partes, conforme demonstrado na Figura 7:

Figura 7 – Representação esquemática do lavador Venturi



Fonte: (GUERRA, 2009)

- a) Seção convergente ou convergência: onde ocorre a entrada da corrente gasosa contaminada com particulados e a aceleração do gás;
- b) Garganta: onde o gás alcança sua maior velocidade (entre 50-90 m/s) e onde normalmente ocorre a injeção do líquido de lavagem através de orifícios situados na parede do equipamento. Em muitos casos o líquido é água ou outro composto que reaja com o contaminante do gás. Ao penetrar na garganta a energia cinética (alta velocidade do gás) faz com que o líquido injetado seja atomizado, adquirindo assim a forma de gotas que podem variar de 10 a 500 μm . As gotas resultantes são arrastadas e aceleradas pelo gás. Em contato com as gotas as partículas são então coletadas por vários mecanismos, sendo o mais evidente o de impactação inercial, ou seja, resultante da inércia das partículas. Neste mecanismo, as gotas recém-formadas encontram-se praticamente paradas em relação ao gás e são, em média, maiores que as partículas de pó enquanto que as moléculas de gás são mais leves e possuem menos quantidade de movimento. Com isso, estas últimas desviam-se com facilidade das gotas ao se depararem com elas. Já as partículas, com maior massa e inércia, não conseguem mudar rapidamente sua trajetória e chocam-se com alguma gota. Desta forma, partículas maiores são coletadas mais facilmente do que partículas menores devido à sua maior inércia e a eficiência de coleta aumenta à medida que a diferença de velocidade entre a partícula no gás e na gota aumenta (GAMA, 2008). No interior do Venturi o escoamento é turbulento, otimizando o contato entre o gás a ser tratado com as gotas de

líquido;

- c) Seção divergente ou difusor: a corrente de gás e as gotas contendo as partículas são então desaceleradas, saindo com velocidades aproximadamente iguais. Logo após a limpeza do gás um separador centrífugo separa as gotas da corrente gasosa, deixando apenas o ar “limpo” que será emitido para a atmosfera.

De acordo com Costa (2002) e Guerra (2009), o lavador Venturi comparado com outros lavadores de gases e outros equipamentos de limpeza apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

1) Vantagens:

- a) É compacto, ocupando espaço reduzido na instalação industrial;
- b) Possui alta eficiência ($E > 90\%$) de coleta de partículas na faixa respirável (0,5 a $5,0 \mu\text{m}$);
- c) Pode reutilizar o líquido de lavagem;
- d) Os contaminantes particulados e gasosos podem ser removidos simultaneamente. Essa vantagem resulta em economia de recursos;
- e) Há a possibilidade de remover material explosivo, inflamável, pegajoso e aderente. Risco operacional é menor;
- f) Materiais corrosivos podem ser neutralizados selecionando o líquido de lavagem.

2) Desvantagens:

- a) Alto consumo de energia possuindo, assim, um elevado custo operacional;
- b) Requerem o tratamento do efluente líquido sujo, dependendo do contaminante.

Além dessas desvantagens citadas, Reis, Coury e Guerra (2011) mencionam que, do ponto de vista econômico, a queda de pressão é o critério mais importante a ser levado em consideração e varia significativamente com as condições operacionais. Nesse sentido, há importantes estudos tais como o de Nasseh et al. (2007), Silva, Teixeira e Teixeira (2009) e Rahimi, Niksiar e Mobasheri (2011).

Nasseh et al. (2007) utilizaram uma nova abordagem baseada em redes neurais artificiais para prever (estimar) a queda de pressão em um lavador Venturi. Essas redes

neurais são modelos inspirados na estrutura do cérebro humano, tendo como objetivo simular o comportamento humano em processos como: aprendizagem, associação, generalização e abstração. Nestas redes, a aprendizagem computacional se dá através de um conjunto de unidades simples de processamento chamados de neurônios artificiais ou nós (AFFONSO, 2013). Geralmente consistem de um número de elementos de processamento interligados. A maneira como as conexões destes elementos estão dispostas e a natureza destas conexões determina a estrutura da rede neural (TAHERI e MOHEBBI, 2008).

Segundo Nasseh et al. (2007), os principais parâmetros que afetam a queda de pressão num lavador Venturi são a velocidade do gás na garganta, a razão líquido-gás (relação entre o fluxo de líquido utilizado para a limpeza do gás e o fluxo de ar que está sendo limpo (gás sujo) e a distância axial do lavador. A queda de pressão aumenta de forma linear com o aumento da razão líquido-gás e com o aumento da velocidade do gás na garganta. Por outro lado, ao aumentar a distância ao longo do Venturi (distância axial), a queda de pressão primeiro aumenta (garganta) como resultado da energia transferida para acelerar a película de líquido e, posteriormente, na seção divergente, a pressão é recuperada a partir tanto da expansão do gás quanto da transferência de energia a partir da desaceleração das gotículas de líquido.

Silva, Teixeira e Teixeira (2009) realizaram medições de queda de pressão dentro de um lavador Venturi de escalas industriais e estudaram o efeito da velocidade do gás e do líquido a partir de dois tipos diferentes de injeção de líquido (água foi introduzida como filme e como spray). A injeção de água na forma de spray foi realizada à montante (entrada) da seção convergente, o que, segundo Silva, Teixeira e Teixeira (2009), foi diferente dos trabalhos apresentados até então na literatura que faziam a injeção da água através da pulverização na seção da garganta. As conclusões tiradas pelos autores foram:

- Na seção convergente, a queda de pressão é devida à aceleração do gás;
- Na garganta, somente o atrito do gás contribui para a queda de pressão;
- A maior parte da perda de pressão é recuperada na seção divergente;
- O tipo de injeção de líquido (filme ou spray) é importante somente para altas cargas de líquido;
- A queda de pressão é mais influenciada pela velocidade do gás que pela vazão de líquido;
- A razão líquido-gás é fortemente influenciada por uma alta velocidade de gás

na garganta embora este comportamento não tenha sido constante. Esta observação pode estar relacionada com o desmembramento da gota. Portanto, uma melhor modelagem do tamanho da gota seria necessária.

No trabalho de Rahimi, Niksiar e Mobasheri (2011) foi estudado o efeito da não consideração dos fenômenos da transferência de calor e de massa nas descrições matemáticas da queda de pressão através de lavadores Venturi, concluindo-se que a ocorrência desses fenômenos diminui a queda de pressão, sendo extremamente importante levar em consideração tanto a transferência de calor quanto a de massa para que erros sejam evitados, principalmente quando forem utilizados gases a altas temperaturas.

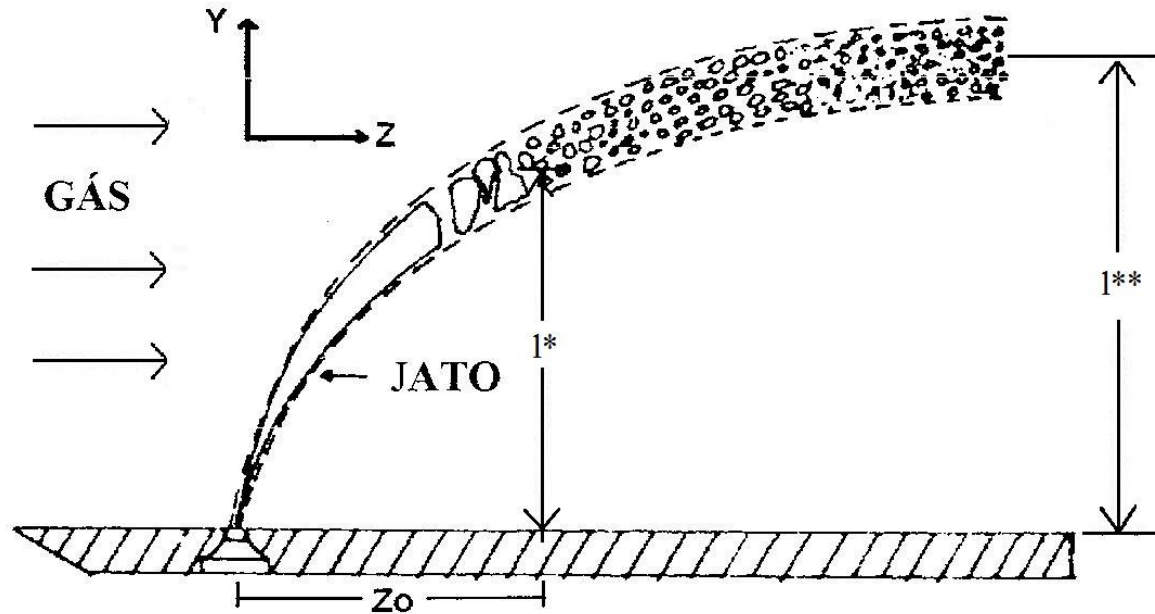
3.2.9.1. Trajetória do jato líquido na corrente gasosa

Segundo Guerra (2009), o líquido para limpeza de um gás em um lavador Venturi é introduzido através de pequenos orifícios (pontos de injeção) localizados no início da garganta do lavador. Quando o líquido passa através do orifício ele assume a forma de um jato inicialmente transversal à corrente do gás e posteriormente sofre uma curvatura devido à força de arraste. Primeiramente, o jato é um corpo contínuo de líquido entretanto, a atomização (formação de gotas) ocorre rapidamente. Essas gotas formadas por atomização são responsáveis pela coleta dos poluentes existentes na corrente gasosa.

A eficiência de um lavador Venturi é afetada pelas características das gotas (tamanho, quantidade, velocidade relativa e distribuição espacial) e do jato (velocidade, diâmetro, trajetória, penetração) (GUERRA, 2009).

A penetração do jato é definida como a distância que o jato líquido penetra na corrente gasosa transversalmente antes da atomização em gotas (COSTA, 2002). Viswanathan et al. (1983) propuseram um modelo semi-empírico para calcular o ponto de atomização de cada jato individual. De acordo com esse modelo, o jato pode ser caracterizado por duas distâncias importantes: a penetração do jato (l^*), determinada através da Equação (4) e a máxima penetração da linha central do jato (l^{**}), determinada através da Equação (6). O jato segue uma trajetória curva até determinado ponto no qual é atomizado (z_0, l^*), conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Trajetória de penetração do jato líquido segundo Viswanathan et al. (1983)



Fonte: (VISWANATHAN et al., 1983)

$$\frac{l^*}{d_o} = 0,075 \frac{\rho_l \cdot V_j}{\rho_g \cdot V_g} \quad (4)$$

Onde:

l^* = penetração do jato (mm)

d_o = diâmetro do orifício (mm)

ρ_l = densidade do líquido (kg/m^3) -

ρ_g = densidade do gás (kg/m^3)

V_j = velocidade do jato líquido, dada pela Equação (5) (m/s)

V_g = velocidade do gás (m/s)

$$V_j = \frac{4 \cdot Q_l}{\pi \cdot d_o^2 \cdot N_o} \quad (5)$$

Onde:

Q_l = vazão total de líquido sendo introduzida no lavador Venturi (m^3/s)

N_o = número de orifícios de injeção de líquido (adimensional)

$$\frac{l^{**}}{d_o} = 0,1145 \frac{\rho_l \cdot V_j}{\rho_g \cdot V_g} \quad (6)$$

Onde:

l^{**} = penetração máxima da linha central do jato (mm)

3.2.9.2. Eficiência de coleta de material particulado em um lavador Venturi

A eficiência de coleta de material particulado no lavador Venturi, segundo Guerra (2009), é influenciada por vários fatores, tais como:

- a) tamanho da partícula;
- b) razão líquido-gás;
- c) fração de líquido que se deposita na parede na forma de filme;
- d) comprimento da garganta;
- e) configuração geométrica do lavador;
- f) distribuição do tamanho de gotas;
- g) evolução das gotas ao longo do Venturi;
- h) penetração do jato líquido.

De acordo com Lora (2002), define-se para um lavador Venturi o conceito de eficiência global (total) quando se dispõe dos resultados de medições da carga de partículas (concentração) na entrada e na saída do Venturi conforme a Equação (7):

$$E = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

E = eficiência de coleta de material particulado (%)

C_i = concentração na entrada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_f = concentração na saída ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Existe uma grande quantidade de trabalhos teóricos, empíricos e semi-empíricos que predizem a eficiência de coleta em lavadores Venturi. Os primeiros trabalhos foram apresentados por Johnstone, Field e Tassler¹¹ (1954 apud Meili, 2006) que avaliaram os mecanismos de coleta e funcionamento e compreenderam como as diversas variáveis de projeto afetam o desempenho (eficiência) do Venturi, além de relatarem em seu estudo que o mecanismo inercial (impactação inercial) é predominante nos lavadores Venturi (conforme já mencionado) e proporem um modelo matemático no qual foi incluído o diâmetro da partícula como parâmetro, o que permite calcular eficiências fracionárias em relação a um pó com determinada distribuição granulométrica. A equação de eficiência de Johnstone, Field e Tassler (1954) é apresentada pela Equação (8):

$$E = 1 - \exp\left(-k \frac{Q_L}{Q_g} \cdot \sqrt{\Psi}\right) \quad (8)$$

Onde:

k = coeficiente de correlação - fator empírico – valor usualmente entre 13 e 27 - adimensional

Q_L = vazão de líquido (m^3/s)

¹¹JOHNSTONE, H. F.; FIELD, R. B.; TASSLER, M. C. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 45, p. 1601-1608, 1954 apud MEILI, L. **Estudo do desempenho de lavadores de gases do tipo Venturi com seção circular**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

Q_g = vazão de gás (m^3/s)

ψ = parâmetro de impactação inercial – adimensional, dado pela Equação (9)

$$\Psi = \frac{\rho_p d_p^2 V_g C}{18 \mu_g D} \quad (9)$$

Onde:

ρ_p = densidade da partícula (kg/m^3)

d_p = diâmetro da partícula (μm)

V_g = velocidade do gás na garganta (m/s)

C = fator de correção de Cunningham, dado pela Equação (10)

μ_g = viscosidade do gás ($kg/m.s$)

D = diâmetro da gota (μm)

$$C = 1 + \frac{0,16 \cdot 10^{-4}}{d_p} \quad (10)$$

3.2.9.3. Eficiência de coleta de gases em um lavador Venturi

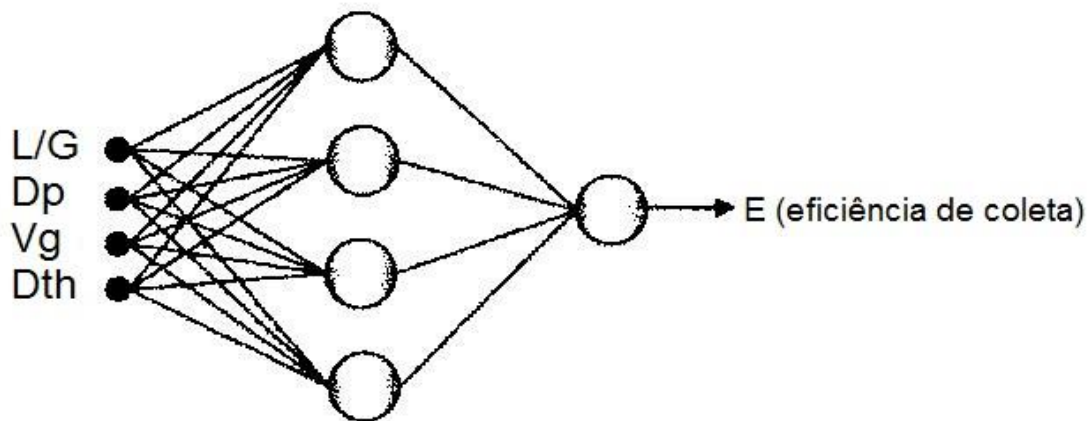
A eficiência de coleta de gases em um lavador Venturi, segundo Pourmohammadbagher et al. (2011) também pode ser calculada através da Equação (7) utilizada para o cálculo da eficiência de coleta de material particulado.

3.2.9.4. Estudos recentes sobre a eficiência de coleta de material particulado e de gases poluentes em um lavador Venturi

Taheri e Mohebbi (2008) trabalharam com redes neurais artificiais para prever (estimar)

a eficiência de coleta em um lavador Venturi. Os dados experimentais de entrada foram: diâmetro de partícula (D_p), velocidade de gás na garganta (V_g), razão líquido-gás (L/G), queda de pressão (ΔP); e o dado experimental de saída foi a eficiência de coleta de material particulado (E). O propósito do estudo foi aplicar as redes neurais para determinar o número de neurônios (nós), a dinâmica e as taxas de aprendizagem para minimizar o tempo e o esforço necessário para encontrar a arquitetura ideal. Foram montadas quatro redes (quatro testes). As três primeiras investigaram a eficiência de coleta de partículas no lavador Venturi e a quarta estudou a eficiência de coleta de SO_2 por uma solução alcalina. Os dados experimentais foram extraídos de três lavadores Venturi retangulares com diferentes tamanhos e de um circular. Para o teste 1, por exemplo, foram utilizados dois lavadores retangulares (4 in x 12 in e 6 in x 34 in) e os dados experimentais de entrada, retirados dos trabalhos de Brink e Contant (1958) e de Calvert, Lundgreen e Mehta (1972), foram o diâmetro de partícula (D_p), a velocidade do gás na garganta (V_g), a razão líquido-gás (L/G) e o diâmetro hidráulico da garganta (D_{th}). A rede neural para este teste encontra-se demonstrada na Figura 9.

Figura 9 – Rede neural para determinação da eficiência de coleta de material particulado



Fonte: (TAHERI E MOHEBBI, 2008)

Os resultados experimentais e os obtidos pelas redes neurais encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 – Eficiências de coleta experimentais e por redes neurais

Estudo	D _p (μm)	L/G (m^3/m^3)	V _g (m/s)	Eficiência global (%)	
				Experimental*	Rede neural**
Efeito do diâmetro da partícula na eficiência de coleta	0,5	0,00173	66,45	0,8	0,85
	0,6			0,9	0,89
	0,8			0,95	0,94
	1,0			0,98	0,98
	1,5			0,99	0,99
Efeito da velocidade gás na garganta na eficiência de coleta	1,0	0,000267	91,44	0,07	0,025
			137,16	0,30	0,27
			182,8	0,40	0,42

*BRINK e CONTANT (1958)

** valores aproximados tirados de curva plotada pelos autores

Fonte: (TAHERI E MOHEBBI, 2008)

Através dos dados experimentais, observou-se que:

- mantendo-se a velocidade do gás na garganta e a vazão de líquido, a eficiência de coleta é maior para partículas maiores;
- para um mesmo diâmetro de partícula, aumentando-se a velocidade do gás na garganta a eficiência de coleta de partículas aumenta;
- para um mesmo diâmetro de partícula, aumentando-se a vazão de líquido, ou seja, permanecendo a razão líquido-gás constante e a velocidade do gás na garganta aumentando, a eficiência de coleta de partículas aumenta;

A partir da aplicação das redes neurais, Taheri e Mohebbi (2008) observaram um erro médio entre os valores experimentais e os valores obtidos por redes neurais para a eficiência de coleta de material particulado pelo Venturi de 2,0% e concluíram, portanto, que o método das redes neurais é eficiente.

Costa et al. (2008) utilizaram dois lavadores Venturi, um de seção retangular e outro de seção circular, em escala de laboratório, para o controle do material particulado proveniente da queima de biomassa advinda de uma indústria madeireira. As variáveis estudadas foram a vazão de líquido (Q_L) (0,4, 0,6 e 0,8 L/min), a velocidade do gás (V_g) (20 e 22 m/s) e o

comprimento de garganta de 90 mm. O sistema de amostragem consistiu de uma bomba a vácuo para sucção da corrente gasosa, um medidor de fluxo mássico, um sistema de bocais isocinéticos e uma sonda de amostragem. As partículas (diâmetro de 17 μm) eram succionadas pela sonda localizada no centro do duto através da bomba a vácuo e o pó retido numa membrana filtrante era depois analisado (massa de partículas) para obtenção da eficiência global através da Equação (7) em cada teste. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 – Eficiências de coleta de material particulado para diferentes vazões de líquido, velocidades de gás e geometrias de lavador Venturi

Lavador Venturi	Comprimento de garganta (mm)	Q_L (L/min)	Eficiência global (%)	
			$V_g = 20$ m/s	$V_g = 22$ m/s
Retangular	90	0,4	97,6	98,0
			97,8	98,2
			97,4	97,8
			96,2	96,5
Circular	90	0,6	96,9	97,0
		0,8	96,8	97,1

Fonte: (COSTA et al., 2008)

Foram obtidas eficiências de coleta superiores a 96% em todos os testes realizados por Costa et al. (2008), sendo que o Venturi retangular apresentou os maiores valores. A eficiência de coleta aumentou com o aumento da velocidade do gás na garganta para ambas as geometrias de lavador. A vazão de líquido de 0,6 L/min proporcionou a maior eficiência dentre os testes, com exceção para o Venturi circular com velocidade do gás na garganta de 22 m/s que apresentou maior eficiência para vazão de líquido de 0,8 L/min.

Mi e Yu (2012) utilizaram um modelo novo (equipamento piloto) de lavador Venturi baseado na geometria básica de um lavador Venturi para avaliar experimentalmente queda de pressão, eficiência de coleta de partículas e eficiência de dessulfurização. Este novo equipamento consiste de um ventilador induzido, um regulador de gás, um silenciador, dutos de gás (300 mm de diâmetro), o novo lavador Venturi com estrutura em forma de favo de mel,

um sistema de injeção de água, manômetros em forma de U, um gerador de poeira e um gerador de SO₂. Quando o ventilador induzido era ligado a corrente gasosa contendo partículas e SO₂ era forçada a passar pelo lavador Venturi. A maior parte das partículas e SO₂ foram removidos do fluxo de gás e as águas residuais foram descarregadas em um tanque de lixívia alcalina para para reciclagem e o gás purificado foi descarregado na atmosfera através de uma chaminé.

A eficiência global de coleta de partículas foi determinada variando-se as concentrações de partículas e a razão líquido-gás. Os resultados encontram-se nas Tabelas 14 e 15:

Tabela 14 – Eficiências de coleta de material particulado para diferentes concentrações (C) de partículas

D _p (μm)	L/G (L/m ³)	V _g (m/s)	Eficiência global* (%)			
			C = 200 mg/m ³	C = 250 mg/m ³	C = 300 mg/m ³	C = 350 mg/m ³
10	0,5	40	94	94	93	92,5
45			---	---	96	97

*valores aproximados tirados de curvas plotadas pelos autores

Fonte: (MI e YU, 2012)

Tabela 15 – Eficiências de coleta de material particulado para diferentes razões líquido-gás

D _p (μm)	C (mg/m ³)	V _g (m/s)	L/G (L/m ³)	Eficiência global* (%)
10	353	40	0,1	92,5
			0,2	93,0
			0,4	92,5
			0,6	92,5
			0,8	95,0
			1,2	96,0

*valores aproximados tirados de curvas plotadas pelos autores

Fonte: (MI e YU, 2012)

Os resultados obtidos por Mi e Yu (2012) demonstram que:

- as máximas eficiências foram atingidas para as partículas maiores (45 μm);
- a eficiência de coleta aumenta com o aumento da razão líquido-gás, sendo que para razões de 0,4 e 0,6 L/m^3 permanece praticamente constante.

Ali et al. (2013) utilizaram um método computacional de simulação da dinâmica de fluidos (CFD) para estudar a eficiência na remoção de partículas poluentes de uma corrente gasosa. Segundo os autores, este método é amplamente utilizado na pesquisa devido a uma extensa gama de recursos que são usados para analisar e melhorar o desempenho de sistemas ou projetos em diferentes áreas da ciência e engenharia. O CFX é um desses recursos que utiliza a técnica de volume finito para estudar os fenômenos complexos do escoamento multifases, das reações químicas, da turbulência, da transferência de calor e massa, entre outros, para utilização no projeto de um equipamento (no caso, um lavador Venturi).

Para seu estudo, Ali et al. (2013) utilizaram partículas hidrofóbicas de TiO_2 com diâmetro de 1 μm e densidade de $4,23 \text{ g}/\text{cm}^3$ e o Venturi operou com vazões mássicas de gás de 0,09, 0,115 e 0,14 kg/s e vazões mássicas de líquido de 0,1, 0,13 e 0,16 kg/s . A eficiência de coleta de partículas foi calculada conforme a Equação (7) já mencionada. As eficiências de coleta observadas para as diferentes vazões de líquido e de gás encontram-se demonstradas na Tabela 16.

Tabela 16 – Eficiências de coleta de material particulado para diferentes vazões de líquido e de gás

Vazão de líquido (kg/s)	Vazão de gás (kg/s)	Eficiência global* (%)	
		Experimental	Simulação
0,1	0,09	0,915	0,905
		0,94	0,955
		0,955	0,965
0,13	0,115	0,93	0,9
	0,115	0,95	0,965
	0,14	0,96	0,97
0,16	0,14	0,935	0,9
		0,96	0,965
		0,98	0,982

*valores aproximados tirados de curvas plotadas pelos autores

Fonte: (ALI et al., 2013)

As partículas foram introduzidas com o gás na seção convergente do Venturi. A garganta era muito curta e, por isso, a maioria das colisões entre as partículas e as gotas de líquido foram observadas na seção divergente do Venturi. A colisão das partículas com as gotas de líquido depende principalmente da impactação inercial, ou seja, as partículas colidem com as gotas ao invés de fluírem em torno delas (como fazem as moléculas do gás, mais leves). As colisões aumentam com o aumento da velocidade relativa entre as gotas e as partículas e com a diminuição do diâmetro das gotas. Com o aumento da vazão de gás o diâmetro das gotas diminui. As chances de interação entre as partículas e as gotas aumenta e por fim a eficiência de coleta também aumenta.

Os resultados experimentais e simulados encontrados por Ali et al. (2013) foram muito próximos, demonstrando que a técnica utilizada de simulação prediz satisfatoriamente os resultados experimentais.

Ali et al. (2013) em outro estudo investigaram a eficiência de coleta em um lavador Venturi para velocidades de gás na garganta de 130, 165 e 200 m/s e vazões de líquido de 0,3 a 1 m³/h, com concentração de partículas entre 0,1 e 1 g/m³. As partículas foram as mesmas do estudo anterior com as mesmas características. As amostras de partículas foram coletadas por amostragem isocinética e as concentrações de entrada e de saída foram medidas pela técnica de filtração, ou seja, as partículas foram coletadas em papel filtro e a massa total das partículas coletadas é encontrada pela diferença entre a massa do papel de filtro que contém as partículas e o peso do papel de filtro. A eficiência de coleta de partículas foi calculada conforme a Equação (7) já mencionada.

As conclusões tiradas pelos autores foram:

- com o aumento da velocidade do gás na garganta (m/s), a taxa de fluxo de líquido diminuiu (m³/h);
- aumentando-se a vazão de líquido e a velocidade do gás na garganta simultaneamente, a eficiência de coleta das partículas também aumentou devido a alta velocidade relativa entre o gás e as gotas na garganta;
- aumentando-se a concentração das partículas e a velocidade do gás na garganta simultaneamente, a eficiência de coleta das partículas também aumentou com um máximo de 99,5% a uma velocidade do gás na garganta de 200 m/s (concentração de partículas de 0,94 g/m³).

Pourmohammadbagher et al. (2011), diferentemente dos autores anteriores, realizaram

um estudo sobre a remoção simultânea de poluentes gasosos (NO, NO₂, SO₂ e CO₂) com auxílio de um lavador Venturi e tendo como líquidos a água e uma solução 2% v/v de NaOH.

As vazões de líquido (Q_L) foram de 1,5, 4, 6,5, 9 e 11,5 L/min e as da corrente gasosa (Q_g) foram de 3,3, 5, 6,6 e 8,3 m³/min. A eficiência de coleta foi calculada com base na diferença entre as concentrações dos gases poluentes na entrada e na saída do Venturi, conforme a Equação (7), utilizando um amostrador de gases baseado no método eletroquímico de medição de concentração de gases poluentes. Os resultados obtidos encontram-se demonstrados nas Tabela 17 a 19.

Tabela 17 – Eficiência de coleta de gases poluentes em função da vazão de gás – vazão de água de 4 L/min e vazões de gás de 3,3, 5, 6,6 e 8,3 m³/min

Q _g (m ³ /min)	Eficiência global* (%)			
	NO	NO ₂	SO ₂	CO ₂
3,3	25	55	35	35
5	23	58	25	30
6,6	18	50	28	25
8,3	8	53	30	20

*valores aproximados tirados de curvas plotadas pelos autores

Fonte: (POURMOHAMMADBAGHER et al., 2011)

Tabela 18 – Eficiência de coleta de gases poluentes em função do líquido utilizado – vazão de líquido de 4 L/min e vazão da corrente gasosa de 3,3 m³/min

Poluente gasoso	Eficiência global* (%)	
	Água	Solução 2% v/v de NaOH
NO	28	78
NO ₂	58	88
SO ₂	41	100
CO ₂	39	80

*valores aproximados tirados de curvas plotadas pelos autores

Fonte: (POURMOHAMMADBAGHER et al., 2011)

Tabela 19 – Eficiência de remoção dos gases poluentes em função da razão líquido-gás – vazão da corrente gasosa de 3,3 m³/min e vazões de líquido iguais a 1,5, 4, 6,5, 9 e 11,5 L/min

Poluente gasoso	L/G (L/m ³)	Eficiência global* (%)	
		Água	Solução 2% v/v de NaOH
NO	0,45	23	70
	1,21	25	77
	1,97	23	75
	2,73	22	69
	3,48	21	62
NO ₂	0,45	48	85
	1,21	55	88
	1,97	58	85
	2,73	55	82
	3,48	50	78
SO ₂	0,45	28	100
	1,21	34	100
	1,97	34	100
	2,73	34	100
	3,48	34	100
CO ₂	0,45	25	70
	1,21	33	80
	1,97	33	74
	2,73	25	66
	3,48	25	60

*valores aproximados tirados de curvas plotadas pelos autores

Fonte: (POURMOHAMMADBAGHER et al., 2011)

Da Tabela 17 observa-se que, as menores eficiências de coleta ocorreram para o NO devido ao NO ser relativamente insolúvel em água. NO₂, SO₂ e CO₂ tiveram uma pequena diminuição da eficiência com o aumento da vazão de gás.

Na Tabela 18, observou-se um aumento na eficiência de coleta de todos os gases com a utilização da solução 2% v/v de NaOH, sendo que o SO₂ foi completamente removido da corrente gasosa (eficiência global de coleta de 100%). Com relação à Tabela 19, o aumento da vazão de líquido conduziu a um aumento na eficiência de coleta de todos os poluentes até um ponto máximo, diminuindo posteriormente com aumentos nas vazões de líquido. Estes

resultados mostram a importância do contato líquido-gás, pois com maiores vazões de líquido o contato entre este e o gás é prejudicado e as eficiências de coleta diminuem.

Segundo Pourmohammadbagher et al. (2011), os resultados indicaram que as maiores eficiências de coleta utilizando a solução de NaOH 2% v/v ocorrem quando a razão líquido-gás é de 1,2 L/m³ com valores de 77, 88 e 80% para NO, NO₂ e CO₂, respectivamente (Tabela 19). A coleta de SO₂ foi independente da razão líquido-gás. Para a coleta com água ocorre o mesmo, ou seja, as maiores eficiências (25, 34 e 33% respectivamente para NO, SO₂ e CO₂) para a razão líquido-gás de 1,2 L/m³, com exceção para o NO₂ que apresenta maior eficiência (58%) com 1,97 L/m³.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será descrita a metodologia utilizada para caracterização dos diferentes tipos de biomassa, os equipamentos e instrumentos utilizados para amostragem de material particulado e de gases emitidos com a sua queima e os equipamentos e instrumentos utilizados para o controle ambiental desses poluentes.

4.1. MATERIAIS

No presente estudo foram utilizados diversos tipos de biomassa (Figura 10): bagaço de cana-de-açúcar (Figura 10 (a)), casca de café (Figura 10 (b)), casca de arroz (Figura 10 (c)), cavaco de eucalipto (Figura 10 (d)) e cavaco de pinus (Figura 10 (e)) adquiridos de destilarias (bagaço de cana-de-açúcar), beneficiadoras (cascas de arroz e de café) e serraria (cavacos de madeiras).

Figura 10 - Biomassas utilizadas neste trabalho: (a) bagaço de cana-de-açúcar; (b) casca de café; (c) casca de arroz; (d) cavaco de eucalipto; (e) cavaco de pinus



Fonte: Própria autora

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

Os diferentes tipos de biomassa estudados neste trabalho foram caracterizados através de análise química imediata, ou seja, foram determinados os teores de umidade, de materiais voláteis, de cinzas, de carbono fixo e, também, através da determinação de seus poderes caloríficos superiores.

4.2.1. Análise química imediata

Os procedimentos para a análise química imediata basearam-se na norma ASTM E-870-82 “Análise Imediata para Biomassa e Resíduos”, baseada nas normas ASTM D-3172-07a “Prática padrão para análise de carvão e coque”, D-3173-11 “Análise de umidade para carvão e coque”, D-3174-12 “Análise de cinzas para carvão e coque”, D-3175-11 “Análise de materiais voláteis para carvão e coque” e nas normas ABNT NBR 8112:1986 “Carvão vegetal – análise imediata – método de ensaio”, ABNT NBR 6923:1981 “Carvão vegetal – amostragem e preparação da amostra” e ABNT NBR 14929:2003 “Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - método por secagem em estufa”.

4.2.1.1. Preparo da amostra

As amostras dos diferentes tipos de biomassa foram preparadas a partir da coleta de maneira uniforme dentro do lote para queima, da moagem desse material e do seu peneiramento (material que passou pela peneira de 35 mesh – 0,500 mm e ficou retido na peneira de 60 mesh – 0,250 mm). Para cada análise (teor de umidade, teor de materiais voláteis, teor de cinzas) foram utilizadas duas amostras da biomassa (análise em duplicata) e calculada uma média aritmética.

4.2.1.2. Teor de umidade

A medição do teor de umidade de uma substância pode ser feita de várias maneiras, sendo que a utilizada neste trabalho foi baseada em estufa de laboratório, consistindo em deixar a amostra úmida (μ), preparada conforme o item 4.2.1.1, por 24 horas a $103\pm 2^\circ\text{C}$ em uma estufa de laboratório, com posterior determinação da sua massa seca (ms).

A Equação (11) foi utilizada para a determinação do teor de umidade.

$$U(\%) = \frac{\mu - ms}{ms} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

μ = massa úmida da amostra, g

ms = massa seca da amostra, g

$U(\%)$ = teor de umidade em base seca

4.2.1.3. Teor de materiais voláteis

O teor de materiais voláteis foi medido com o auxílio de uma mufla, previamente aquecida a $850\pm 20^\circ\text{C}$, na qual foi colocado um cadinho tampado de cada vez contendo a amostra de biomassa preparada e seca (ms). Após aproximadamente 6 minutos, o cadinho ainda tampado foi retirado da mufla e colocado em um dessecador. Após 1 hora, aproximadamente, determinou-se a massa da amostra em balança analítica (mf).

A Equação (12) foi utilizada para determinação do teor de voláteis.

$$MV(\%) = \frac{ms - mf}{mi} \times 100 \quad (12)$$

Onde:

m_s = massa seca da amostra, g

m_f = massa final da amostra, g

$MV(\%)$ = teor de materiais voláteis

4.2.1.4. Teor de cinzas

Para a determinação do teor de cinzas também foi utilizada a mesma mufla descrita para a determinação do teor de materiais voláteis, aquecida até 750°C, na qual foi colocada a amostra de biomassa preparada e seca (cadinho sem tampa) (m_s). Após um período de 6 horas retirou-se a amostra da mufla e esfriou-se em dessecador por 1 hora e pesou-se em balança analítica (m_r).

A Equação (13) foi utilizada para o cálculo do teor de cinzas.

$$CZ(\%) = \frac{m_r}{m_s} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

m_r = massa do resíduo, g

m_s = massa seca da amostra, g

$CZ(\%)$ = teor de cinzas

4.2.1.5. Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo é uma medida indireta e pode ser calculado através da Equação 14:

$$CF(\%) = 100 - (MV + CZ) \quad (14)$$

Onde:

CF(%) = teor de carbono fixo

MV(%) = teor de materiais voláteis

CZ(%) = teor de cinzas

4.2.2. Poder calorífico superior

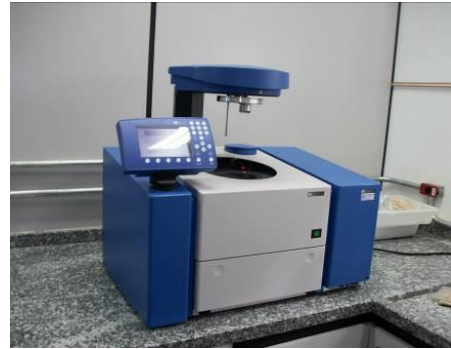
O poder calorífico superior (PCS) das biomassas foi determinado através de uma bomba calorimétrica (Figura 11 (a)) inserida em um sistema calorimétrico ou calorímetro (Figura 11 (b)). Para cada biomassa a análise do PCS foi feita em duplicata, ou seja, foi determinado o PCS de duas amostras de cada biomassa e posteriormente calculada uma média entre os valores.

Aproximadamente 0,5g de amostra moída de cada biomassa foi colocada em um cadinho de quartzo, o qual foi introduzido na bomba calorimétrica. No reservatório da bomba acrescentou-se água destilada e oxigênio à pressão de 30 bar (cilindro com 99,9% de pureza). Posteriormente foi conectado um fio de algodão em um fio de níquel (faz a ligação entre dois eletrodos responsáveis pela condução da eletricidade) para que esta eletricidade fosse transformada em faísca e causasse a ignição da amostra quando em contato com oxigênio. Vedou-se a bomba e esta foi introduzida na cápsula localizada dentro do sistema calorimétrico. Esperou-se cerca de 5 minutos para a leitura do poder calorífico superior dada diretamente na tela do sistema calorimétrico (onde todas as variáveis experimentais podem ser visualizadas e alteradas e onde o valor do PCS é verificado).

Figura 11 – Análise de poder calorífico: (a) bomba calorimétrica; (b) calorímetro



(a)



(b)

Fonte: Própria autora

4.3. AMOSTRAGEM DE MATERIAL PARTICULADO

Para cada queima foi realizada uma análise preliminar de umidade da biomassa (análise em duplicata e posterior cálculo por média aritmética) e determinado o seu poder calorífico superior (análise em duplicata e posterior cálculo por média aritmética).

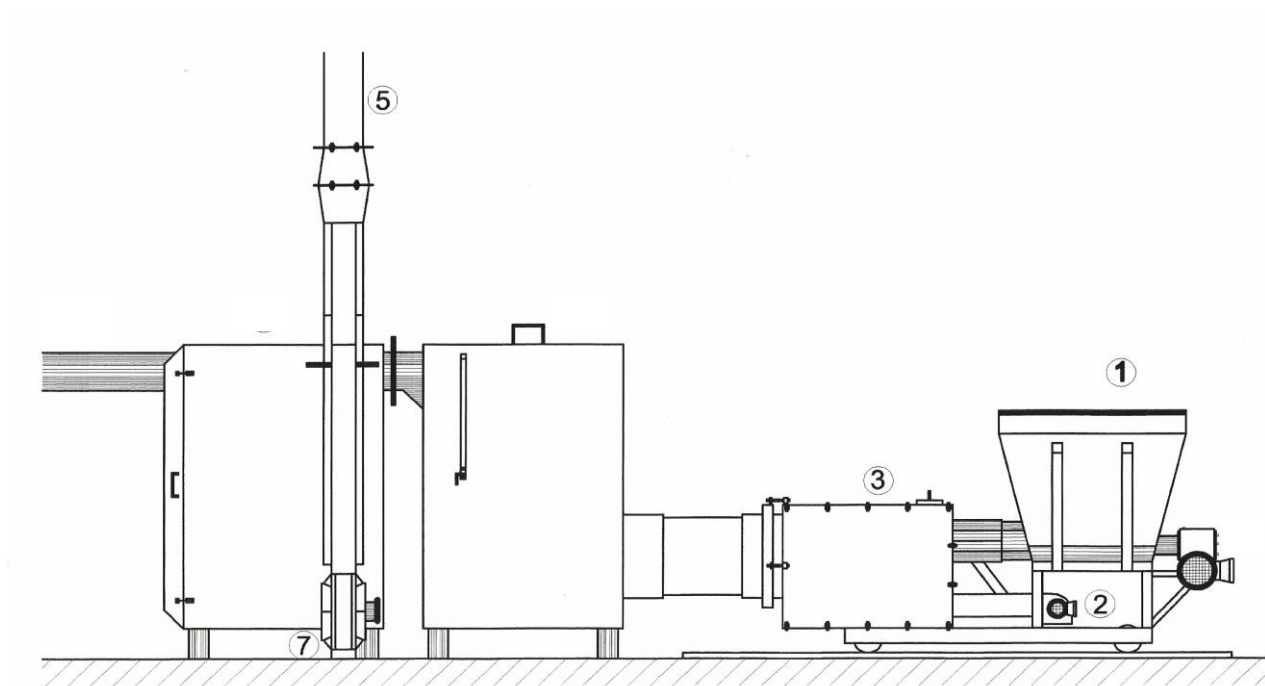
Para a amostragem de material particulado foram realizados três testes de queima com o bagaço de cana-de-açúcar, dois com a casca de café, dois com a casca de arroz, um com o cavaco de eucalipto, dois com o cavaco de pinus e um com a mistura de cavacos de eucalipto e de pinus.

4.3.1. Local de amostragem

Para as queimas das biomassas deste trabalho foi utilizado um sistema de queima de biomassa composto principalmente por um alimentador de biomassa e um queimador de biomassa, além de equipamentos auxiliares (Figuras 12 e 13). A alimentação das biomassas em todos os testes foi realizada em batelada, ou seja, o alimentador (Figura 13) recebia a biomassa de forma manual até completar sua capacidade volumétrica. A rosca sem fim acoplada a este alimentador era acionada e a biomassa encaminhada para o queimador (Figura 13) até que toda a biomassa contida no alimentador fosse consumida e este pudesse ser novamente alimentado.

A câmara de combustão (queimador de biomassa Biodragão da *MDL Ambiental* – modelo MDL90 MRD) possui um ventilador responsável por manter a chama acesa, dispersando o fogo para a saída da mesma. Há um sistema de controle de vazão de ar para manutenção da qualidade da combustão (queima). Além destes, possui uma grelha interna que distribui o ar gerado pelo ventilador, um cinzeiro para recolhimento de resíduos e uma porta lateral para manutenções. Este conjunto condiciona uma chama com temperatura entre 800 e 1200°C. Dados técnicos do queimador de biomassa: altura de 1,3 m, largura de 0,8 m, comprimento de 2,2 m, produção de energia de 315000 kcal/h (potência de 0,36 MW), consumo de biomassa de 90 kg/h, produção máxima de vapor de 400 kg/h e capacidade de armazenamento de biomassa de 0,3 m³.

Figura 12 – Desenho esquemático do sistema de queima de biomassa



Onde:

1 = alimentador de biomassa (com rosca sem fim)

5 = chaminé

2 = controlador de ar de alimentação

7 = soprador

3 = queimador de biomassa

Fonte: Eng. Anderson de Jesus R. Martins

Figura 13 – Sistema de queima de biomassa - queimador acoplado a um alimentador de biomassa



Fonte: Própria autora

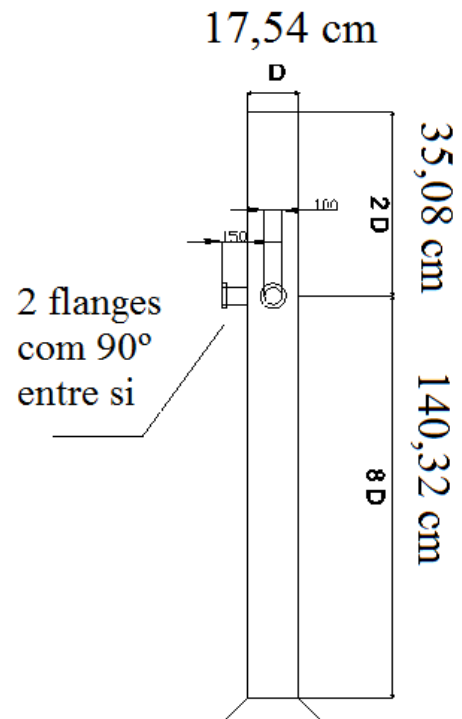
A amostragem de material particulado emitido com as queimas, conforme norma técnica CETESB L9.221 (1990) mencionada no item 3.2.7, foi realizada em uma seção transversal a 8 diâmetros internos à jusante (8 D) e 2 diâmetros internos à montante (2 D) dos distúrbios encontrados na chaminé do queimador de biomassa, de acordo com as Figuras 14 (a) e 14 (b). Além disso, foram observados os pontos de amostragem a, b, c e d nos dois eixos na seção transversal escolhida, conforme também mencionado no item 3.2.7.

Foram realizadas três amostragens para o bagaço de cana-de-açúcar (uma das amostras apresentou um teor de umidade muito elevado, sendo necessária uma terceira amostragem), duas para a casca de café, duas para a casca de arroz, uma para o cavaco de eucalipto, uma para o cavaco de pinus e uma para a mistura de cavacos de eucalipto e pinus.

Figura 14 – Chaminé do queimador de biomassa (a) e Esquema das posições dos orifícios de amostragem na chaminé (b). Observação: $D = 17,54$ cm.



(a)



(b)

Fonte: Própria autora e Eng. Anderson de Jesus R. Martins

4.3.2. Instrumento de amostragem

O instrumento utilizado para a amostragem de material particulado em dutos (amostrador) foi o DataRAM 4, modelo DR-4000, desenvolvido pela *ThermoFisher Scientific* (Figura 15). Ele foi projetado para medir a concentração de matéria particulada (líquida ou sólida) em aspersão no ar, assim como o tamanho médio da partícula, a temperatura e umidade do fluxo gasoso, fornecendo leitura discreta e contínua, bem como o registro eletrônico dessas informações.

Figura 15 – Amostrador de material particulado DataRAM 4



Fonte: Própria autora

Este instrumento é um monitor nefelométrico¹² de alta sensibilidade e de duplo comprimento de onda (fotométrico), que foi otimizado para o monitoramento de fração de partícula de poeira aspergida no ar, fumaça, fumos e névoas em ambientes abertos, atmosféricos, industriais, de pesquisa ou internos. Seu sistema óptico incorpora duas fontes de iluminação (feixes de luz), uma emitindo em comprimento de onda de pico 660 nm (vermelho) e outra em comprimento de onda de pico 800 nm (infravermelho). Ambas as fontes funcionam alternativamente com pulso de 27s de frequência emitidas de forma simétrica e em mesmo ângulo. Após estes dois feixes atravessarem a região sensível dentro do duto do fluxo, eles alcançam com sua luz o final onde há detectores de referência correspondentes, os quais detectam a intensidade de cada um dos feixes.

As especificações do equipamento encontram-se na Tabela 20 abaixo:

Tabela 20 - Especificações do amostrador de material particulado DataRAM 4

¹²Nefelometria = técnica analítica quantitativa baseada na interação da radiação eletromagnética com partículas em suspensão. Aos efeitos da aplicação da técnica para estudos da poluição do ar interessa a dispersão da radiação nos aerossóis poluentes. Ou seja, é a medição do grau de turbidez de um meio, originada pela presença, nesse meio, de pequenas partículas que o tornam opticamente não homogêneo (ACREBIOCLIMA, 2011).

Faixa de medida de concentração	0,0001 a 400 mg/m ³
Faixa de tamanho de partícula	0,04 a 4,0 µm
Faixa de medição de temperatura	-15° a 60°C
Faixa de medida de umidade relativa	0 a 100%
Faixa de taxa de fluxo de amostragem	1,0 a 3,0 L/m

Fonte: Manual do amostrador de material particulado DataRAM 4

O DataRAM 4, modelo DR-4000 pode ser utilizado com vários acessórios e os utilizados neste trabalho foram:

a) Sonda isocinética (Figura 16 (a)) que possibilita a coleta em chaminés (dutos), conforme mencionado no item 3.2.7.

De acordo com a velocidade do ar no duto (medida com um anemômetro), medida previamente ao teste de queima, determinou-se qual boquilha de amostragem seria utilizada. São quatro boquilhas que trabalham nas faixas de velocidade de 0 a 6,35 m/s (boquilha 1K), de 6,35 a 12,7 m/s (boquilha 2K), de 11,43 a 19,05 m/s (boquilha 3K) e de 15,24 a mais de 25,4 m/s (boquilha 4K);

b) Seletor de partículas (Figura 16 (b)) que retém as partículas com diâmetro acima de 2,5µm (não consideradas neste trabalho) e permite a leitura somente das menores que 2,5 µm.

Utilizou-se um filtro de papel para retenção das partículas maiores de 2,5 µm. Para cada teste de queima esse filtro foi substituído por outro limpo;

c) Aquecedor (Figura 16 (c)) para diminuir a umidade das partículas, ou seja, eliminar os efeitos de coagulação e condensação do vapor de água nas partículas.

Todas as biomassas foram previamente secas ao ambiente, entretanto há a água formada pela própria combustão, o que justifica a utilização desse acessório.

Figura 16 – Acessórios utilizados com o DataRAM 4: (a) sonda isocinética – com boquilhas encapsuladas por borracha vermelha para proteção; (b) seletor de partículas – já instalado no amostrador; (c) aquecedor



(a)



(b)



(c)

Fonte: Própria autora

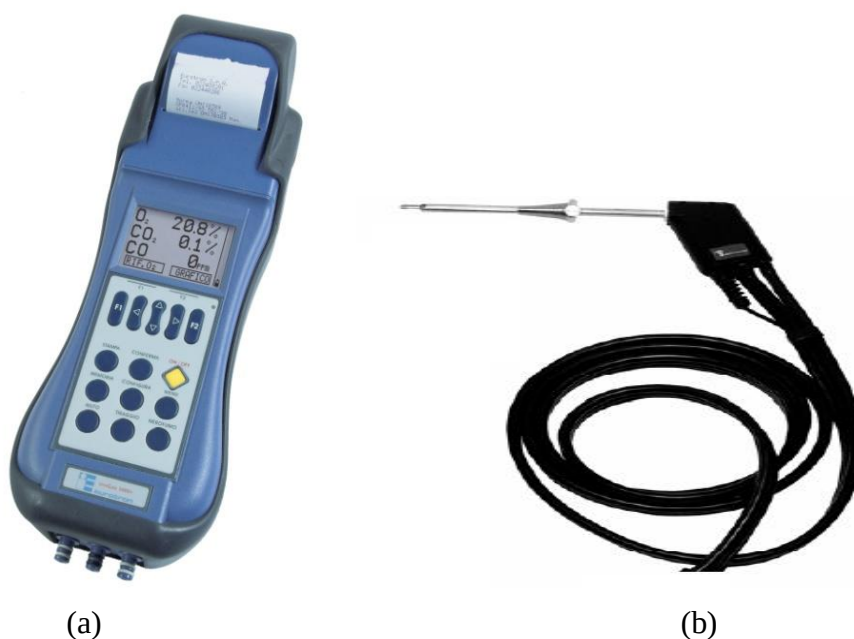
4.4. AMOSTRAGEM DE GASES

Para a amostragem de gases foram observados um dos testes de queima com o bagaço de cana-de-açúcar (teste 3), um com a casca de café (teste 1), um com a casca de arroz (teste 2) e um com a mistura de cavacos de eucalipto e de pinus escolhidos devido à sua melhor representatividade comparando-se com a literatura.

4.4.1. Local e instrumento de amostragem

A amostragem de gases emitidos com a queima das biomassas foi realizada simultaneamente à amostragem de material particulado para alguns testes. O instrumento de amostragem (amostrador) foi o UniGas 3000+ da *Eurotron Instruments* (Figura 17). A sonda de amostragem foi inserida a aproximadamente 8 diâmetros internos à jusante e 2 diâmetros à montante dos distúrbios encontrados na chaminé do queimador de biomassa (Figura 14), entretanto, diferentemente da amostragem do material particulado, foi observado apenas um ponto de amostragem, pois não há necessidade de que a amostragem de gases seja feita de forma isocinética (não há norma técnica regulamentadora).

Figura 17 – Amostrador de gases UniGas 3000+ (a) e sonda de amostragem (b)



Fonte: Manual do Unigas 3000+

Este instrumento multifuncional compacto baseado em um microprocessador contém um analisador de gases, um monitor de emissões e um indicador de parâmetros ambientais.

Sensores eletroquímicos internos fazem a leitura das concentrações de oxigênio (O_2), de monóxido de carbono (CO), de NO_x (óxidos de nitrogênio) e de SO_2 (dióxido de enxofre). A temperatura do gás e do ar são utilizados em conjunto com a análise de gás para calcular a eficiência, o excesso de ar, e a concentração de CO_2 .

As especificações do equipamento encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21 - Especificações do UniGas 3000+

Gás	Faixa de medição
O ₂	0 a 25%
CO	0 a 8000 ppm
NO	0 a 4000 ppm
SO ₂	0 a 4000 ppm

Fonte:Manual do UniGas 3000+

4.5. CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO E GASES POLUENTES

4.5.1. Local e equipamento de controle

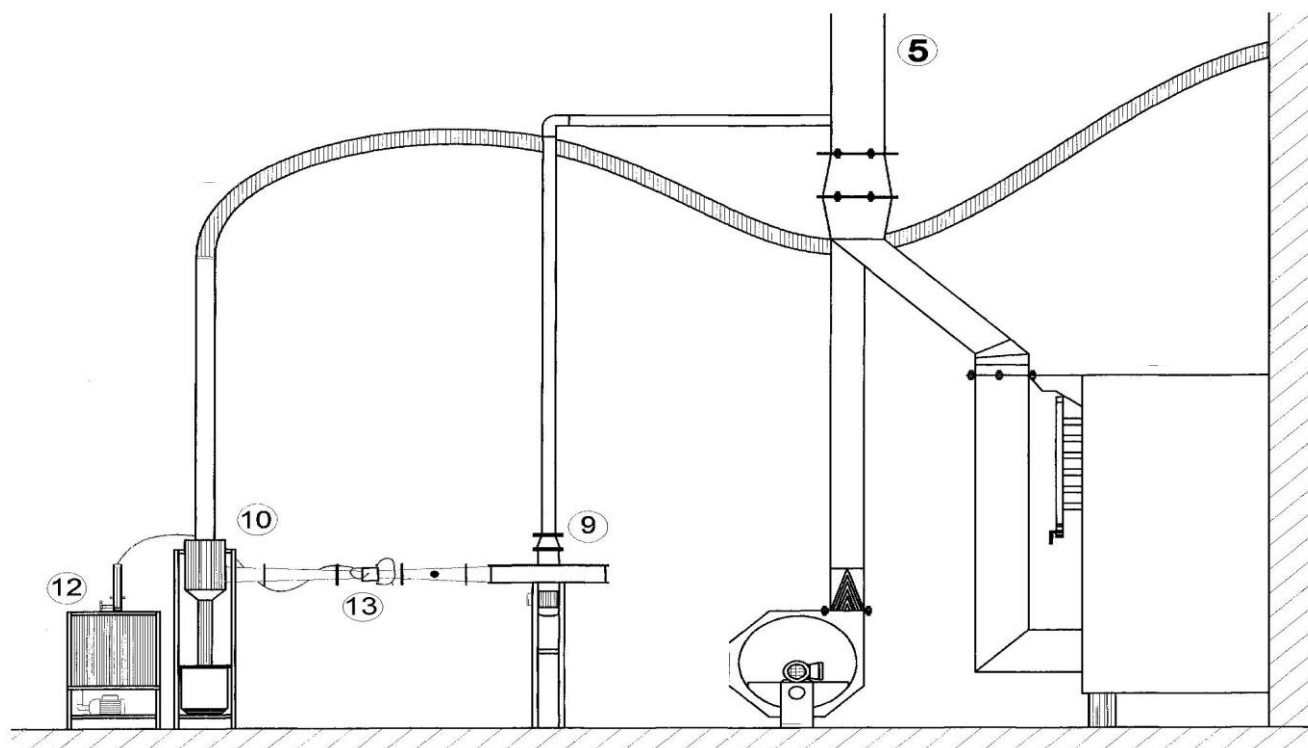
As análises utilizando o Lavador Venturi para controle de material particulado e gases poluentes emitidos com a queima dos diferentes tipos de biomassa estudados neste trabalho foram realizadas utilizando-se o módulo experimental demonstrado na Figura 18 e, em especial, na Figura 19, encontram-se detalhados o Lavador Venturi (Figuras 19 (a)) e o ciclone separador de partículas (Figura 19 (b)).

Dimensões do lavador Venturi:

- Garganta: 0,035 m x 0,024 m x 0,117 m
- Seção divergente: 0,280 m x 0,035 m x 0,023 m
- Seção convergente: 0,099 m x 0,035 m x 0,023 m

Com os dados obtidos nos testes foi possível verificar os efeitos da vazão de líquido, da razão líquido-gás e da penetração do jato líquido na eficiência global média de coleta de material particulado e de gases utilizando-se os instrumentos de amostragem de particulados (DataRAM 4) e de amostragem de gases (UniGas 3000+) e as Equações (4), (6) e (7).

Figura 18 – Módulo experimental de controle de material particulado e gases



Onde:

5 = chaminé

9 = soprador de gases de combustão

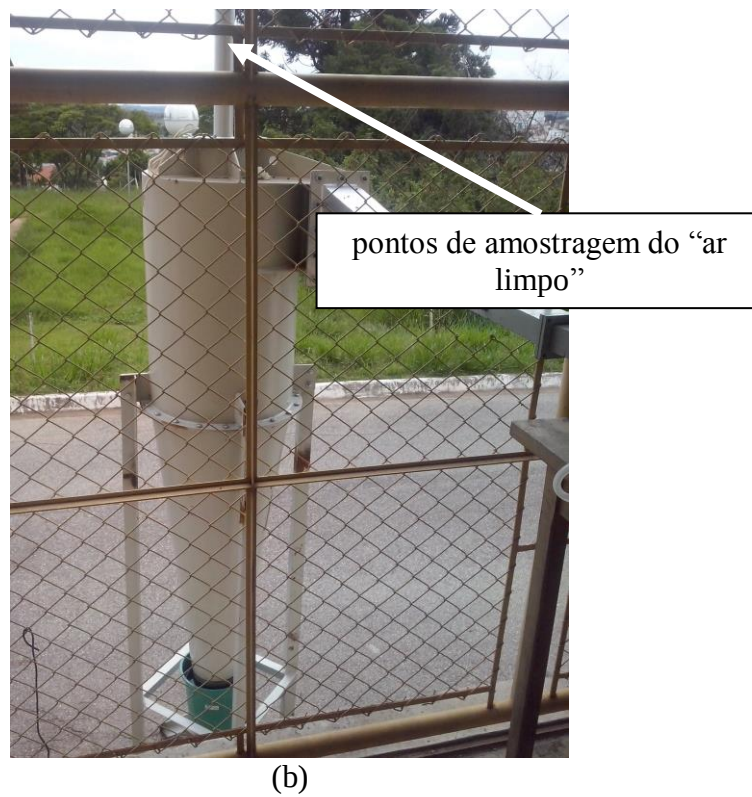
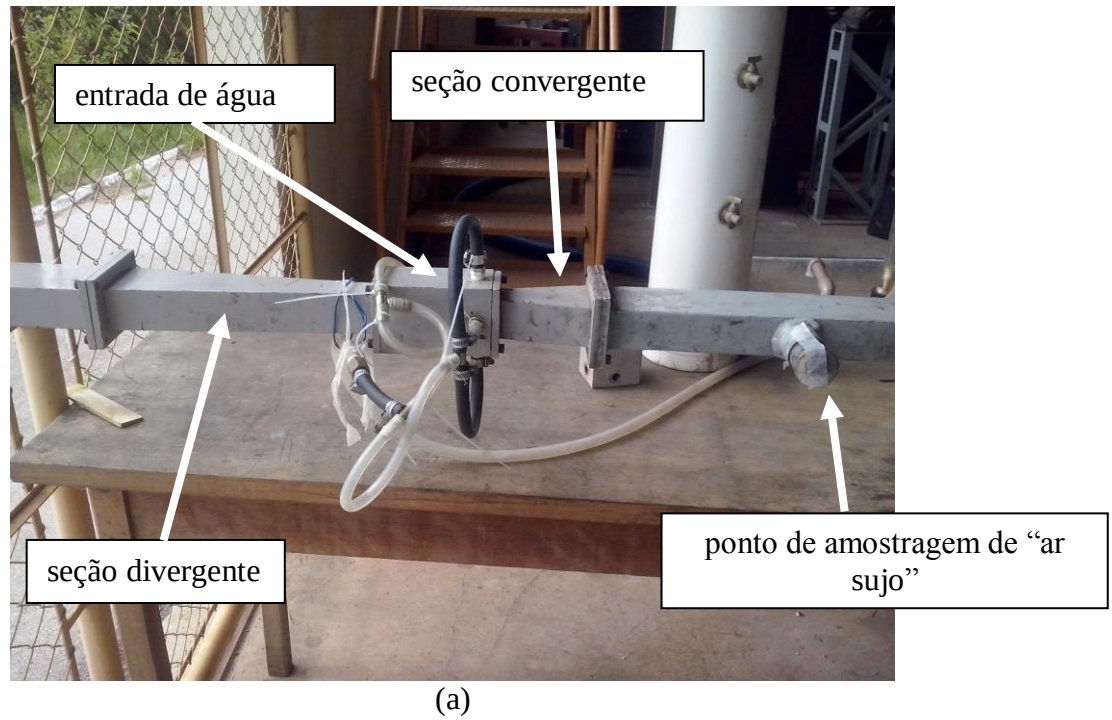
10 = ciclone

12 = medidor de fluxo de líquido (água)

13 = lavador Venturi

Fonte: Eng. Anderson de Jesus R. Martins

Figura 19 – Lavador Venturi em detalhes (a) e Ciclone (b)



Fonte: Própria autora

4.5.2. Método de controle

As amostragens de material particulado e de gases foram realizadas antes da garganta do Venturi (concentração de entrada – C_i) (Figura 18 (a)) e após o ciclone (concentração de saída – C_f) (Figuras 18 (b)).

Foram utilizados um amostrador DataRAM (Figura 15) e dois amostradores Unigas 3000+ (Figura 17). O amostrador DataRAM foi colocado previamente antes do Venturi para a amostragem das partículas formadas com a combustão das biomassas e que entravam no Venturi (“ar sujo”) e, posteriormente, foi colocado na saída do ciclone para amostragem do ar “limpo”. Os amostradores Unigas 3000+ foram colocados, simultaneamente, antes do Venturi (medida dos gases produzidos na combustão) e depois do ciclone (ar “limpo”).

O líquido de lavagem utilizado foi a água ($\rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3$) e sua vazão foi medida com auxílio de um medidor de fluxo (Figura 18). Foram utilizados nos testes, 3 ou 4 pontos (orifícios) de injeção de líquido (N_0). O diâmetro dos orifícios de injeção (d_0) foi de 1 mm.

A velocidade de gás foi mantida constante para cada teste e determinada com auxílio de um anemômetro portátil. No ponto de amostragem de “ar sujo” foram coletados cinco valores de velocidade do gás e calculada uma média aritmética considerada, então, como a velocidade do gás (V_g). A densidade do gás foi considerada igual à do ar ($\rho_g = 1 \text{ kg/m}^3$).

Na Tabela 22 encontram-se os parâmetros (vazão de água e velocidade do gás) utilizados nos testes de controle com o lavador Venturi.

Tabela 22 – Parâmetros (variáveis) utilizadas para os testes de controle

Biomassa	Controle de material particulado		Controle de gases	
	Ql (L/min)	Vg (m/s)	Ql (L/min)	Vg (m/s)
Bagaço de cana-de-açúcar (U = 11,83%)	0,4	29,7	0,4	29,7
	0,6		0,6	
	0,8		0,8	
	1,0		1,0	
	1,2		1,2	
Casca de café (U = 14,51%)	0,4	45,2	0,4	45,2
	0,6		0,6	
	0,8		0,8	
	1,0		1,0	

Tabela 22 - Parâmetros (variáveis) utilizadas para os testes de controle

Casca de arroz (U = 9,14%)	0,4	43,5	0,4	43,5
			0,6	
			0,8	
			1,0	
			1,2	
Cavaco de eucalipto (U = 11,12%)	1,0	47,6	1,4	47,6
			0,4	
			0,6	
			0,8	
			1,0	
Cavaco de pinus (U = 9,76%)	0,4	43,1	0,4	43,1
	0,6		0,6	
	0,8		0,8	
	1,0		1,0	

A partir das concentrações de entrada (C_i) e de saída (C_f) amostradas nos testes foi possível calcular a eficiência global média (E) para a coleta de material particulado e de gases (Equação (7)) e as influências da vazão de líquido (Q_l) e da razão líquido-gás (L/G) na mesma.

A penetração do jato líquido e a penetração máxima da linha central do jato líquido dentro da garganta do lavador Venturi também foram calculadas através das Equações (4) e (6). E, para verificação do alcance do jato líquido dentro da garganta, utilizou-se as dimensões da garganta de 35 mm (altura) x 24 mm (comprimento) (região central da garganta = 17,5 mm de altura).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a amostragem do material particulado (influência do tempo de queima e do diâmetro de partícula na emissão) e dos gases (concentrações de CO, CO₂ e NO_x) produzidos com a queima das diferentes biomassas estudadas (bagaço de cana-de-açúcar, casca de café, casca de arroz, cavacos de eucalipto e pinus) e os resultados obtidos com o controle desses poluentes utilizando um lavador Venturi (eficiência global de coleta considerando o efeito da vazão de líquido e a razão líquido-gás). São também discutidas algumas características das biomassas, tais como: teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo e poder calorífico superior.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS

Os diferentes tipos de biomassa utilizados neste estudo foram previamente caracterizados por Análise Química Imediata quanto à sua umidade (U), materiais voláteis (MV), cinzas (CZ), carbono fixo (CF) (este último através de cálculo conforme Equação (14)) e quanto ao seu poder calorífico superior. Os resultados obtidos neste trabalho (Tabela 23), bem como os obtidos por Souza et al. (2007), Sánchez (2010) e Gonçalves e Soares Neto (2013), mencionados no item 3.2.2.1, para análise química imediata (Tabela 4), encontram-se agrupados nas Figuras 20 a 24, e os resultados obtidos neste trabalho para poder calorífico superior (Tabela 24) comparados com os obtidos por Quirino et al. (2005) e Sánchez (2010), mencionados no item 3.2.2.2 (Tabela 5), encontram-se nas Figuras 25 a 27.

As comparações entre os resultados obtidos neste trabalho e os resultados obtidos pelos autores mencionados serviram como base de análise pois as amostras deveriam ser as mesmas (mesmo local de cultivo, mesmas espécies, etc.) o que não ocorreu. Entretanto, este fato descreve o que ocorre com a maioria das indústrias que queimam biomassa, ou seja, nem sempre as biomassas são adquiridas do mesmo local e com as mesmas características.

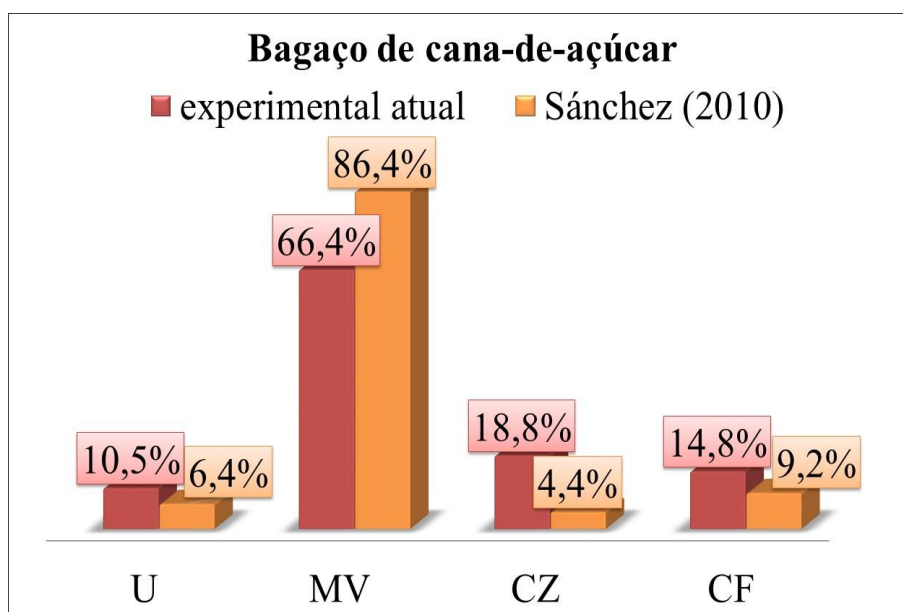
As origens das amostras utilizadas neste trabalho encontram-se descritas no item 4.1 e as empresas merecidamente mencionadas no item Agradecimentos.

Tabela 23 – Análise química imediata para este trabalho

Biomassa	U(%)	MV(%)	CZ(%)	CF (%)
Bagaço de cana-de-açúcar	10,5	66,4	18,8	14,8
Casca de café	17,2	73,6	6,5	19,9
Casca de arroz	11,6	64,2	20,6	15,2
Cavaco de eucalipto	12,3	79,76	0,15	20,10
Cavaco de pinus	12,5	82,62	2,0	17,2

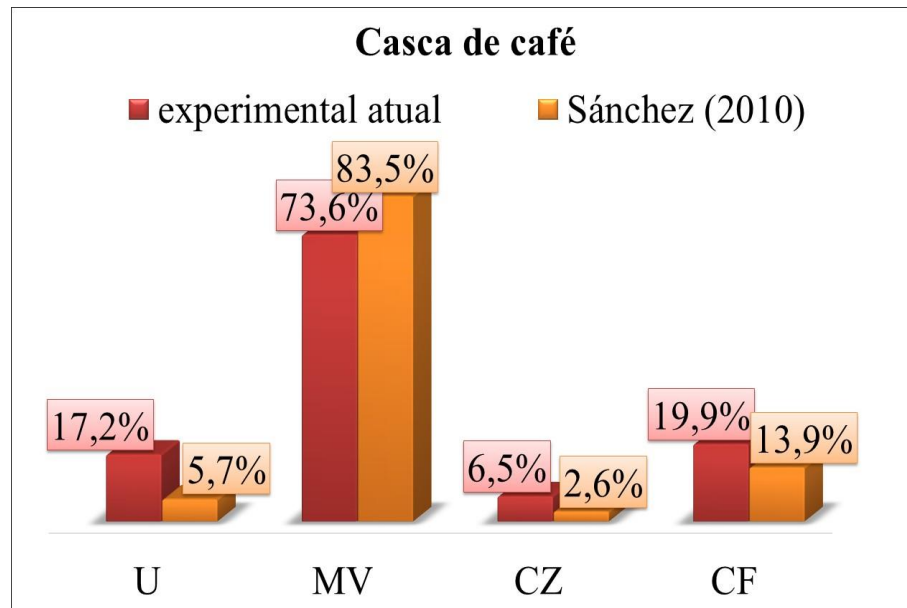
Fonte: Resultados experimentais obtidos neste trabalho a respeito da análise química imediata dos diferentes tipos de biomassa estudados

Figura 20 – Análise química imediata para o bagaço de cana-de-açúcar



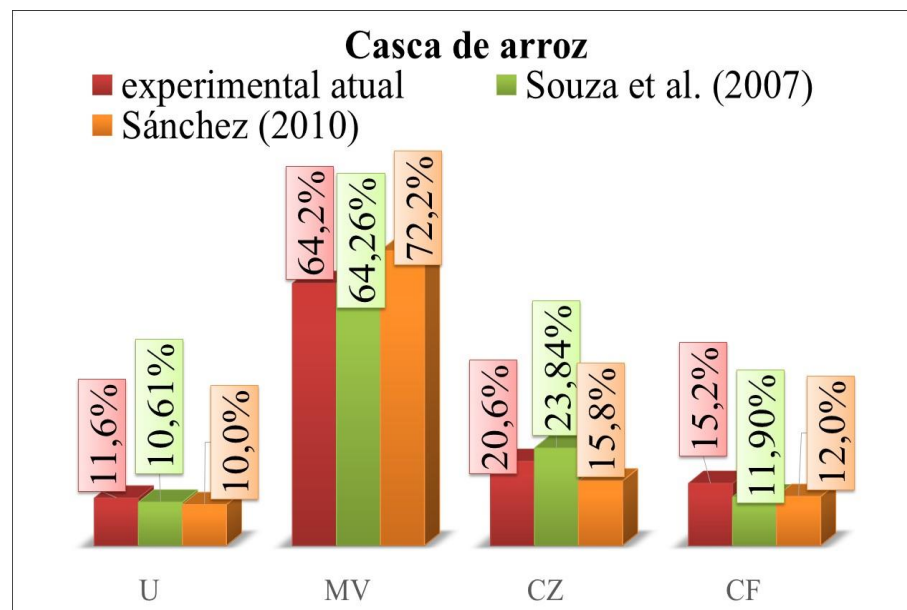
Fonte: Resultados experimentais obtidos neste trabalho e por Sánchez (2010) a respeito da análise química imediata do bagaço de cana-de-açúcar

Figura 21 – Análise química imediata para a casca de café



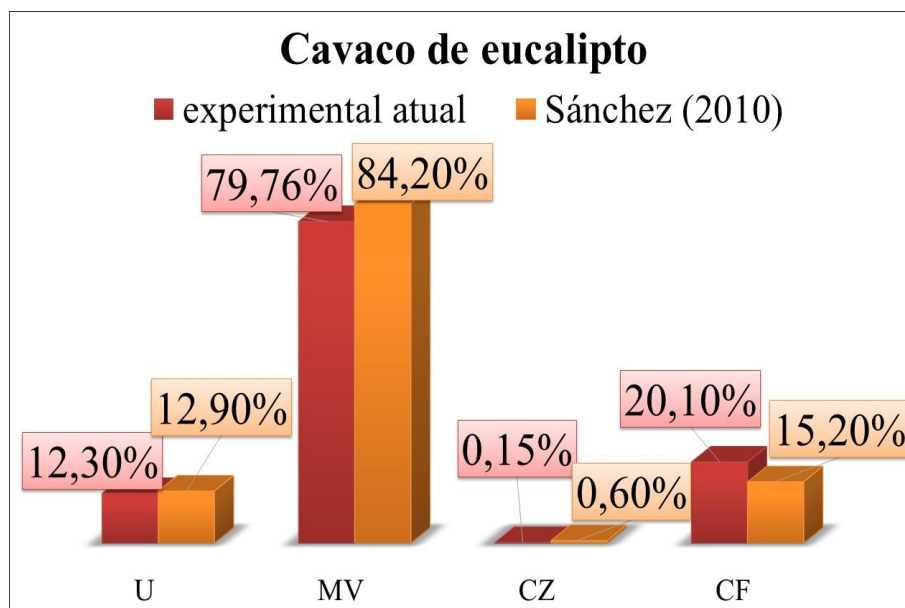
Fonte: Resultados experimentais obtidos neste trabalho e por Sánchez (2010) a respeito da análise química imediata da casca de café

Figura 22 – Análise química imediata para a casca de arroz



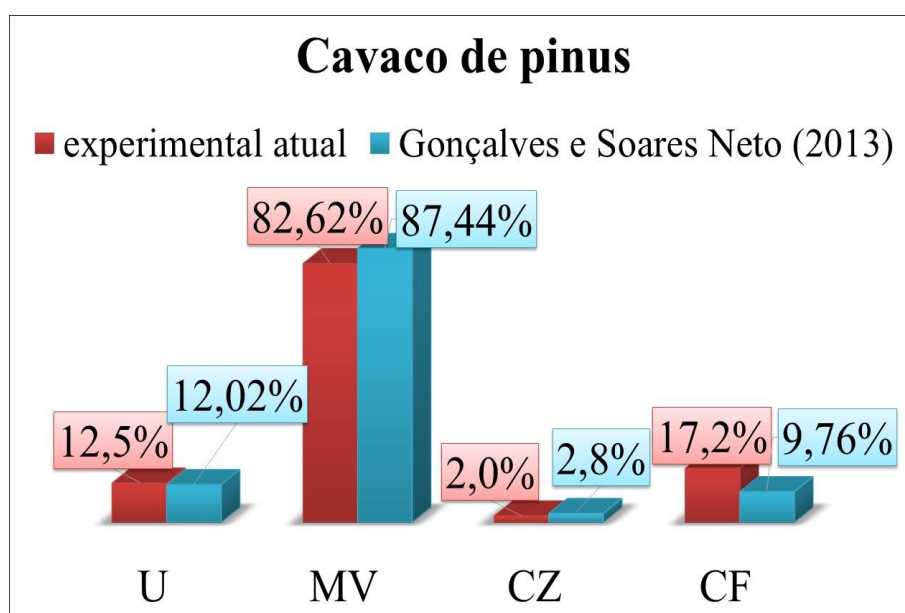
Fonte: Resultados experimentais obtidos neste trabalho e por diferentes pesquisadores a respeito da análise química imediata da casca de café

Figura 23 – Análise química imediata para o cavaco de eucalipto



Fonte: Resultados experimentais obtidos neste trabalho e por Sánchez (2010) a respeito da análise química imediata do cavaco de eucalipto

Figura 24 – Análise química imediata para o cavaco de pinus



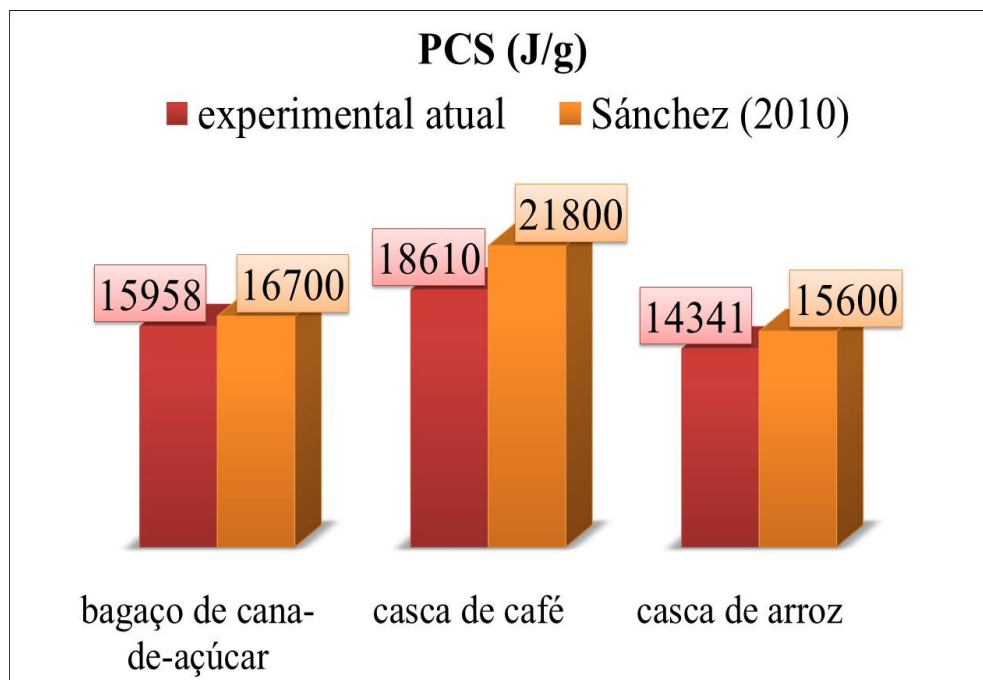
Fonte: Resultados experimentais obtidos neste trabalho e por Gonçalves e Soares Neto (2013) a respeito da análise química imediata do cavaco de pinus

Tabela 24 – Poder calorífico superior para este trabalho

Biomassa	PCS (J/g)
Bagaço de cana-de-açúcar	15958
Casca de café	18610
Casca de arroz	14341
Cavaco de eucalipto	19825
Cavaco de pinus	19709

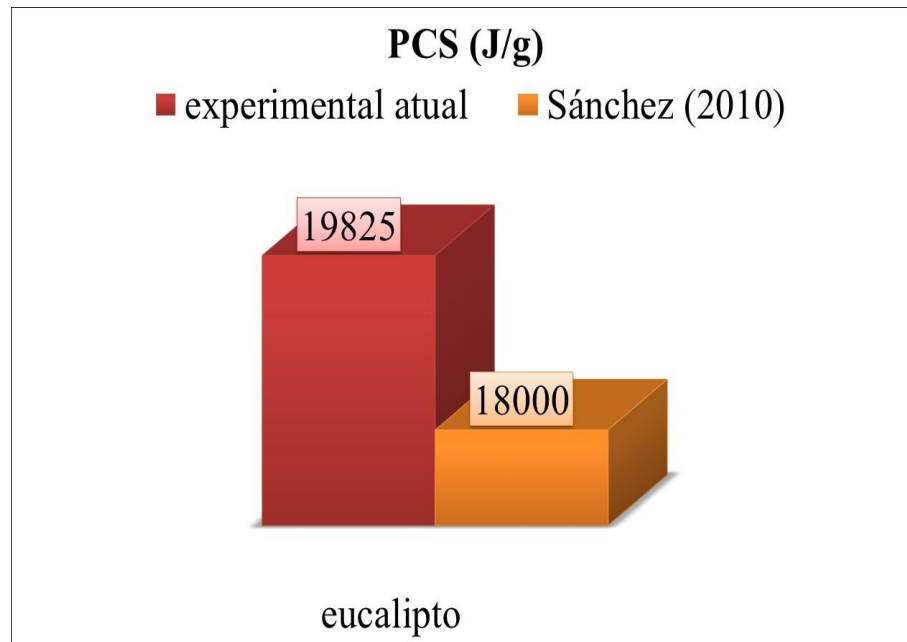
Fonte: Resultados experimentais obtidos neste trabalho a respeito do poder calorífico superior dos diferentes tipos de biomassa estudados

Figura 25 – Poder Calorífico Superior para o bagaço de cana-de-açúcar, para a casca de café e para a casca de arroz



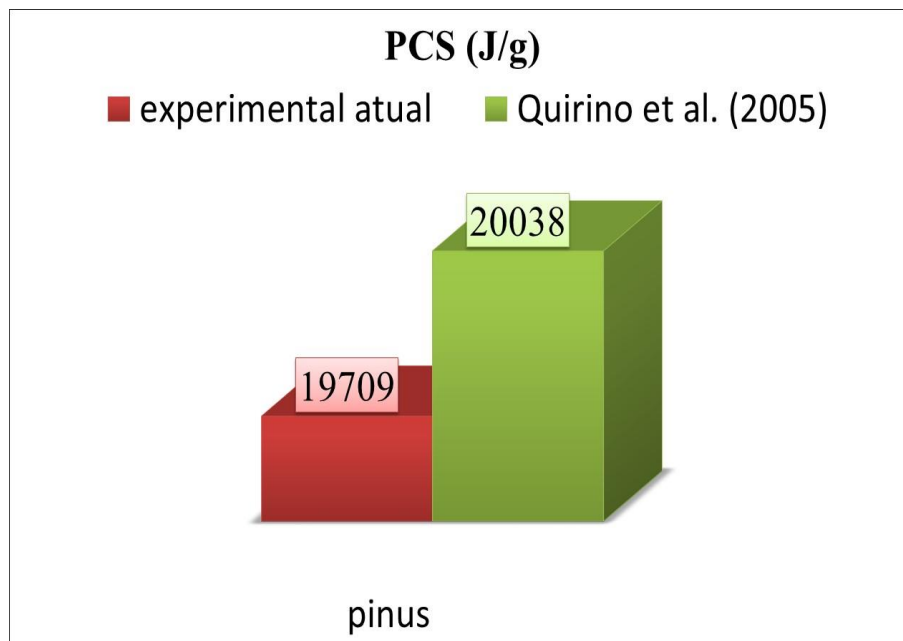
Fonte: Resultados experimentais obtidos neste trabalho e por Sánchez (2010) a respeito do poder calorífico superior do bagaço de cana-de-açúcar, casca de café e casca de arroz

Figura 26 – Poder Calorífico Superior para o cavaco de eucalipto



Fonte: Resultados experimentais obtidos neste trabalho e por Sánchez (2010) a respeito do poder calorífico superior do cavaco de eucalipto

Figura 27 – Poder Calorífico Superior para o cavaco de pinus



Fonte: Resultados experimentais obtidos neste trabalho e por Quirino et al. (2005) a respeito do poder calorífico superior do cavaco de pinus

O teor de umidade, como foi mencionado no item 3.2.2.1, influencia negativamente no poder calorífico de um combustível, ou seja, quanto menor esse teor melhor será a queima do combustível e menos produtos indesejáveis serão obtidos. Como os teores de umidade encontrados neste presente trabalho foram superiores aos observados pelos autores citados, com exceção para o cavaco de eucalipto, esperava-se que os valores de poder calorífico superior resultassem menores, o que ocorreu.

O cavaco de eucalipto foi a biomassa que apresentou o maior PCS dentre as biomassas estudadas, mesmo não tendo apresentado o menor teor de umidade, pois a análise do PCS depende tanto do teor de umidade quanto de outro fator como teor de voláteis.

Com relação ao teor de materiais voláteis, de acordo com Klautau (2008), quanto maior esse teor maior será a reatividade do combustível e mais fácil a sua ignição, além de resultar num maior valor de poder calorífico superior. Por exemplo, segundo Souza et al. (2007), o teor de voláteis para a casca de arroz é alto (entre 60-83%) e seu poder calorífico também seria se o seu teor de cinzas não fosse tão elevado comparado com outras biomassas.

Com isso, observando-se os resultados deste trabalho, a biomassa com maior teor de voláteis foi o cavaco de pinus (82,62%) com PCS de 19709 J/g, seguida pelo cavaco de eucalipto (79,76%) com PCS de 19825 J/g. Assim como Klautau (2008), observou-se que, mesmo o cavaco de pinus apresentando o maior teor de voláteis, não foi o resíduo madeireiro que obteve o maior PCS, devido ao seu mais alto teor de cinzas (2,0%) comparado ao do cavaco de eucalipto (0,15%).

Comparando-se os teores de voláteis deste trabalho com os apresentados pelos autores estudados, houve similaridade para todas as biomassas, com maior diferença para o bagaço de cana-de-açúcar de (20%), provavelmente devido às diferentes espécies de cana-de-açúcar utilizadas neste trabalho e no de Sánchez (2010). Para este trabalho não foi possível identificar a(s) espécie(s) de cana-de-açúcar utilizada(s) e Sánchez (2010) também não menciona qual a espécie utilizada em seu trabalho.

Quanto ao teor de cinzas, resíduos resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidações dos inorgânicos, o cavaco de eucalipto foi a biomassa que apresentou o menor teor (0,15%) e a casca de arroz o maior (20,6%). Como já mencionado no item 2.2.3.2, se em alta concentração, as cinzas podem diminuir o poder calorífico, causar perda de energia e também afetar a transferência de calor, o que foi observado neste presente trabalho, ou seja, o maior (19825 J/g) e o menor (14341 J/g) valor de PCS foram observados para o cavaco de eucalipto e para a casca de arroz, respectivamente. Os outros autores estudados apresentaram valores próximos aos deste trabalho, com exceção também para o bagaço de cana-de-açúcar

(diferença de 14,4%).

O teor de carbono fixo para todas as biomassas foi superior aos valores encontrados pelos demais autores. Como este parâmetro é inversamente proporcional ao poder calorífico do combustível, todas as biomassas neste trabalho apresentaram menores valores de poder calorífico comparadas aos obtidos pelos autores estudados.

5.2. QUEIMA DE BIOMASSA – AMOSTRAGEM DE MATERIAL PARTICULADO

As emissões de material particulado provenientes das queimas das biomassas foram amostradas conforme descrição encontrada no item 4.3 e os resultados obtidos encontram-se descritos neste item.

Para cada queima foi realizada a análise preliminar de umidade da biomassa e determinado o seu poder calorífico superior. Os valores não diferiram consideravelmente dos alcançados na análise química imediata.

Ressalta-se que, conforme mencionado no item 4.3.2, a amostragem do material particulado foi realizada utilizando-se um seletor de partículas acoplado ao amostrador de material particulado DataRAM 4, portanto, os valores de concentração e diâmetro observados mostram apenas as partículas menores de 2,5 µm emitidas durante a queima da biomassa.

As coletas dos dados pelo DataRAM 4 em todos os testes de queima foram realizadas automaticamente pelo instrumento em um intervalo de dez segundos para cada dado coletado.

Os picos de concentração em todos os testes demonstram que houve chama naquele momento e posteriormente iniciou-se a incandescência. A presença de vários picos foi devida à alimentação intermitente de biomassa no queimador. Conforme já mencionado no item 3.2.4, as fases da combustão foram classificadas visualmente e também observadas através dos gráficos de concentração de particulados *versus* tempo de queima (Figuras 28, 31, 34 e 37).

As linhas pontilhadas em todos os testes demarcam, visualmente, a interface entre as fases de chama (maior quantidade de picos de concentração) e incandescência (fase posterior à fase de chama).

5.2.1. Bagaço de cana-de-açúcar

A umidade e o poder calorífico superior do bagaço de cana-de-açúcar para as queimas realizadas encontram-se na Tabela 25.

Tabela 25 - Teores de umidade e PCS para o bagaço de cana-de-açúcar

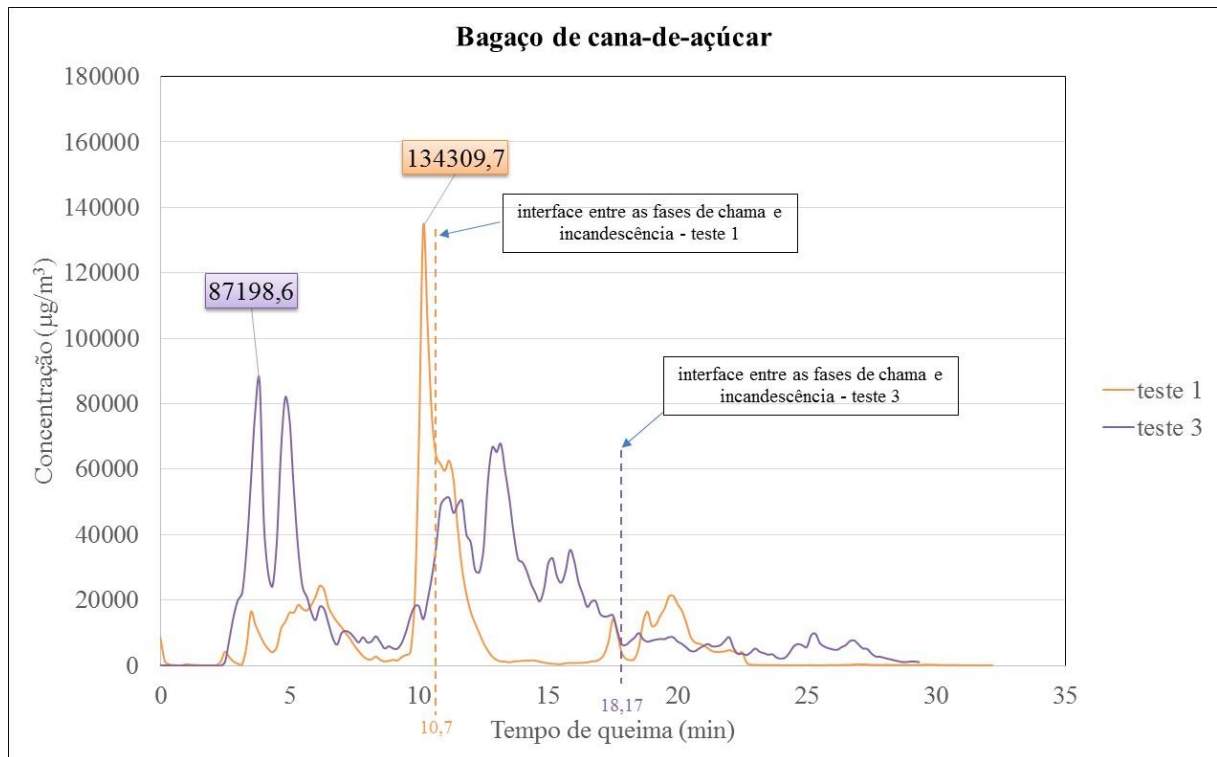
	U (%)	PCS (J/g)
Teste 1	12,82	17076
Teste 2	37,26	14905
Teste 3	8,50	15949

Fonte: Resultados experimentais sobre umidade e poder calorífico superior do bagaço de cana-de-açúcar utilizado neste trabalho

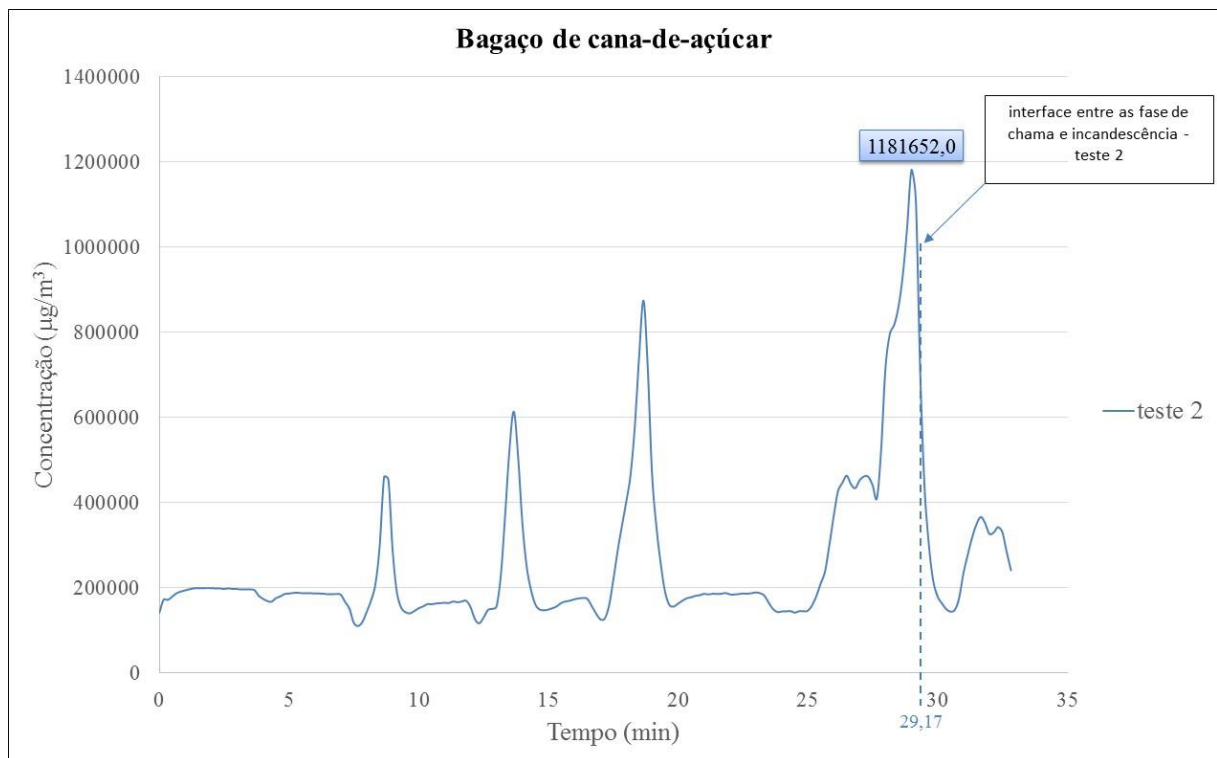
5.2.2.1. Influência do tempo de queima na emissão de material particulado

Os resultados de concentração de material particulado emitido *versus* tempo de queima encontram-se na Figura 28, sendo que as concentrações máximas atingidas nos diferentes testes encontram-se nela destacados.

Figura 28 - Concentração de particulados *versus* tempo de queima – bagaço de cana-de-açúcar: (a) testes 1 e 3; (b) teste 2



(a)



(b)

Fonte: Resultados sobre concentração de particulados emitidos durante a queima de bagaço de cana-de-açúcar

Na Figura 28 pode-se observar que as concentrações atingidas no teste 2 foram bem superiores às atingidas pelos testes 1 e 3, o que seria devido ao elevado teor de umidade (37,26%) apresentado pela biomassa. Segundo Gonçalves e Soares Neto (2013), um alto teor de umidade aumenta os produtos indesejáveis de combustão (gases poluentes e material particulado). De acordo com Fernandes (2009), o teor máximo ótimo para minimizar as emissões de partículas está entre 20 e 30%.

Comparando-se os valores de concentração de particulados obtidos para o bagaço de cana-de-açúcar com o padrão de qualidade do ar estabelecido pela OMS para partículas inaláveis finas ($PM_{2,5}$) de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para uma amostragem de 24 horas, observou-se que resultaram bem superiores em quase todo o período de queima para os três testes (as médias de concentrações para os testes 1, 2 e 3 foram, respectivamente, $8205 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $263361 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $16964 \mu\text{g}/\text{m}^3$), o que traz preocupação já que as partículas finas, devido ao seu tamanho diminuto, podem atingir os alvéolos pulmonares, sendo extremamente prejudiciais à saúde humana. Com respeito ao limite de emissão estabelecido pelo CONAMA para material particulado emitido com a combustão de bagaço de cana-de-açúcar em fontes fixas de $280000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, os valores atingidos nos testes 1, 2 e 3 não ultrapassaram o limite, entretanto, é possível concluir a partir disso que os limites impostos encontram-se defasados e precisam ser revistos e atualizados.

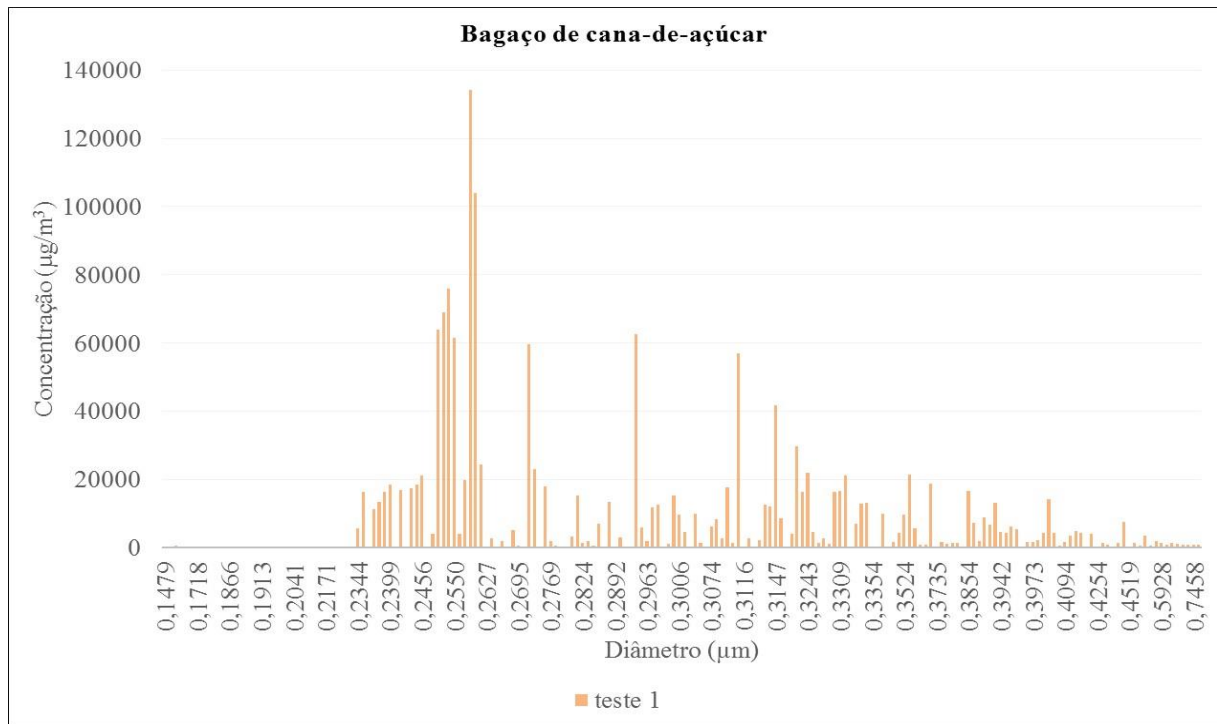
As fases de ignição, de chama e de incandescência foram caracterizadas por classificação visual (item 3.2.4) e por comparação entre as curvas constantes na Figura 28 e as obtidas por Soares Neto (2009), Hosseini et al. (2010) e Costa et al. (2012) em seus trabalhos. A concentração de particulados alcança um máximo durante a fase de chama (picos de concentração) e diminui ao longo do processo de combustão, apresentando menores valores para a fase de incandescência (ausência de picos pronunciados). Isso é devido às diferentes quantidades de material (biomassa) que são queimadas na fase de chama (maior) e na fase de incandescência (menor), ou seja, a taxa de queima na fase de chama é superior (aproximadamente 70%) à na fase de incandescência (aproximadamente 30%).

5.2.2.2. Influência do diâmetro das partículas na emissão de material particulado

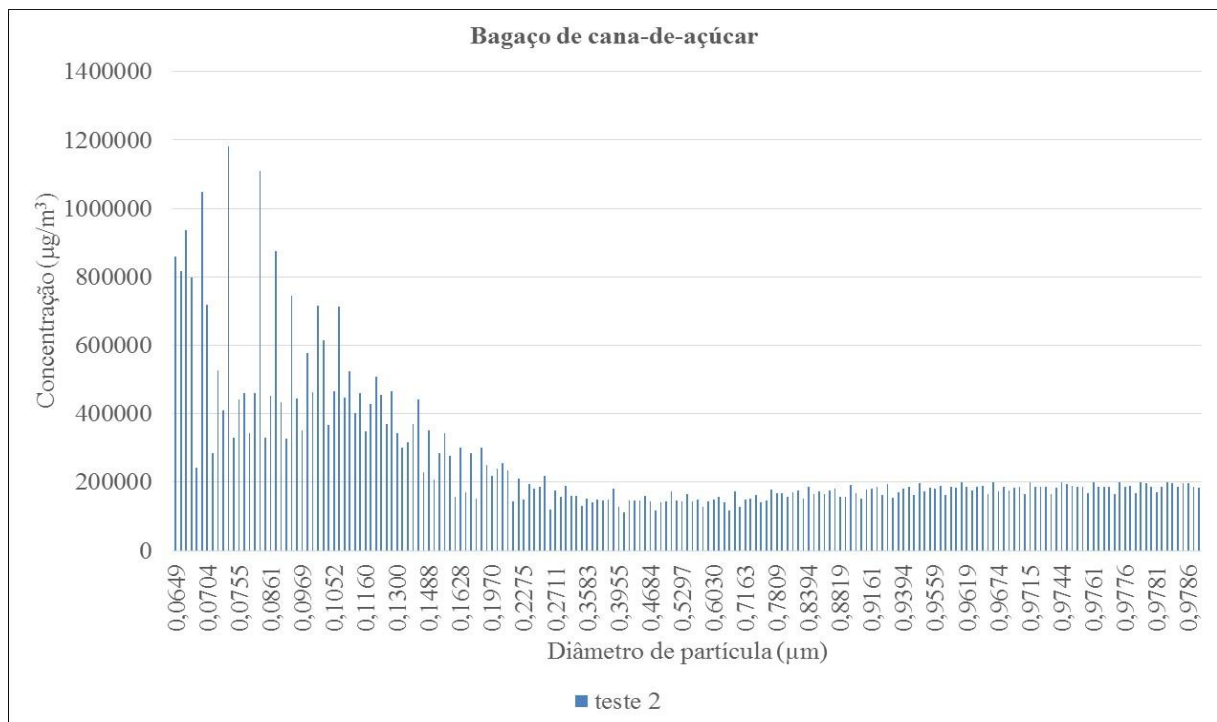
As Figuras 29 (a), 29 (b) e 29 (c) mostram a relação entre a concentração das partículas emitidas com o seu diâmetro, para os testes 1, 2 e 3, respectivamente. A Figura 30 traz a distribuição do diâmetro das partículas em função do tempo de queima. E, ainda, nas Tabelas

26 e 27 são demonstradas, respectivamente, as concentrações máximas e os diâmetros de partícula correspondentes e as médias de diâmetro, diâmetro mínimo e diâmetro máximo.

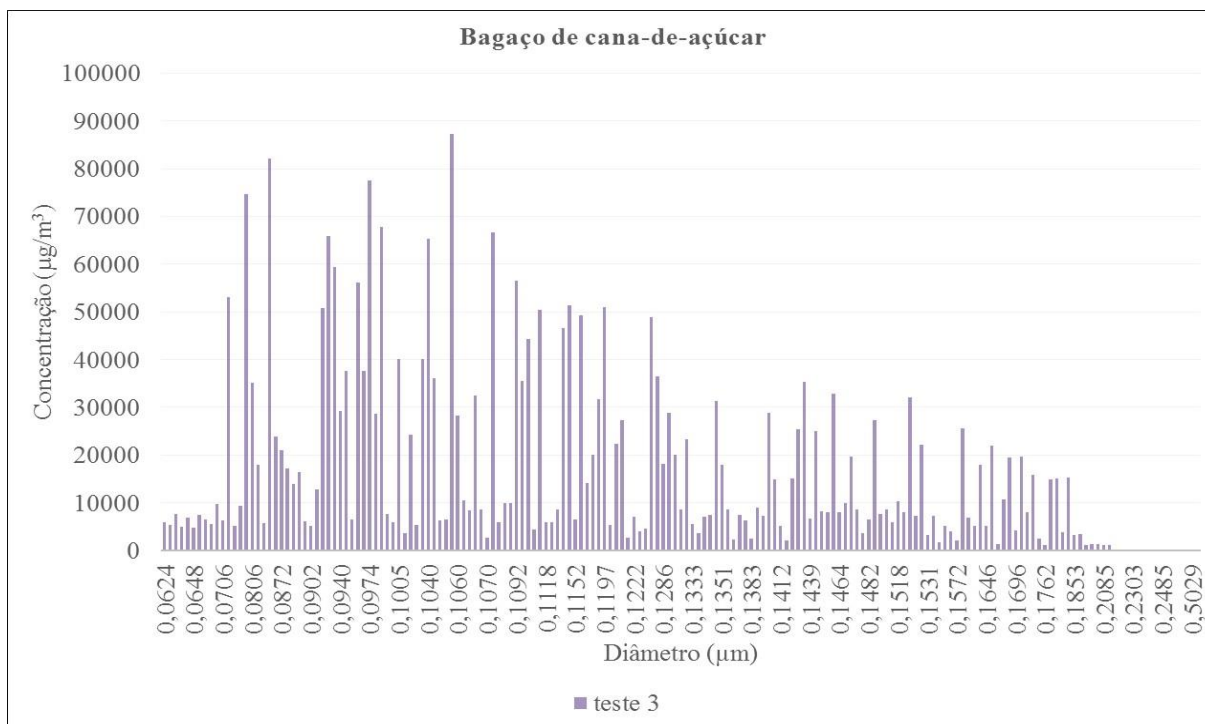
Figura 29 - Concentração de particulados *versus* diâmetro de partícula – bagaço de cana-de-açúcar: (a) teste 1; (b) teste 2; (c) teste 3



(a)



(b)



(c)

Fonte: Resultados de diâmetros de partículas emitidas e suas respectivas concentrações para a queima de bagaço de cana-de-açúcar

Tabela 26 - Concentrações máximas e diâmetros correspondentes para o bagaço de cana-de-açúcar

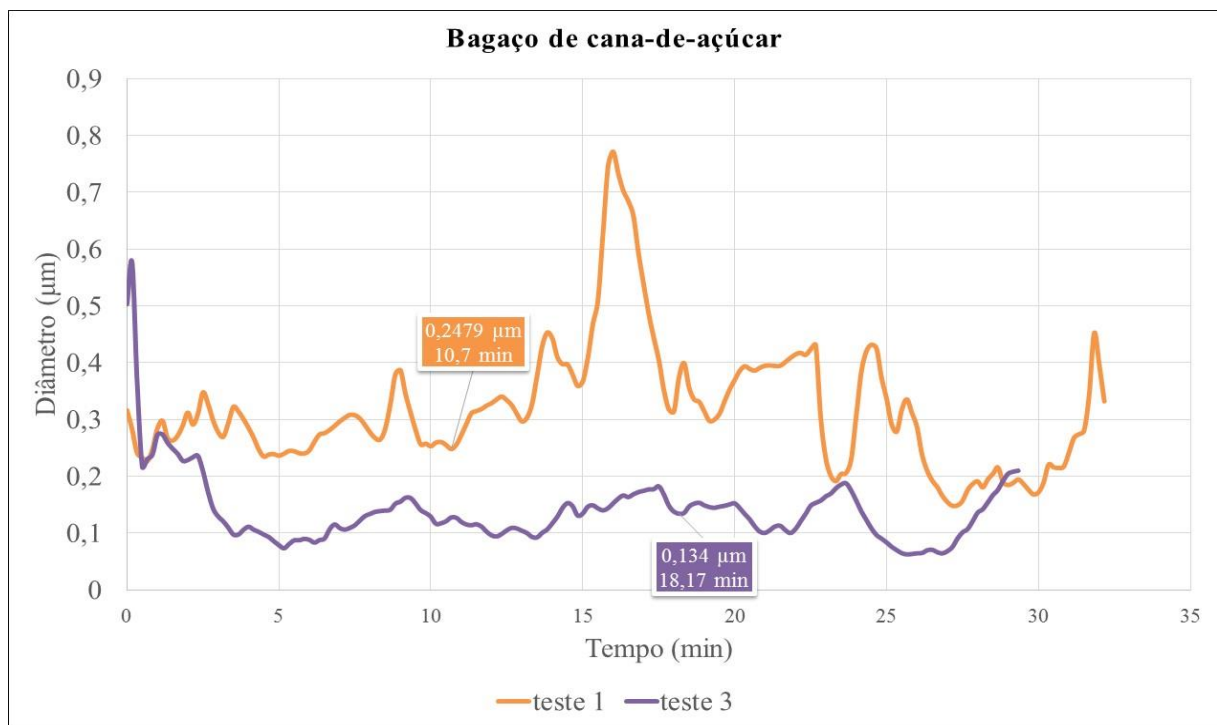
	C (µg/m³)	d (µm)
Teste 1	134309,7	0,2593
Teste 2	1181652,0	0,0746
Teste 3	87198,6	0,1058

Fonte: Resultados experimentais sobre concentrações máximas atingidas em ambos os testes de queima de bagaço de cana-de-açúcar e diâmetros correspondentes

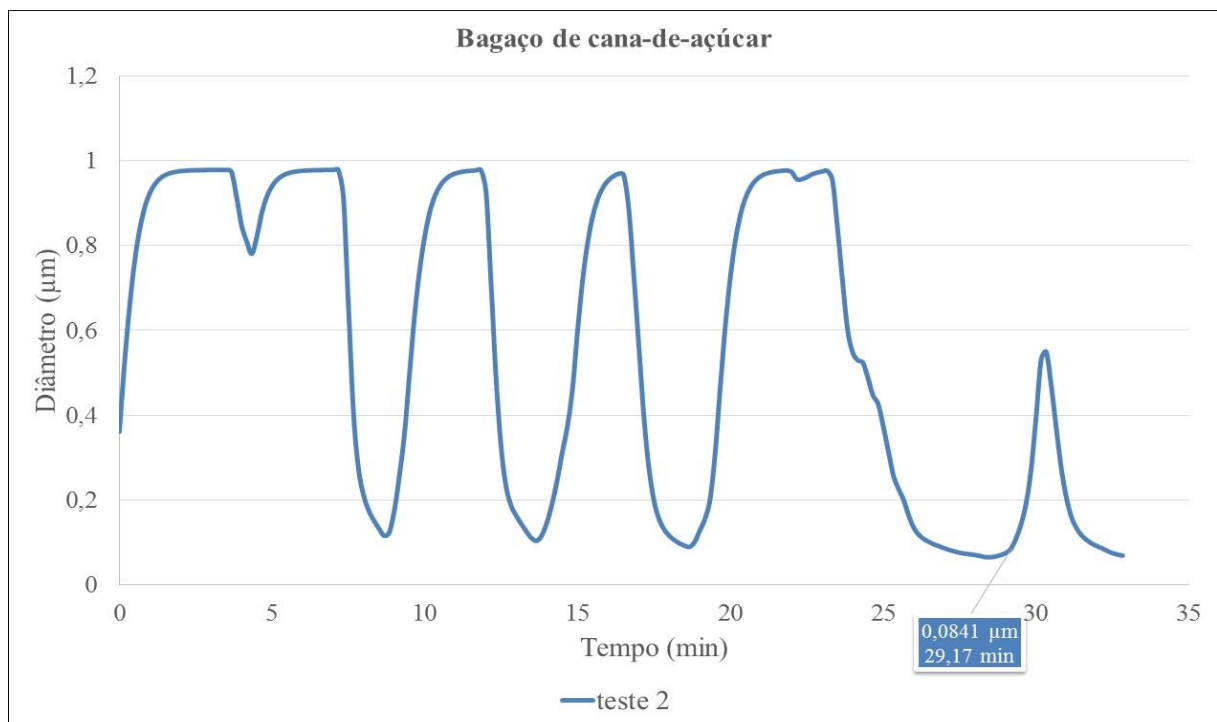
Através da Figura 29 e da Tabela 25, observou-se que a queima do bagaço de cana-de-açúcar apresentou alta concentração ($118652,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de partículas ultrafinas ($0,0746 \mu\text{m}$). As partículas ultrafinas, como já descrito na seção 3.2.6, são as mais prejudiciais à saúde humana (SILVA et al., 2010 e COSTA et al., 2012).

Assim como para Hossain et al. (2012) e Costa et al. (2012), as maiores concentrações foram relacionadas aos menores diâmetros para ambos os testes (Figura 29).

Figura 30 - Diâmetro de partícula *versus* tempo de queima – bagaço de cana-de-açúcar: (a) testes 1 e 3; (b) teste 2



(a)



(b)

Fonte: Resultados experimentais sobre diâmetros de partículas em função do tempo de queima para o bagaço de cana-de-açúcar

Tabela 27 – Diâmetros mínimos e máximos – bagaço de cana-de-açúcar

	Média de diâmetros (μm)		Diâmetro mínimo (μm)	Diâmetro máximo (μm)
	Fase de chama	Fase de incandescência		
Teste 1	0,2829	0,3385	0,1479	0,7714
Teste 2	0,5981	0,2078	0,0649	0,9787
Teste 3	0,1453	0,1460	0,0624	0,5754

Fonte: Médias de diâmetros e diâmetros mínimo e máximo calculados a partir dos resultados obtidos com a queima do bagaço de cana-de-açúcar

Foi possível observar, através da Figura 30 e da Tabela 27, que na fase de incandescência houve um aumento no diâmetro das partículas coletadas (média de diâmetros na fase de incandescência maior que na fase de chama), assim como o observado por Costa et al. (2012). O teste 2, devido ao alto teor de umidade da biomassa, foi interrompido já no início da fase de incandescência, portanto não apresentou maior média de diâmetros na fase de incandescência como os demais testes. Hossain et al. (2012), atribuíram tal fato a uma possível condensação de espécies orgânicas durante esta fase, já que ocorre redução de temperatura, acarretando aumento no diâmetro.

Na Figura 30, nas interfaces entre as fases de chama e de incandescência (demarcadas na Figura 28), observou-se picos invertidos (menores diâmetros) semelhante ao observado por Costa et al. (2012). Os diâmetros foram de 0,2479, 0,0841 e 0,134 μm , respectivamente para os testes 1, 2 e 3.

Segundo Chakrabarty et al. (2006), para biomassas com umidade relativa entre 5 e 10%, o diâmetro médio de partículas variou entre 0,03 e 0,2 μm , comportamento semelhante ao observado para o teste 3 com bagaço de cana (umidade de 8,5% e diâmetro médio de 0,1392 μm).

5.2.2. Casca de café

A umidade e o poder calorífico superior da casca de café para as queimas realizadas encontram-se na Tabela 28.

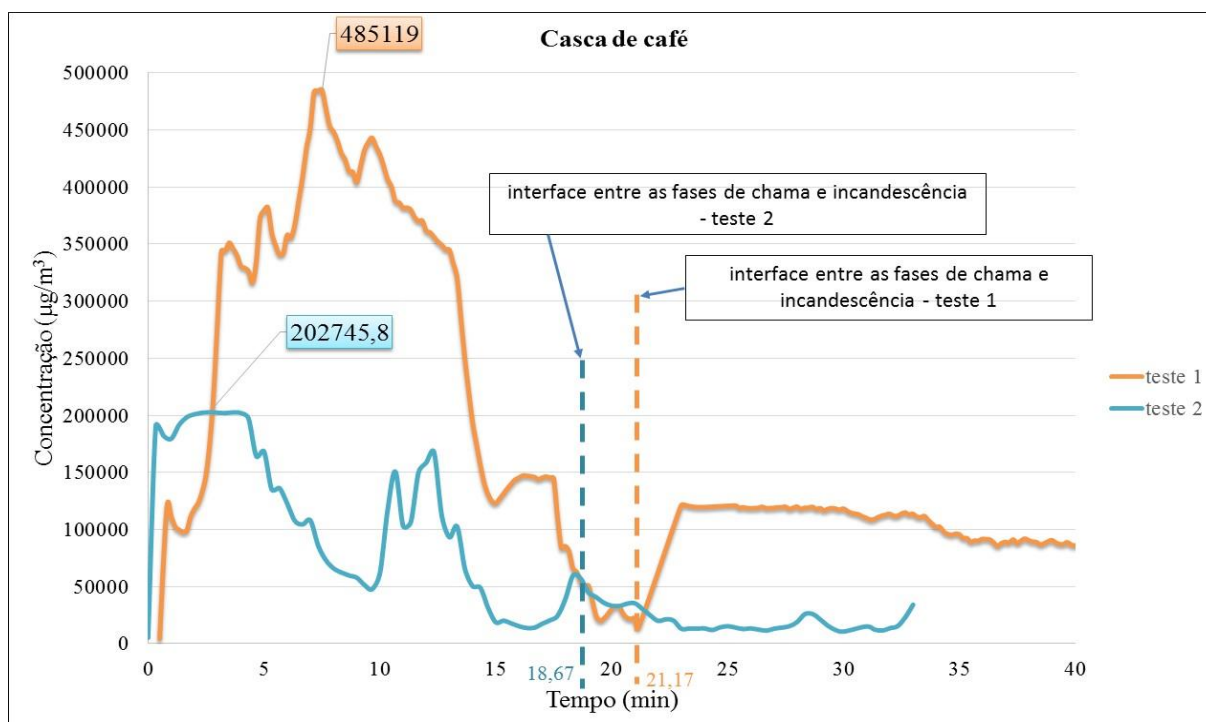
Tabela 28 - Teores de umidade e PCS para a casca de café

	U (%)	PCS (J/g)
Teste 1	18,04	16927
Teste 2	13,28	17477

Fonte: Resultados experimentais sobre umidade e poder calorífico superior da casca de café utilizada neste trabalho

5.2.2.1. Influência do tempo de queima na emissão de material particulado

Os resultados de concentração de material particulado *versus* tempo de queima, com as concentrações máximas destacadas, encontram-se na Figura 31.

Figura 31 - Concentração de particulados *versus* tempo de queima – casca de café

Fonte: Resultados sobre concentração de particulados emitidos durante a queima de casca de café

As concentrações observadas no teste 1 foram superiores às do teste 2 para quase todo o período de queima (Figura 31), o que poderia ser devido, assim como nos testes do bagaço de

cana-de-açúcar, ao maior teor de umidade apresentado pela casca utilizada no teste 1 (18,04%) em comparação ao do teste 2 (13,28%). Inclusive, o teste 1 com a casca de café apresentou o maior teor de umidade dentre todas as biomassas utilizadas neste trabalho (com exceção para o teste 2 do bagaço de cana).

Novamente, os valores de concentração de particulados obtidos com a casca de café comparados ao padrão de qualidade do ar estabelecido pela OMS ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para uma amostragem de 24 horas) resultaram bem superiores, inclusive com médias maiores (teste 1 – $184637,1$ e teste 2 – $69123,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) às apresentadas pelo bagaço de cana (teste 1 – $8205 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e teste 3 – $16964 \mu\text{g}/\text{m}^3$). E, quanto ao limite de emissão estabelecido pelo CONAMA para material particulado emitido com a combustão de bagaço de cana-de-açúcar (extendido aqui para a casca de café) em fontes fixas de $280000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, os valores atingidos nos testes 1 e 2 não ultrapassaram o limite, entretanto, é possível tirar a mesma conclusão de defasagem dos limites impostos comentada para o bagaço de cana-de-açúcar.

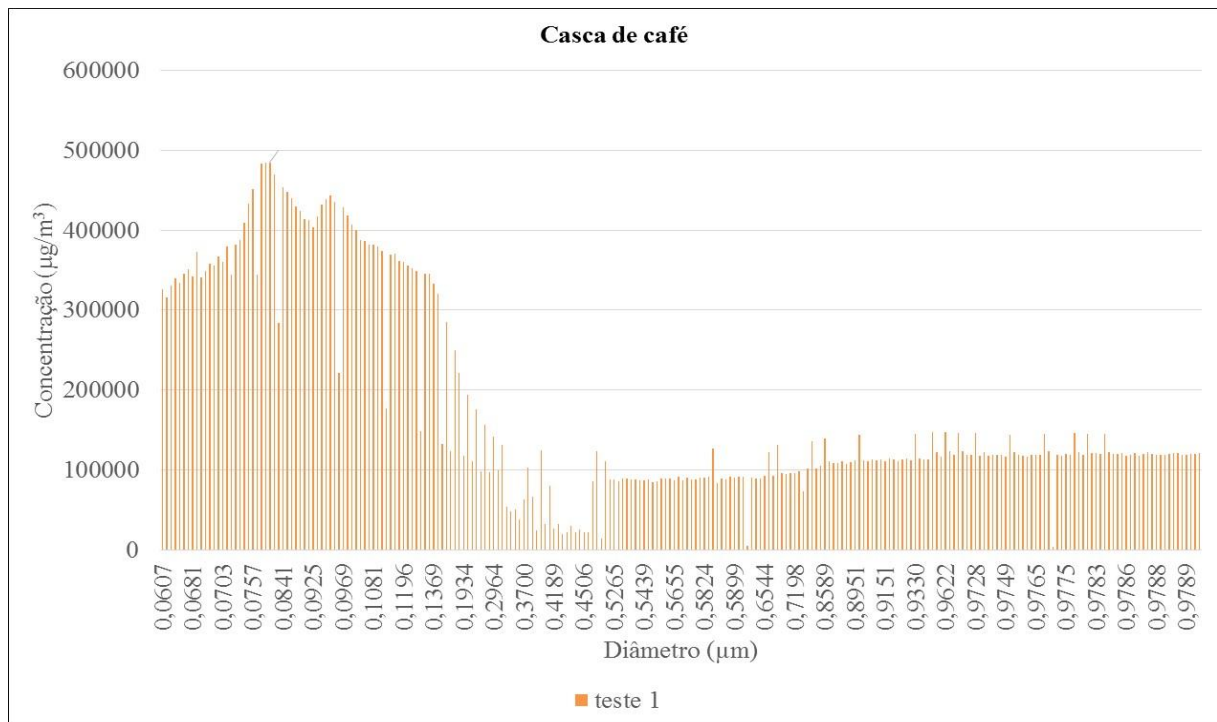
A concentração de particulados alcança um máximo durante a fase de chama (picos de concentração) e diminui ao longo do processo de combustão, assim como também observado para o bagaço de cana-de-açúcar e nos trabalhos de Soares Neto (2009), Hosseini et al. (2010) e Costa et al. (2012).

As médias das concentrações para os testes 1 e 2 foram de $184637,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $69123,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Para Limousy et al. (2013), a média encontrada foi de $1071 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, bem superior às deste trabalho devido provavelmente à natureza da biomassa (neste trabalho foi utilizada a casca de café e Limousy et al. (2013) utilizaram pellets de borra de café).

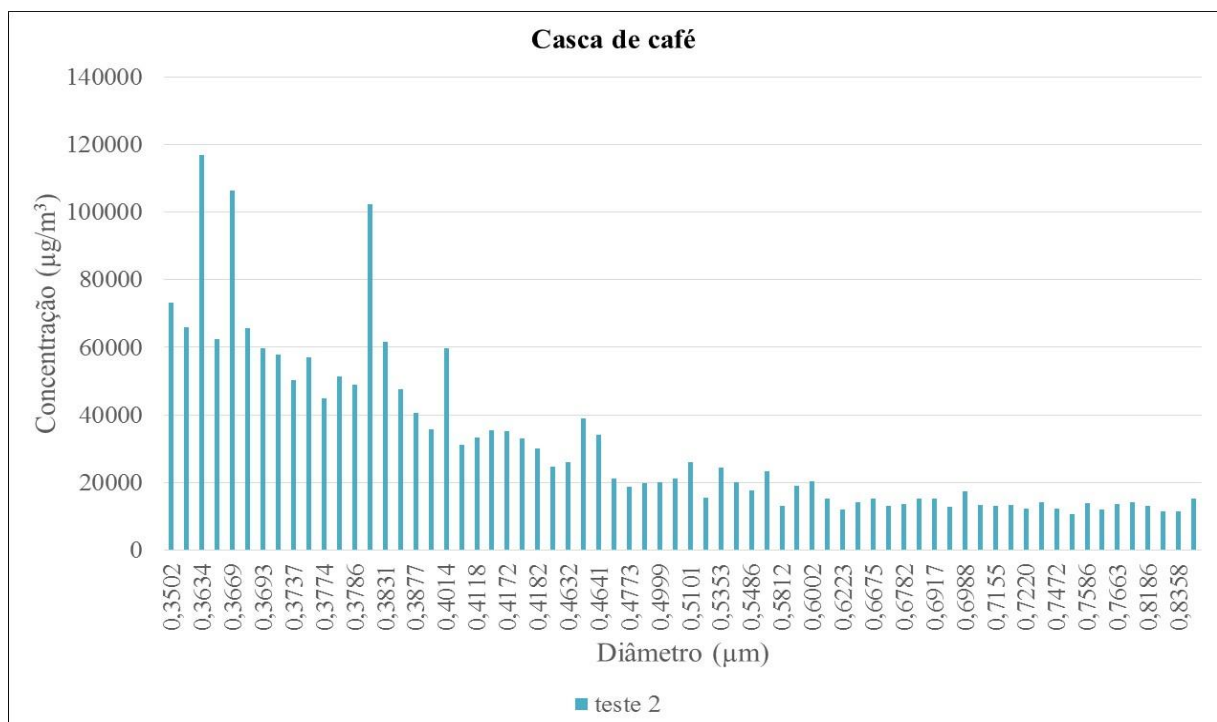
5.2.2.2. Influência do diâmetro de partícula na emissão de material particulado

Os resultados de concentração de particulados *versus* diâmetro de partícula encontram-se nas Figuras 32 (a) e 32 (b), respectivamente para os testes 1 e 2. Os de diâmetro de partícula *versus* tempo de queima encontram-se na Figura 33. E, ainda, nas Tabelas 29 e 30 são demonstradas, respectivamente, as concentrações máximas e os diâmetros de partícula correspondentes e as médias de diâmetro, diâmetro mínimo e diâmetro máximo.

Figura 32 – Concentração de particulados *versus* diâmetro de partícula – casca de café: (a) teste 1; (b) teste 2



(a)



(b)

Fonte: Resultados sobre diâmetros de partículas emitidas e suas respectivas concentrações para a queima de casca de café

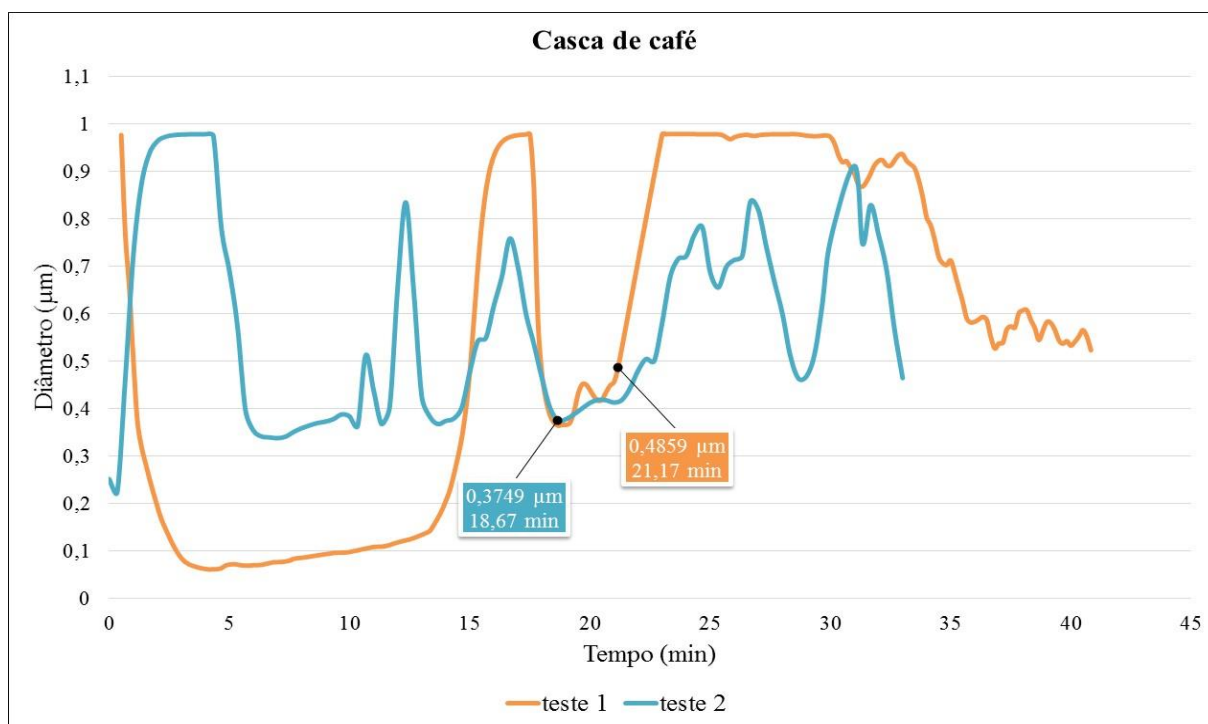
Tabela 29 - Concentrações máximas e diâmetros correspondentes para a casca de café

	C ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	d (μm)
Teste 1	485119,0	0,0788
Teste 2	202745,8	0,9766

Fonte: Resultados experimentais sobre concentrações máximas atingidas em ambos os testes de queima de casca de café e diâmetros correspondentes

Através da Figura 32 e da Tabela 28, observou-se que a queima da casca de café também apresentou, assim como o bagaço de cana-de-açúcar, alta concentração ($485119,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de partículas ultrafinas ($0,0788 \mu\text{m}$). Limousy et al. (2013), em seu trabalho, também encontraram altas concentrações ($1,0 \times 10^6$ partículas por segundo) de partículas ultrafinas (menores que $0,1 \mu\text{m}$), entretanto as de $0,2 \mu\text{m}$ foram as mais pronunciadas ($1,6 \times 10^6$ partículas por segundo).

Assim como para Hossain et al. (2012) e Costa et al. (2012), as maiores concentrações foram relacionadas aos menores diâmetros para ambos os testes (Figura 32).

Figura 33 – Diâmetro de partícula *versus* tempo de queima – casca de café

Fonte: Resultados experimentais sobre diâmetros de partículas em função do tempo de queima para a casca de café

Tabela 30 – Diâmetros mínimos e máximos – casca de café

	Média de diâmetros (μm)		Diâmetro mínimo (μm)	Diâmetro máximo (μm)
	Fase de chama	Fase de incandescência		
Teste 1	0,2950	0,7996	0,0602	0,9789
Teste 2	0,5548	0,6063	0,2235	0,9786

Fonte: Média de diâmetros e diâmetros mínimo e máximo calculados a partir dos resultados obtidos com a queima da casca de café

Foi possível observar através da Figura 33 e da Tabela 30 que na fase de incandescência houve um aumento no diâmetro das partículas coletadas (média de diâmetros na fase de incandescência maior que na fase de chama), assim como o observado para o bagaço de cana e por Costa et al. (2012).

Na Figura 33, nas interfaces entre as fases de chama e de incandescência (demarcadas na Figura 31), observou-se picos invertidos (menores diâmetros) semelhante ao observado para o bagaço de cana e por Costa et al. (2012). Os diâmetros foram de 0,4859 e 0,3749 μm , respectivamente para os testes 1 e 2.

5.2.3. Casca de arroz

A umidade e o poder calorífico superior da casca de arroz para as queimas realizadas encontram-se na Tabela 31.

Tabela 31 - Teores de umidade e PCS para a casca de arroz

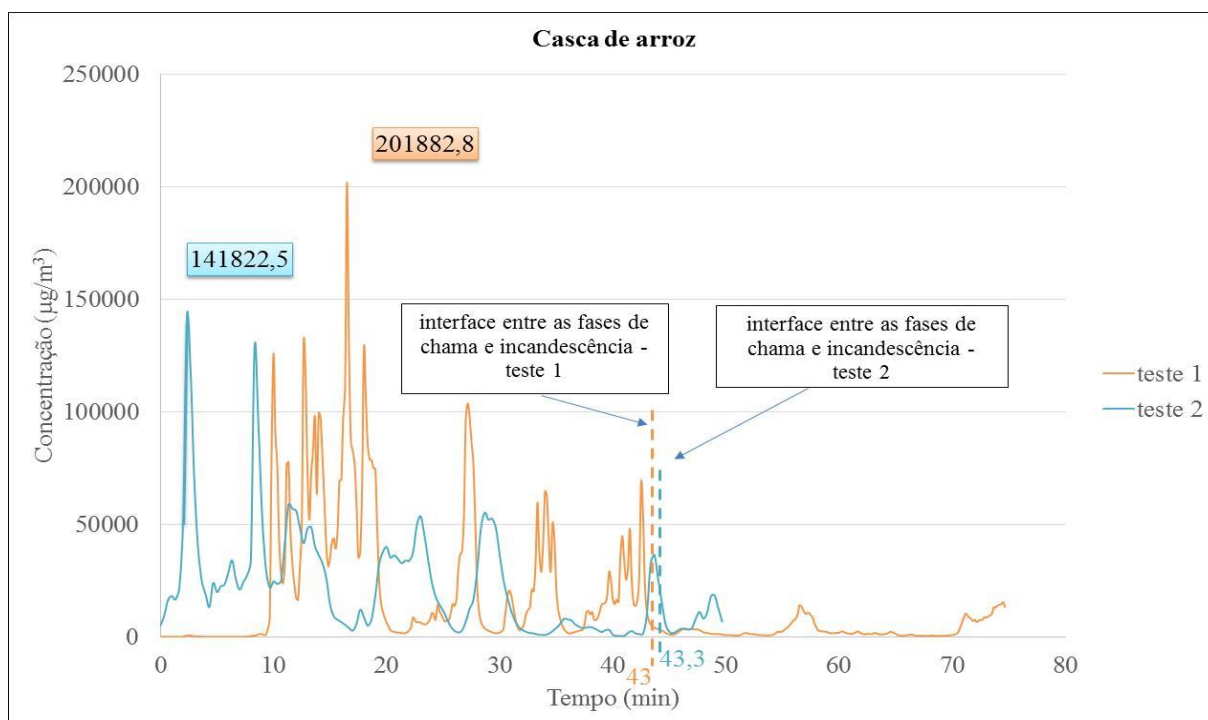
	U (%)	PCS (J/g)
Teste 1	9,97	13891
Teste 2	10,46	14989

Fonte: Resultados experimentais sobre umidade e poder calorífico superior da casca de arroz utilizada neste trabalho

5.2.3.1. Influência do tempo de queima na emissão de material particulado

A Figura 34 mostra os valores de concentração de particulados menores que $2,5 \mu\text{m}$ emitidos durante a queima da casca de arroz, com ênfase para as concentrações máximas atingidas.

Figura 34 - Concentração de particulados *versus* tempo de queima – casca de arroz



Fonte: Resultados sobre concentração de particulados emitidos durante a queima de casca de arroz

A concentração de particulados alcança um máximo durante a fase de chama (picos de concentração) e diminui ao longo do processo de combustão (fase de incandescência), assim como também observado para o bagaço de cana-de-açúcar, para a casca de café e nos trabalhos de Soares Neto (2009), Hosseini et al. (2010) e Costa et al. (2012). As concentrações médias nas duas fases de combustão citadas foram: $25327,75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (teste 1 – fase de chama) e $3244,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (teste 1 – fase de incandescência); $23551,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (teste 2 – fase de chama) e $22829,51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (teste 2 – fase de incandescência).

Quanto à adequação ao padrão de qualidade do ar estabelecido pela OMS para partículas inaláveis finas de $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para uma amostragem de 24 horas, observou-se que na quase totalidade dos testes com a casca de arroz esse valor foi superado (concentração média

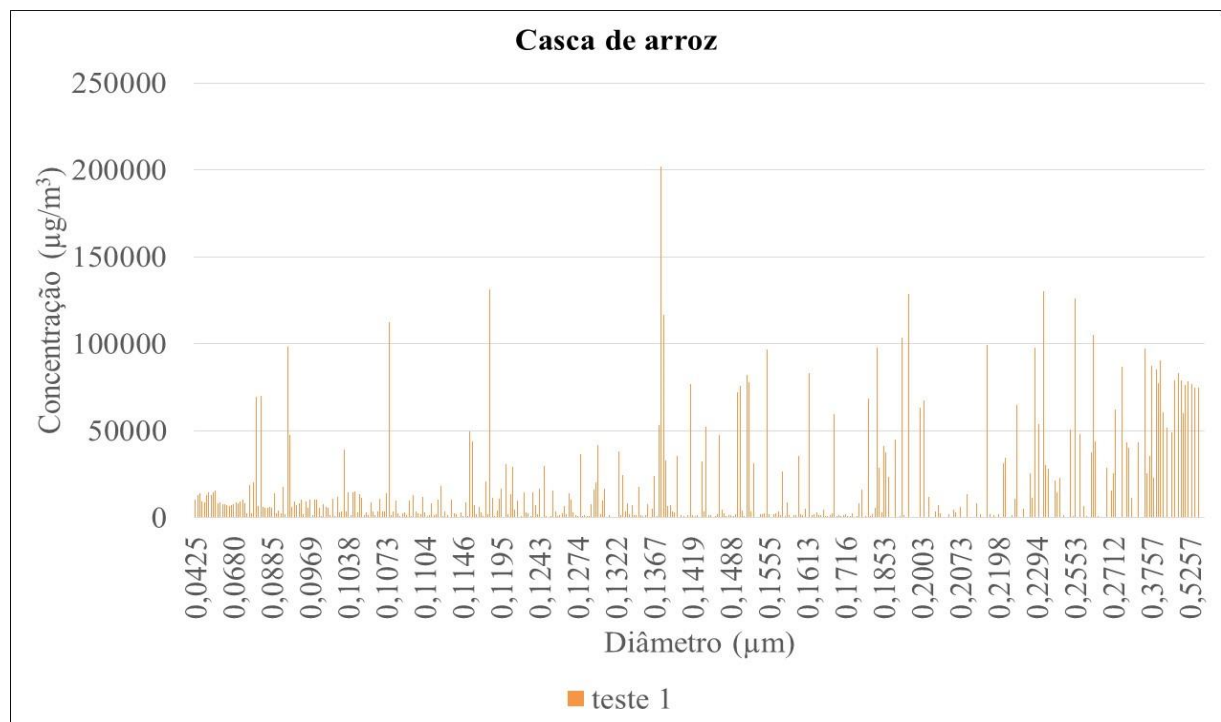
para o teste 1 = 15983,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e concentração média para o teste 2 = 23322,93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Novamente, quanto ao limite de emissão estabelecido pelo CONAMA para material particulado emitido com a combustão de bagaço de cana-de-açúcar (extendido aqui para a casca de arroz) em fontes fixas de 280000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, os valores atingidos nos testes 1 e 2 não ultrapassaram o limite, entretanto, é possível tirar a mesma conclusão de defasagem dos limites impostos comentada para o bagaço de cana-de-açúcar.

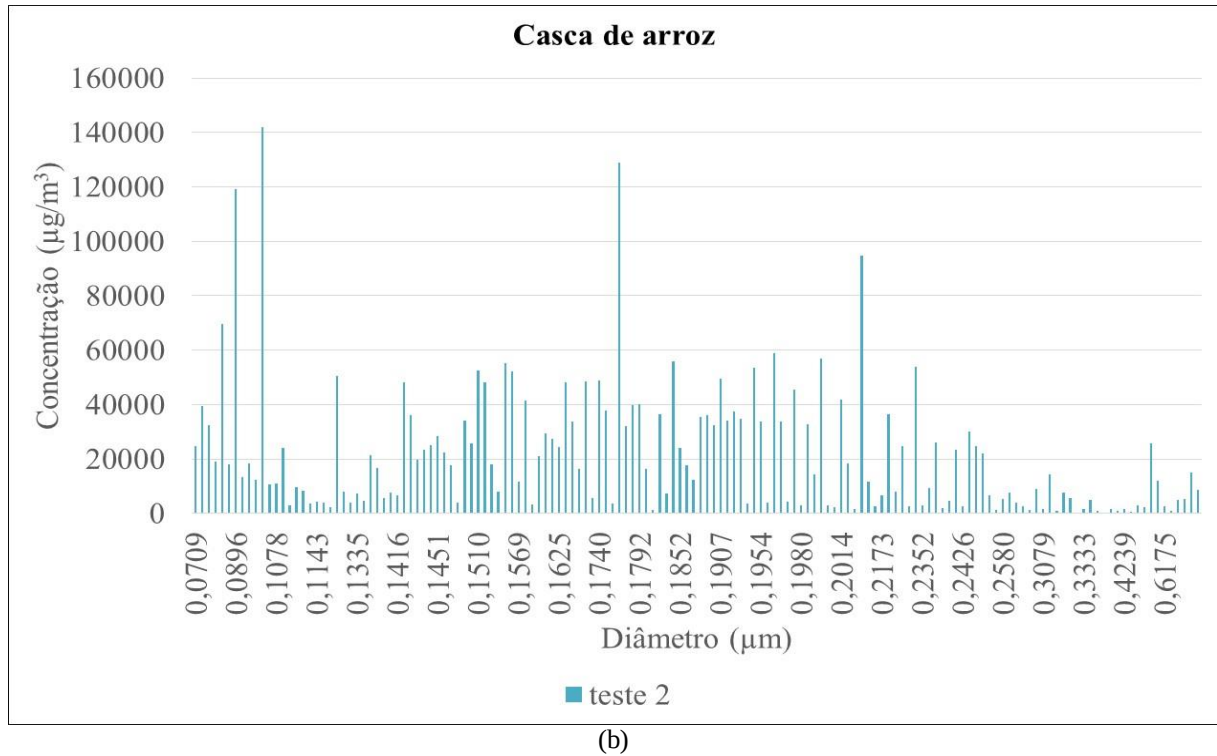
5.2.3.2. Influência do diâmetro de partícula na emissão de material particulado

Os resultados de concentração de particulados *versus* diâmetro de partícula encontram-se nas Figuras 35 (a) e 35 (b), respectivamente para os testes 1 e 2. Os de diâmetro de partícula *versus* tempo de queima encontram-se na Figura 36. E, ainda, nas Tabelas 32 e 33 são demonstradas, respectivamente, as concentrações máximas e os diâmetros de partícula correspondentes e as médias de diâmetro, diâmetro mínimo e diâmetro máximo.

Figura 35 – Concentração de particulados *versus* diâmetro de partícula – casca de arroz: (a) teste 1; (b) teste 2



(a)



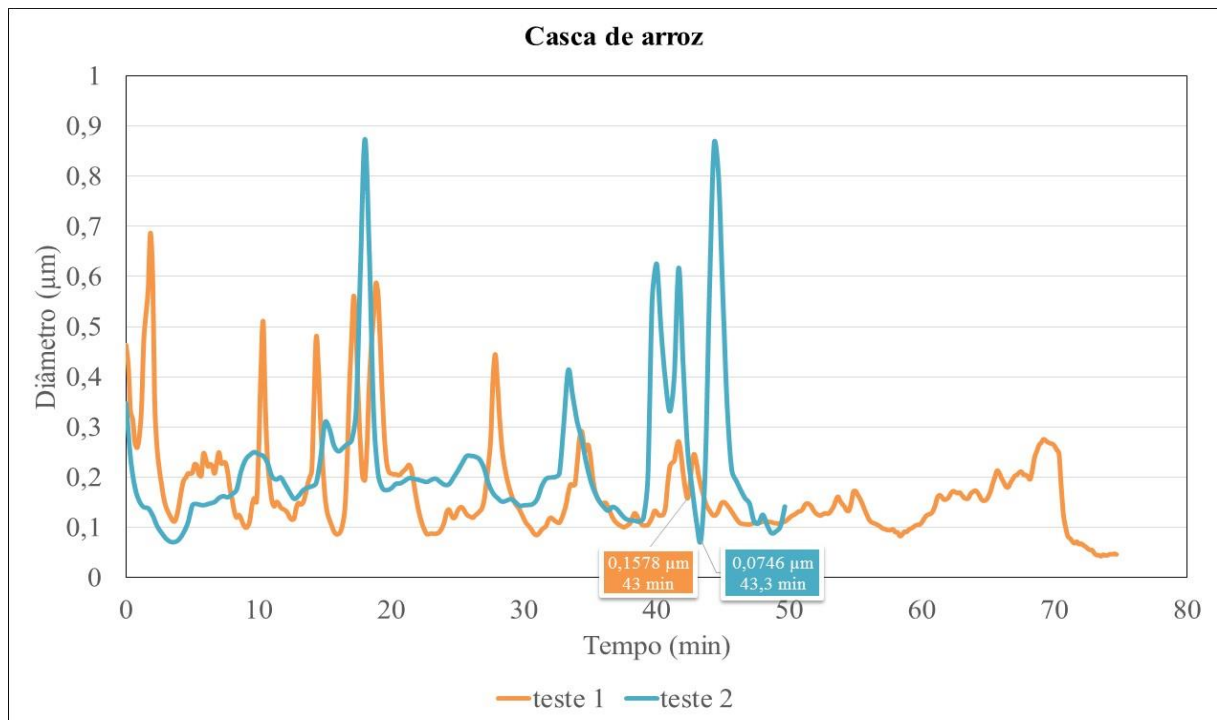
Fonte: Resultados sobre diâmetros de partículas emitidas e suas respectivas concentrações para a queima de casca de arroz

Tabela 32 - Concentrações máximas e diâmetros correspondentes para a casca de arroz

	Concentração máxima ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			Diâmetro correspondente (μm)		
	Total	Fase de chama	Fase de incandescência	Total	Fase de chama	Fase de incandescência
Teste 1	201882,8	201882,8	15411,4	0,1391	0,1391	0,0477
Teste 2	141822,5	141822,5	122781,0	0,1030	0,1030	0,0613

Fonte: Resultados experimentais sobre concentrações máximas atingidas em ambos os testes de queima de casca de arroz e diâmetros correspondentes

De acordo com a Tabela 32, os diâmetros de partículas mais encontrados (maiores concentrações) para os testes 1 e 2, respectivamente, na fase de chama, de 0,1391 μm e 0,1030 μm foram bem próximos ao observado por Hossain et al. (2012) de 0,1407 μm ; assim como na fase de incandescência, de 0,0477 μm e 0,0613 μm (para Hossain et al. (2012) de 0,0882 μm).

Figura 36 – Diâmetro de partícula *versus* tempo de queima – casca de arroz

Fonte: Resultados experimentais sobre diâmetros de partículas em função do tempo de queima para a casca de arroz

Tabela 33 – Diâmetros mínimos e máximos – casca de arroz

	Média de diâmetros (µm)			
	Fase de chama	Fase de incandescência	Diâmetro mínimo (µm)	Diâmetro máximo (µm)
Teste 1	0,1983	0,1379	0,0425	0,6868
Teste 2	0,2180	0,2190	0,0709	0,8737

Fonte: Média de diâmetros e diâmetros mínimo e máximo calculados a partir dos resultados obtidos com a queima da casca de arroz

Na Figura 36, nas interfaces entre as fases de chama e de incandescência (demarcadas na Figura 34), observou-se picos invertidos (menores diâmetros) para os dois testes (0,1578 µm – teste 1 e 0,0746 µm – teste 2), assim como também observado por Costa et al. (2012).

Foi possível observar através da Figura 36 e da Tabela 33 que na fase de incandescência houve uma diminuição no diâmetro das partículas coletadas (média de diâmetros na fase de incandescência menor que na fase de chama), sendo que o teste 2 apresentou quase a mesma média nas duas fases, devido à fase de incandescência ter se estendido por menos tempo

(parada do teste). De acordo com Hossain et al. (2012), uma razão para a ordem decrescente de diâmetros entre as fases de chama e de incandescência (comportamento contrário às demais biomassas estudadas que apresentaram ordem crescente de diâmetros entre as fases de chama e de incandescência), pode ser devido à natureza básica das partículas, juntamente com a volatilidade observada. Partículas emitidas a partir da casca de arroz durante a fase de incandescência foram completamente volatilizadas por aquecimento a 150°C, enquanto que a maioria das partículas emitidas na fase de chama ficaram retidas até 250°C. Ou seja, segundo Hays et al. (2005), as frações de carbono orgânico voláteis presentes na queima de casca de arroz são compostas por mais de 200 compostos que apresentam pontos de fusão no intervalo de 0°C até 250°C. Portanto, as diferentes condições de combustão (diferentes temperaturas para as fases) podem atuar de forma distinta para as diferentes partículas (pontos de fusão distintos), potencialmente facilitando o processo de fixação com outras partículas, resultando num aumento do diâmetro (quanto maior o ponto de fusão, menor volatilização e portanto, maior fixação entre as partículas e maior diâmetro, o que aconteceu na fase de chama).

5.2.4. Resíduos madeireiros (cavacos de eucalipto e de pinus)

A umidade e o poder calorífico superior dos resíduos de processamento industrial das espécies florestais estudadas encontram-se na Tabela 34.

Tabela 34 - Teores de umidade e PCS para os resíduos madeireiros

	U (%)	PCS (J/g)
Cavaco de eucalipto	13,99	19159
Cavaco de pinus – teste 1	11,80	18113
Cavaco de pinus – teste 2	15,11	19542
Cavacos de eucalipto e de pinus (mistura)	14,62	17569

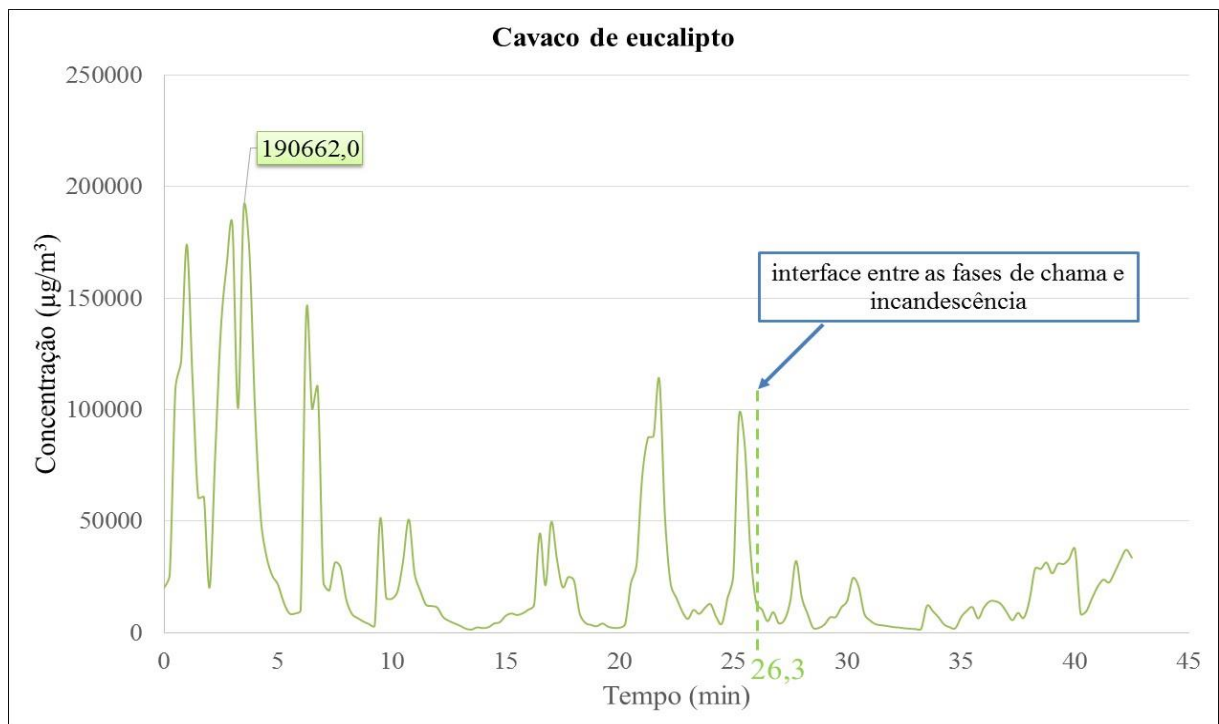
Fonte: Resultados experimentais sobre umidade e poder calorífico superior dos resíduos madeireiros utilizados neste trabalho

5.2.4.1. Influência do tempo de queima na emissão de material particulado

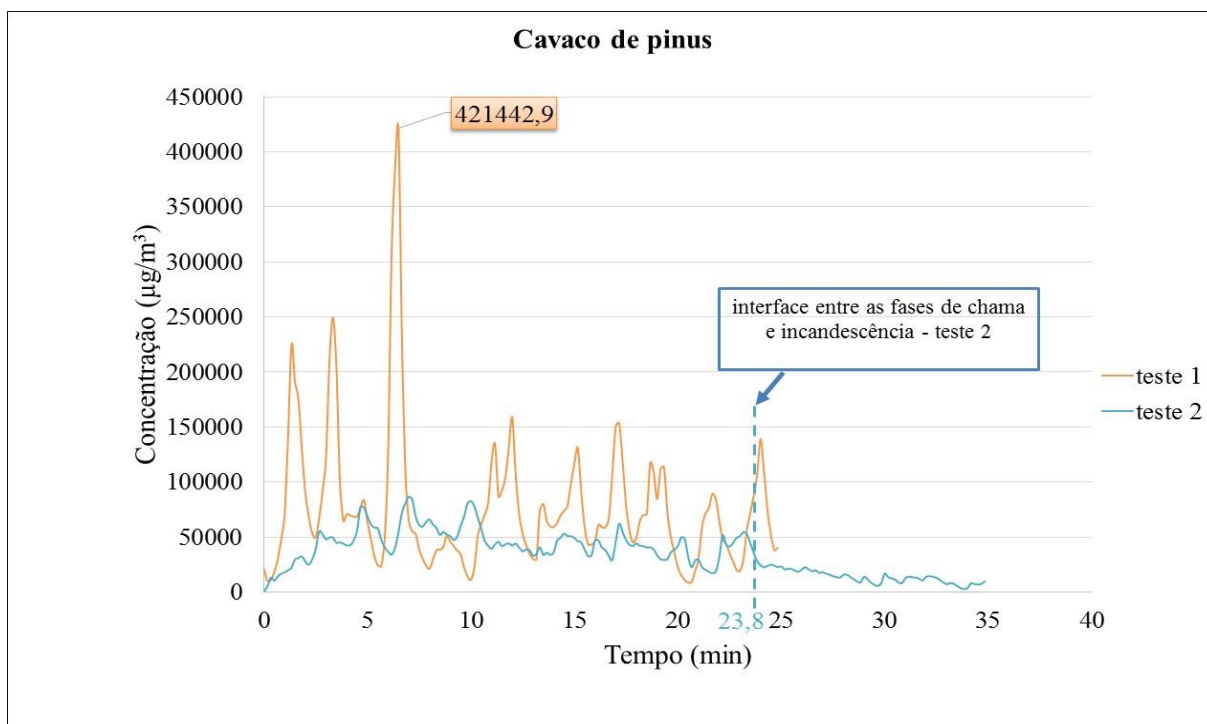
As Figuras 37 (a), 37 (b) e 37 (c) mostram os valores de concentração de particulados menores que $2,5\ \mu\text{m}$ emitidos durante a queima dos resíduos madeireiros, com ênfase para as concentrações máximas, demarcadas nas mesmas figuras.

Foram realizados um teste de queima com o cavaco de eucalipto, dois com o cavaco de pinus e um com uma mistura de ambos (sem porcentagem determinada de cada resíduo). A quantidade diferente de testes para os cavacos de eucalipto e de pinus (em separado) deu-se pela quantidade de material disponível para queima.

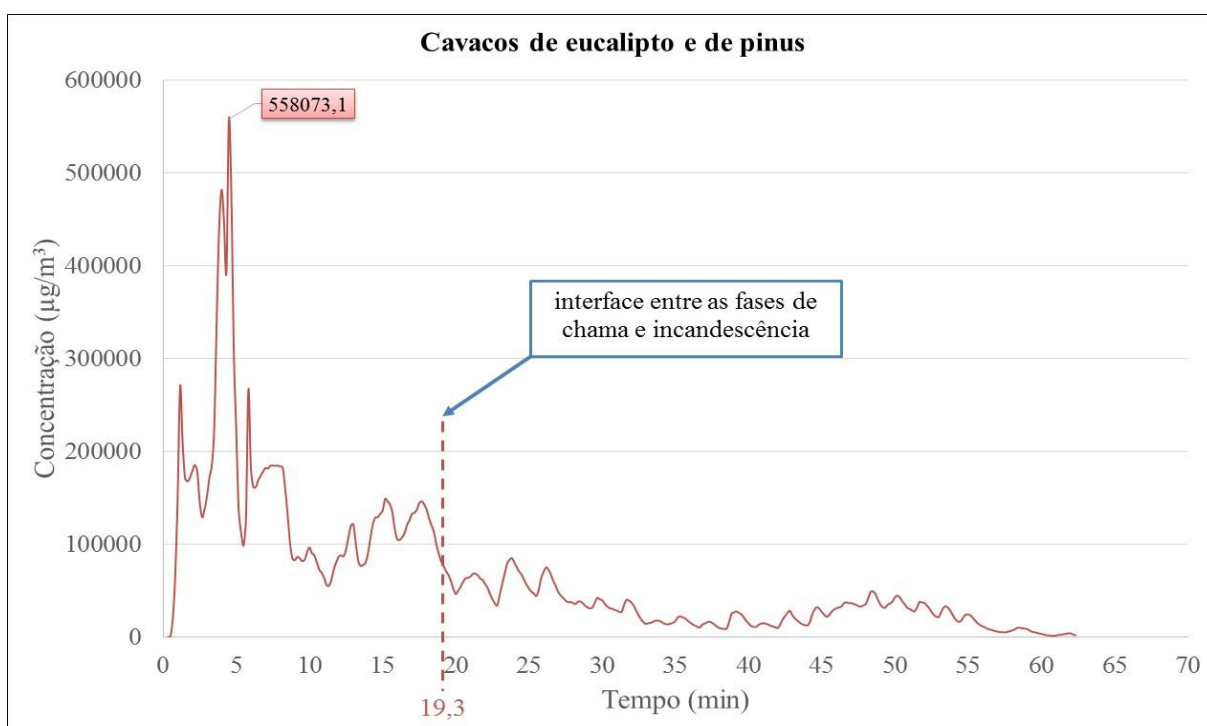
Figura 37 – Concentração de particulados *versus* tempo de queima: (a) cavaco de eucalipto; (b) cavaco de pinus; (c) cavacos de eucalipto e de pinus (mistura)



(a)



(b)



(c)

Fonte: Resultados sobre concentração de particulados emitidos durante a queima de resíduos madeireiros

Comparando-se os valores de concentração de particulados obtidos para os resíduos madeireiros com o padrão de qualidade do ar estabelecido pela OMS para partículas inaláveis finas ($\text{PM}_{2,5}$) de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para uma amostragem de 24 horas, observou-se que resultaram bem superiores em quase todo o período de queima para todos os testes (concentrações médias de

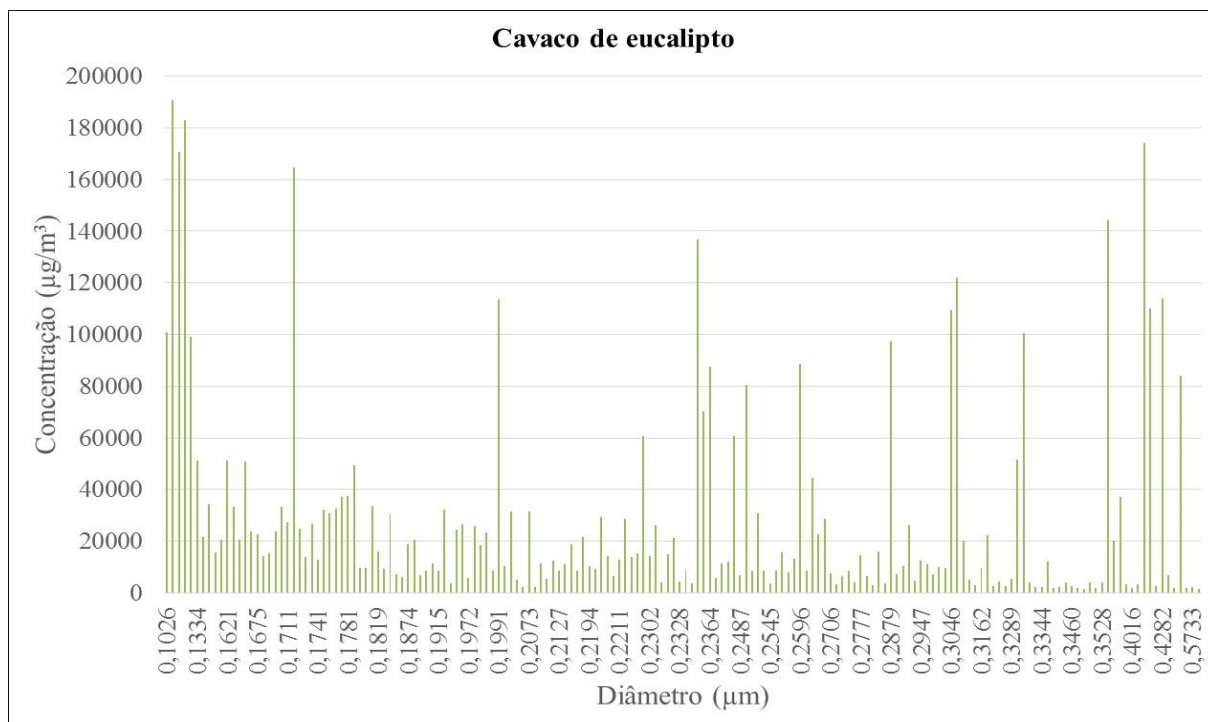
28341,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 77330,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 37774,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 64475,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, para cavaco de eucalipto, cavaco de pinus - teste 1, cavaco de pinus - teste 2 e cavacos de eucalipto+pinus). E, quanto ao limite de emissão estabelecido pelo CONAMA para material particulado emitido com a combustão de derivados de madeira em fontes fixas de 730000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, os valores atingidos nos testes não ultrapassaram o limite, entretanto, é possível tirar a mesma conclusão de defasagem dos limites impostos comentada para o bagaço de cana-de-açúcar.

Assim como o observado para o bagaço de cana-de-açúcar, casca de café e casca de arroz e no estudo de Costa et al. (2012), a fase de chama para os resíduos madeireiros, também apresentou as maiores concentrações de partículas (picos pronunciados de concentração).

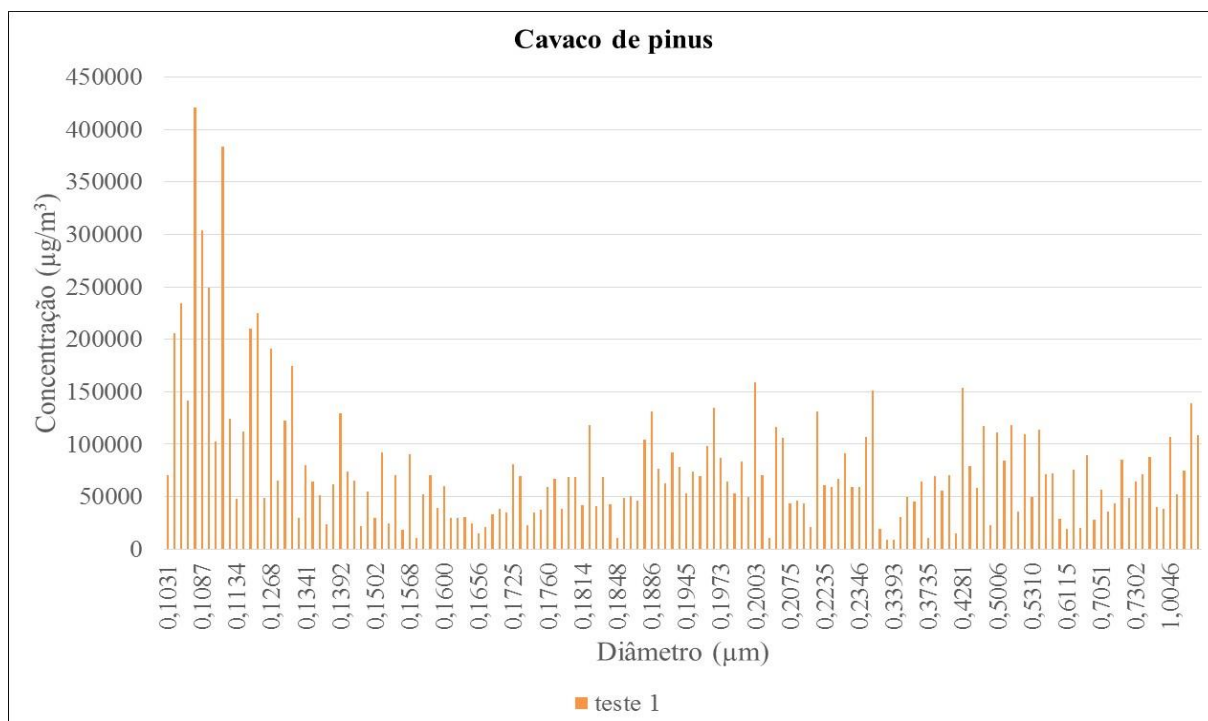
5.2.4.2. Influência do diâmetro das partículas na emissão de material particulado

Um estudo quantitativo das partículas de acordo com o seu diâmetro foi realizado e os resultados obtidos encontram-se na Figura 38. A distribuição do diâmetro das partículas em função do tempo de queima também foi estudada e encontra-se descrita na Figura 39. E, ainda, nas Tabelas 35 e 36 são demonstradas, respectivamente, as concentrações máximas e os diâmetros de partícula correspondentes e as médias de diâmetro, diâmetro mínimo e diâmetro máximo.

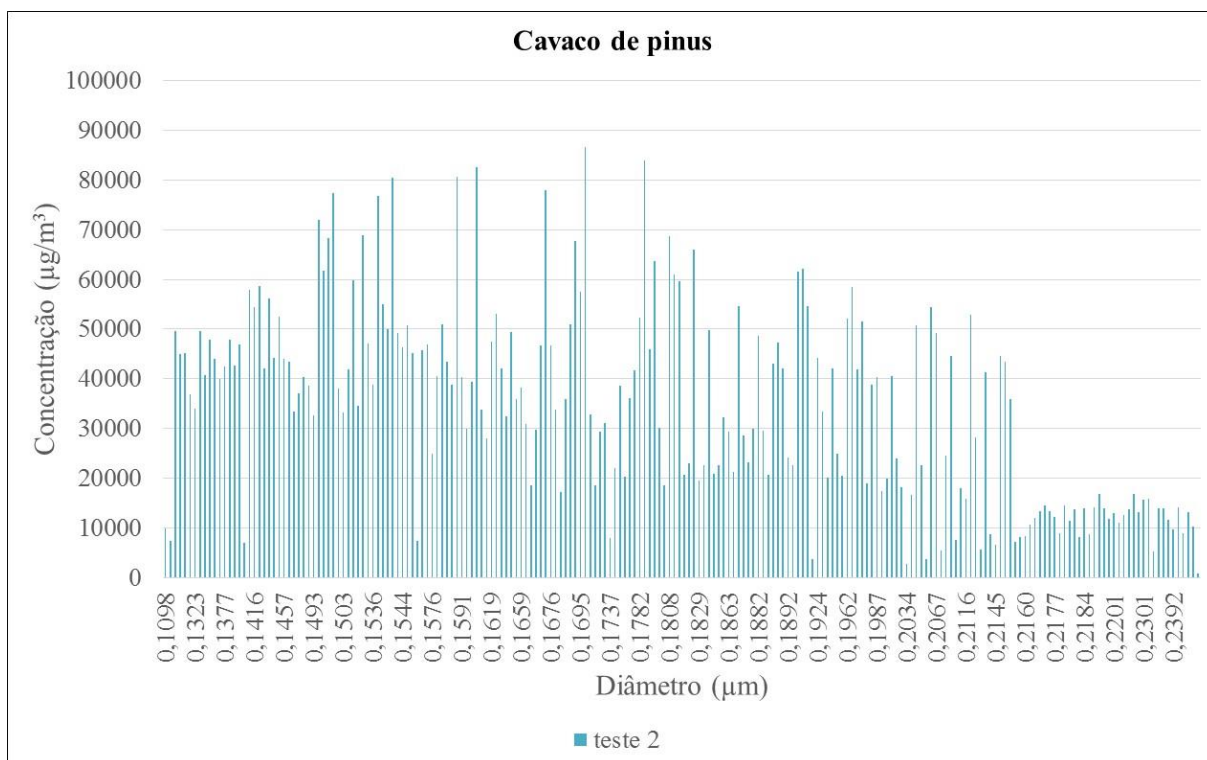
Figura 38 – Concentração de particulados *versus* diâmetro de partícula: (a) cavaco de eucalipto; (b) cavaco de pinus – teste 1; (c) cavaco de pinus – teste 2; (d) cavacos de eucalipto e de pinus (mistura)



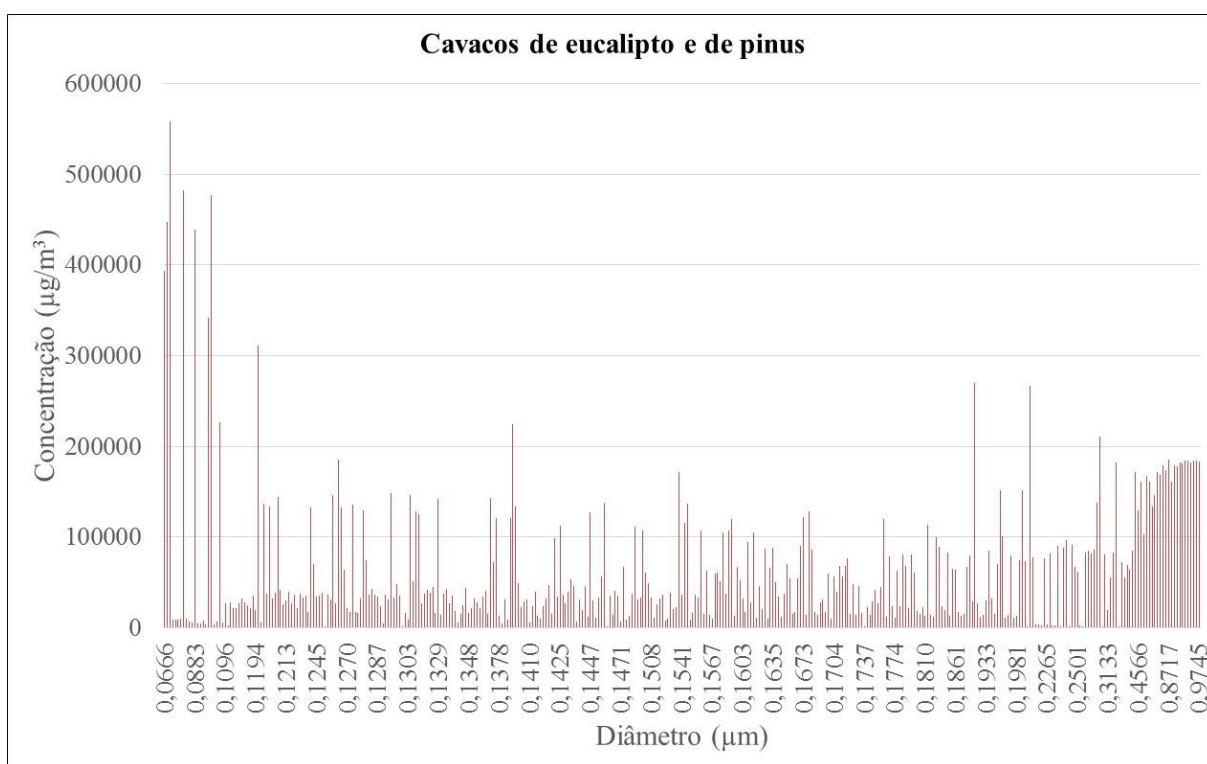
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Resultados sobre diâmetros de partículas emitidas e suas respectivas concentrações para a queima de resíduos madeiros

Tabela 35 - Concentrações máximas e diâmetros correspondentes para os resíduos madeireiros

	Concentração máxima ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			Diâmetro correspondente (μm)		
	Total	Fase de chama	Fase de incandescência	Total	Fase de chama	Fase de incandescência
Cavaco de eucalipto	190662,0	190662,0	37569,0	0,1068	0,1068	0,1781
Cavaco de pinus – teste 1	421442,9	421442,9	*	0,1078	0,1078	*
Cavaco de pinus – teste 2	86707,9	86707,9	24972,8	0,1696	0,1696	0,1947
Cavacos de eucalipto e de pinus (mistura)	558073,1	558073,1	84781,3	0,0750	0,0750	0,1934

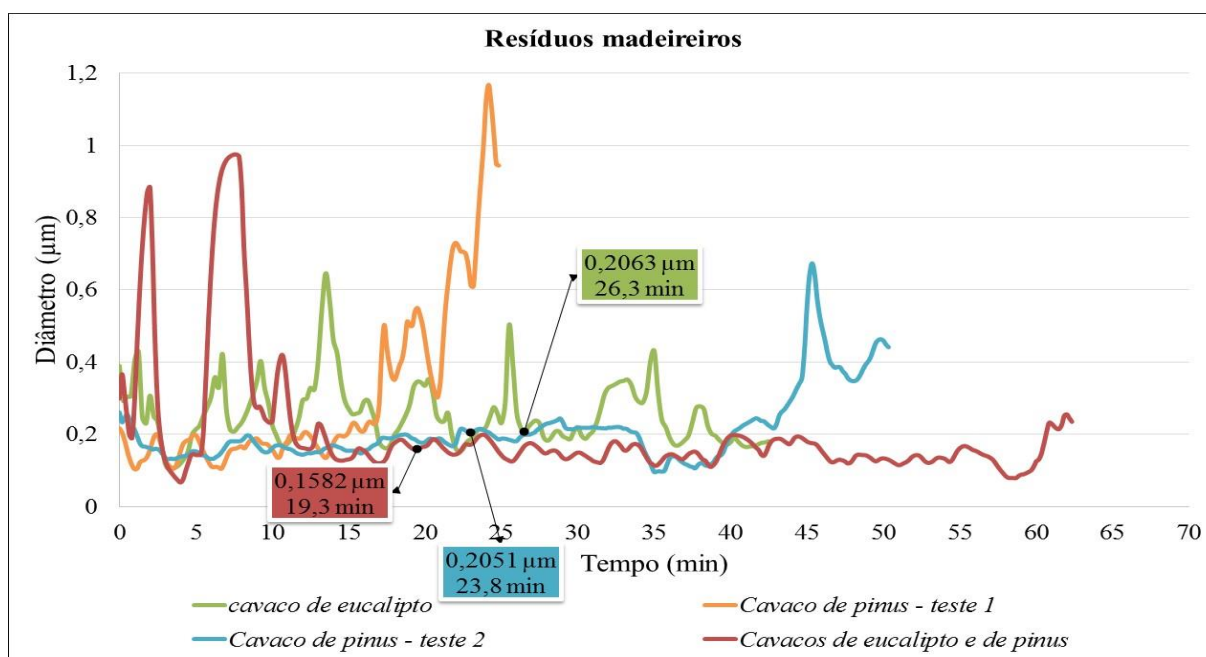
* não observada durante o experimento

Fonte: Resultados experimentais sobre concentrações máximas atingidas em ambos os testes de queima de resíduos madeireiros e diâmetros correspondentes

Através da Figura 38 (d) e da Tabela 35, observou-se que a queima da mistura de cavacos de eucalipto+pinus apresentou, assim como as biomassas agrícolas, alta concentração ($558073,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de partículas ultrafinas ($0,0750 \mu\text{m}$). E, segundo Hosseini et al. (2010), a emissão dessas partículas reduz-se com o progresso do processo de combustão.

Assim como para Hossain et al. (2012) e Costa et al. (2012), as maiores concentrações foram relacionadas aos menores diâmetros para ambos os testes (Figura 38).

Figura 39 – Diâmetro de partícula versus tempo de queima – resíduos madeireiros



Fonte: Resultados experimentais sobre diâmetros de partículas em função do tempo de queima para os resíduos madeireiros

Tabela 36 – Média de diâmetros, diâmetros mínimos e máximos – resíduos madeireiros

	Média de diâmetros (µm)			
	Fase de chama	Fase de incandescência	Diâmetro mínimo (µm)	Diâmetro máximo (µm)
Cavaco de eucalipto	0,2680	0,2326	0,1026	0,6458
Cavaco de pinus – teste 1	0,2171	*	0,1031	1,1675
Cavaco de pinus – teste 2	0,1712	0,2054	0,0954	0,6735
Cavacos de eucalipto e de pinus (mistura)	0,3147	0,1508	0,0666	0,9745

* não observada durante o experimento

Fonte: Média de diâmetros e diâmetros mínimo e máximo calculados a partir dos resultados obtidos com a queima dos resíduos madeireiros

Através da Figura 39 e da Tabela 36, foi possível observar que a queima do cavaco de pinus (teste 2) apresentou maiores diâmetros na fase de incandescência (média de 0,2054 µm) enquanto que o cavaco de eucalipto apresentou menores diâmetros nesta mesma fase, provavelmente devido às suas características estruturais diferentes. De acordo com Telmo e Lousada (2011), os principais componentes da parede celular de madeiras são a celulose¹³, hemicelulose¹⁴ e lignina¹⁵, sendo que as proporções e a composição química das últimas são diferentes em resinosas (*Pinus*) e folhosas (*Eucalyptus*); e a celulose é um componente uniforme em todas as madeiras. Ainda, as resinosas têm maior proporção de lignina.

Observando a distribuição de diâmetro das partículas amostradas verificou-se que as médias apresentadas nas queimas dos cavacos de eucalipto e de pinus (excetuando-se a mistura) foram semelhantes às obtidas por Hays et al. (2005), variando em torno de 0,1 a 0,2 µm.

Assim como observado por Costa et al. (2012), todas as biomassas (exceção para o cavaco de pinus - teste 1) apresentaram um pico de mínimo para o diâmetro na interface entre as fases de chama e de incandescência. Os diâmetros foram de 0,2063 µm, 0,2051 µm e 0,1582 µm, respectivamente para cavaco de eucalipto, cavaco de pinus – teste 2 e cavacos de

¹³Celulose = é o componente principal da madeira. Quase 40-45% em massa seca na maioria das espécies de madeira é de celulose localizada principalmente na parede celular. É insolúvel na maioria dos solventes e é o elemento estrutural central (TELMO e LOUSADA, 2011).

¹⁴Hemiceluloses = são as segundas principais espécies químicas da madeira. São derivadas principalmente de cadeias de açúcares. Resinosas e folhosas diferem na quantidade e na composição (TELMO e LOUSADA, 2011).

¹⁵Lignina = é uma substância fenólica que contribui para o aumento das propriedades de resistência mecânica. A sua quantidade é variável de 20-40% (TELMO e LOUSADA, 2011).

eucalipto+pinus.

Em relação à umidade do fluxo gasoso (parâmetro também estudado por Costa et al. (2012), verificou-se que para os quatro testes (83%, 68%, 81%, 74%, respectivamente para cavaco de eucalipto, cavaco de pinus - teste 1, cavaco de pinus - teste 2, cavacos de eucalipto+pinus) os valores foram maiores que os observados pelos autores (máximo de 55%). E, cabe salientar que foi utilizado o aquecedor de fluxo para eliminar os efeitos de coagulação e condensação do vapor de água nas partículas. A umidade mais elevada também pode ser uma explicação para os maiores diâmetros na fase de chama (cavaco de eucalipto e cavacos de eucalipto+pinus).

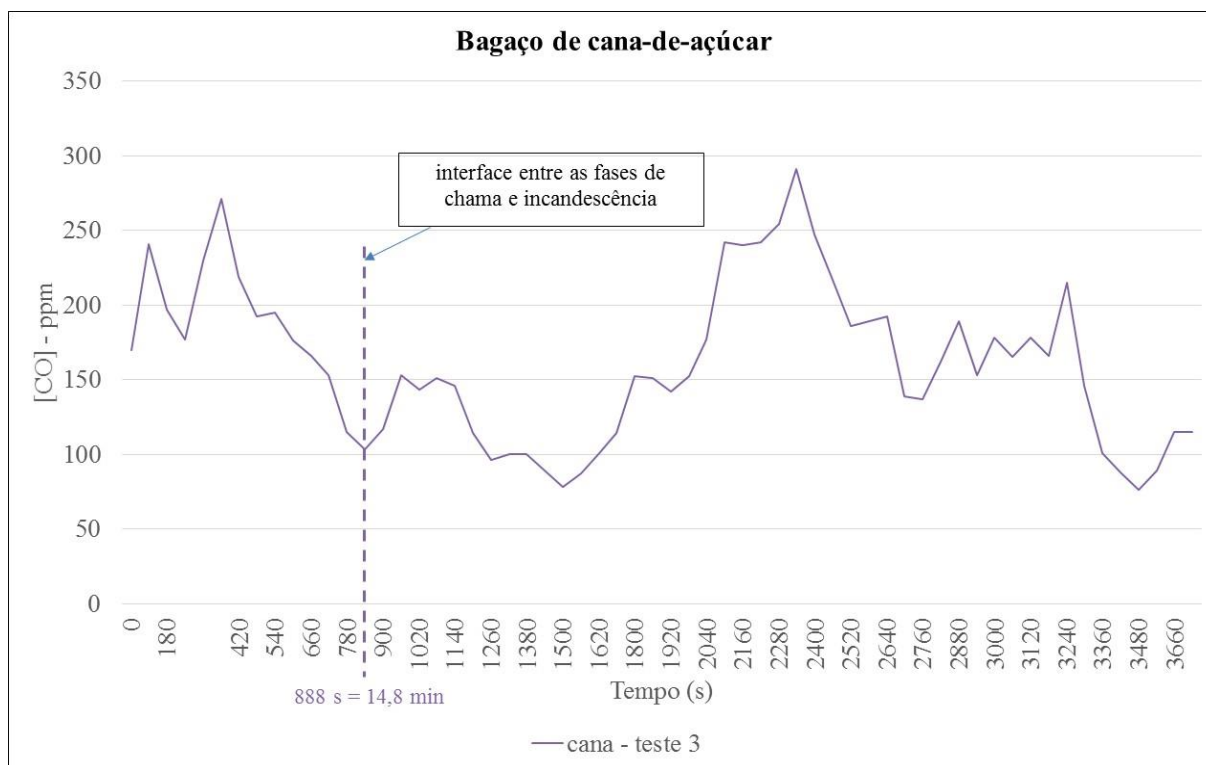
5.3. QUEIMA DE BIOMASSA – AMOSTRAGEM DE GASES

As emissões de gases provenientes das queimas das biomassas foram amostradas conforme descrição encontrada no item 4.4 e os resultados obtidos encontram-se descritos neste item. Conforme mencionado no item 4.4.1, a amostragem dos gases foi realizada utilizando-se o amostrador de gases Unigas 3000+. As coletas dos dados pelo Unigas 3000+ em todos os testes de queima foram realizadas automaticamente pelo instrumento.

5.3.1. Bagaço de cana-de-açúcar

As Figuras 40 a 42 mostram as concentrações de CO (ppm), CO₂ (%) e NO_x (ppm) emitidos com a queima de bagaço de cana-de-açúcar. As condições da biomassa como teor de umidade (%) e poder calorífico superior (J/g) são as mesmas descritas no item 5.2.1 para o teste 3.

Figura 40 – Concentração de CO em função do tempo de queima – bagaço de cana-de-açúcar – teste 3



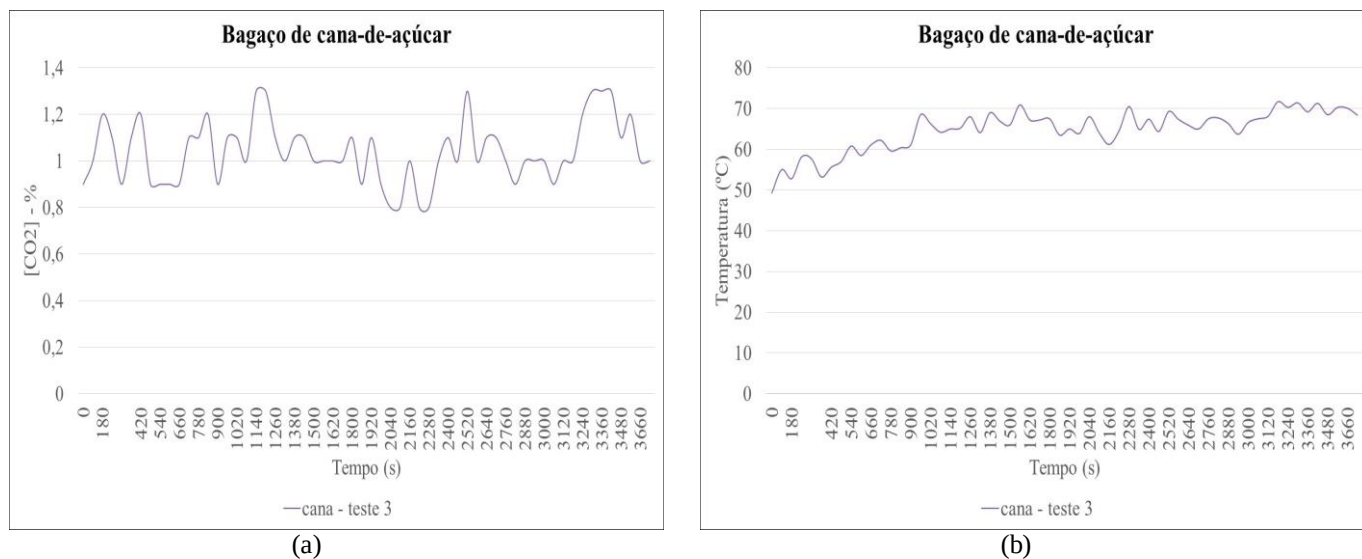
Fonte: Resultados sobre concentração de CO como função do tempo de queima do bagaço de cana-de-açúcar

A curva de concentração de CO para o bagaço de cana em função do tempo (Figura 40) apresentou-se muito semelhante à observada por Soares Neto et al. (2011).

Com relação às fases de combustão (interface entre as fases de chama e de incandescência demarcada na Figura 40), as maiores concentrações observadas nas fases de chama e de incandescência, respectivamente, foram de 271 ppm e 291 ppm. E, estes valores estão coerentes com os observados por Soares Neto et al. (2011) que concluíram que as máximas concentrações de CO aparecem na fase de incandescência.

Os padrões primário e secundário de qualidade do ar, estabelecidos pelo CONAMA através da Resolução Conama nº 03/90, de 35 ppm para 1 hora de amostragem e o limite de emissão estabelecido pelo mesmo órgão através da Resolução Conama nº 382/06, de 1,7 ppm para um queimador com potência térmica entre 0,15 e 1,0 MW, foram ultrapassados neste teste com o bagaço de cana-de-açúcar, resultado extremamente prejudicial à saúde humana pois, segundo Lora (2002), o CO é um poluente altamente tóxico que afeta a capacidade do sangue de transportar oxigênio, reagindo com a hemoglobina do sangue, obtendo-se como resultado uma substância denominada carboxihemoglobina que provoca alterações nervosas e de comportamento, assim como alterações no miocárdio.

Figura 41 – (a) Concentração de CO₂ em função do tempo de queima; (b) Temperatura do gás em função do tempo - bagaço de cana-de-açúcar - teste 3

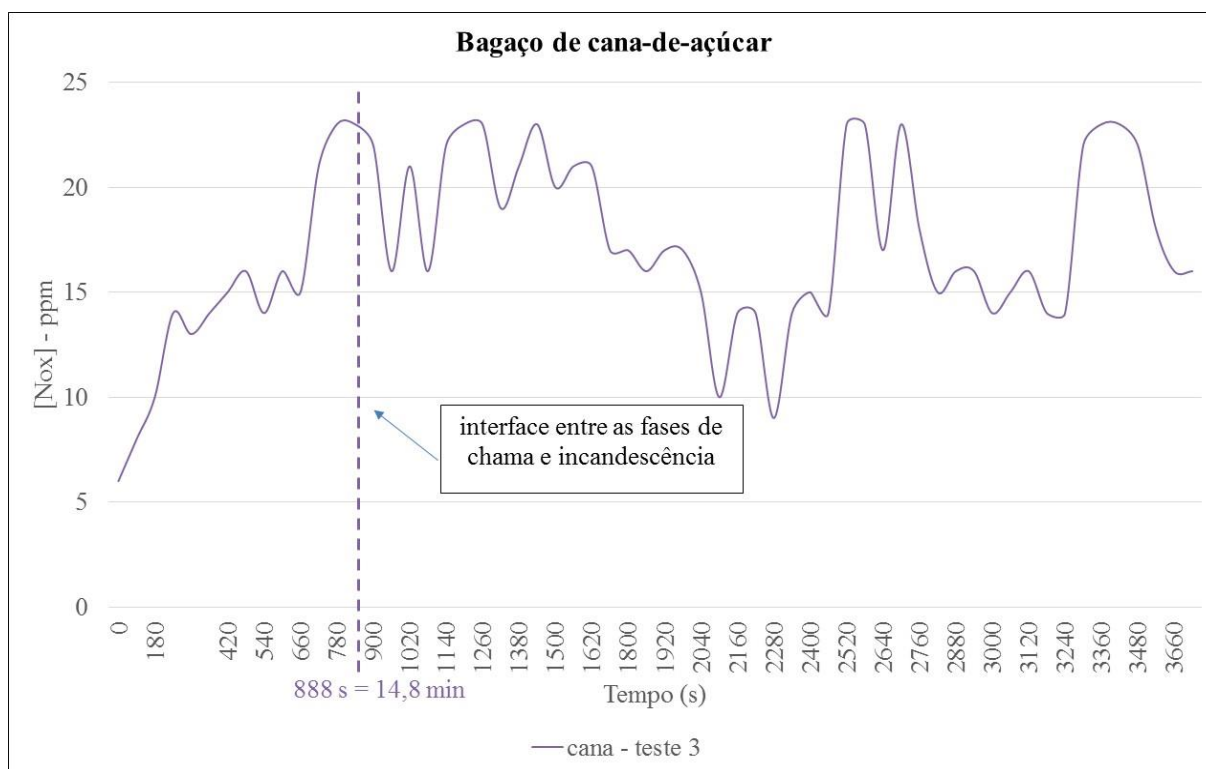


Fonte: Resultados sobre concentração de CO₂ e temperatura do gás como função do tempo de queima do bagaço de cana-de-açúcar

Houve um ligeiro aumento nas concentrações de CO₂ emitidas ao longo do processo de queima do bagaço de cana-de-açúcar (Figura 41 (a)). As máximas concentrações atingidas nas fases de chama e de incandescência foram 1,2% e 1,3%, respectivamente.

Através das Figuras 41 (a) e 41 (b), observou-se que as curvas apresentaram similaridade, ou seja, mostraram que as concentrações mais elevadas (picos) de CO₂ foram relacionadas a temperaturas mais altas do gás (picos), e vice-versa, assim como também observado por Soares Neto et al. (2011).

Figura 42 – Concentração de NO_x em função do tempo de queima – bagaço de cana-de-açúcar: teste 3



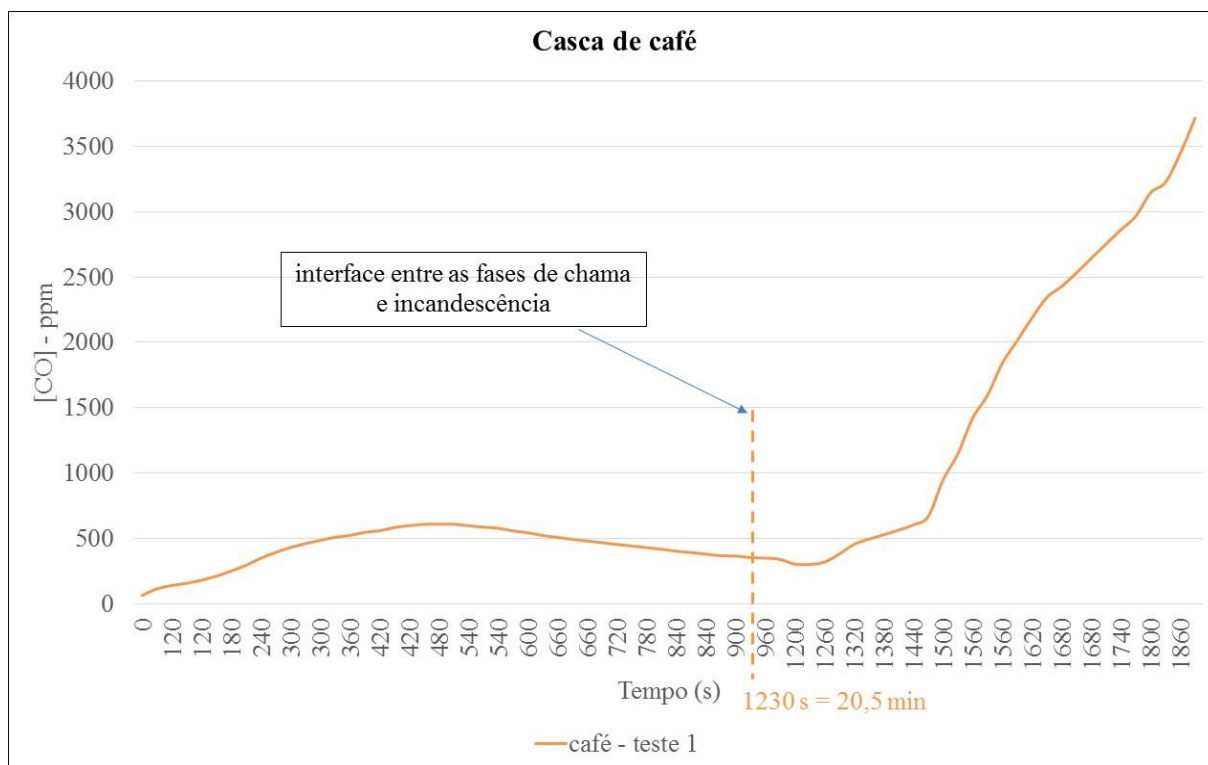
Fonte: Resultados sobre concentração de NO_x como função do tempo de queima do bagaço de cana-de-açúcar

Através da Figura 42 pode-se observar que a curva de NO_x foi muito similar à de CO_2 (Figura 41 (a)). Soares Neto et al. (2011) também chegaram à mesma similaridade mencionada, inclusive com valores de emissão de NO_x em função do tempo na mesma faixa de 0 a 25 ppm.

5.3.2. Casca de café

As Figuras 43 a 45 mostram as concentrações de CO (ppm), CO_2 (%) e NO_x (ppm) emitidos com a queima de casca de café. As condições da biomassa como teor de umidade (%) e poder calorífico superior (J/g) são as mesmas descritas no item 5.2.2 para o teste 1.

Figura 43 – Concentração de CO em função do tempo de queima – casca de café – teste 1



Fonte: Resultados sobre concentração de CO como função do tempo de queima da casca de café

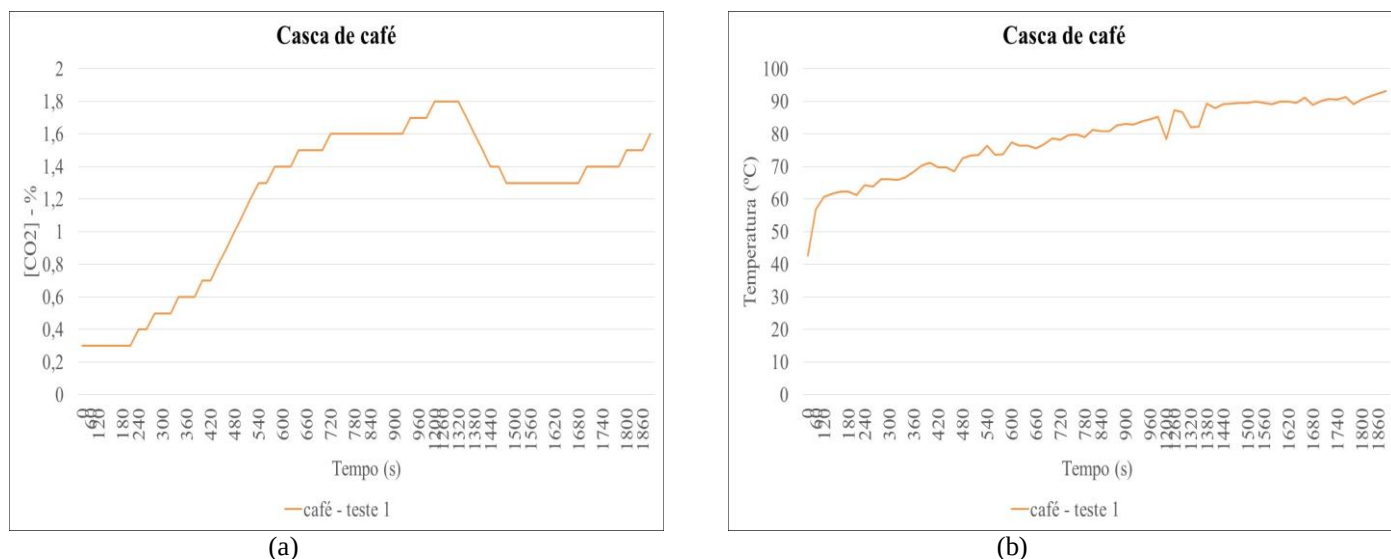
A curva de concentração de CO para a casca de café em função do tempo (Figura 43) revelou valores bem superiores aos obtidos com o bagaço de cana-de-açúcar. Concentrações elevadas de CO demonstram que há combustão incompleta e que a biomassa necessita de grande quantidade de ar para combustão (FERNÁNDEZ et al., 2012). Entretanto tais valores mostraram-se bem próximos aos alcançados por Limousy et al. (2013), que trabalharam com pellets de borra de café (média aproximada de 1125 ppm). Os teores de umidade da biomassa deste trabalho e de Limousy et al. (2013) foram de 18,04% e 11,78%, respectivamente.

Com relação às fases de combustão, as maiores concentrações observadas nas fases de chama e de incandescência, respectivamente, foram de 608 ppm e 3716 ppm. E, estes valores estão coerentes com os observados por Soares Neto et al. (2011) que concluíram que as máximas concentrações de CO aparecem na fase de incandescência.

Assim como as emissões de CO durante a queima de bagaço de cana-de-açúcar, as da queima da casca de café também ultrapassaram os padrões primário e secundário de qualidade do ar estabelecidos pelo CONAMA através da Resolução Conama nº 03/90, de 35 ppm para 1 hora de amostragem e o limite de emissão, estabelecido pelo mesmo órgão através da Resolução Conama nº 382/06, de 1,7 ppm para um queimador com potência térmica entre

0,15 e 1,0 MW.

Figura 44 – (a) Concentração de CO₂ em função do tempo de queima; (b) Temperatura do gás em função do tempo – casca de café - teste 1

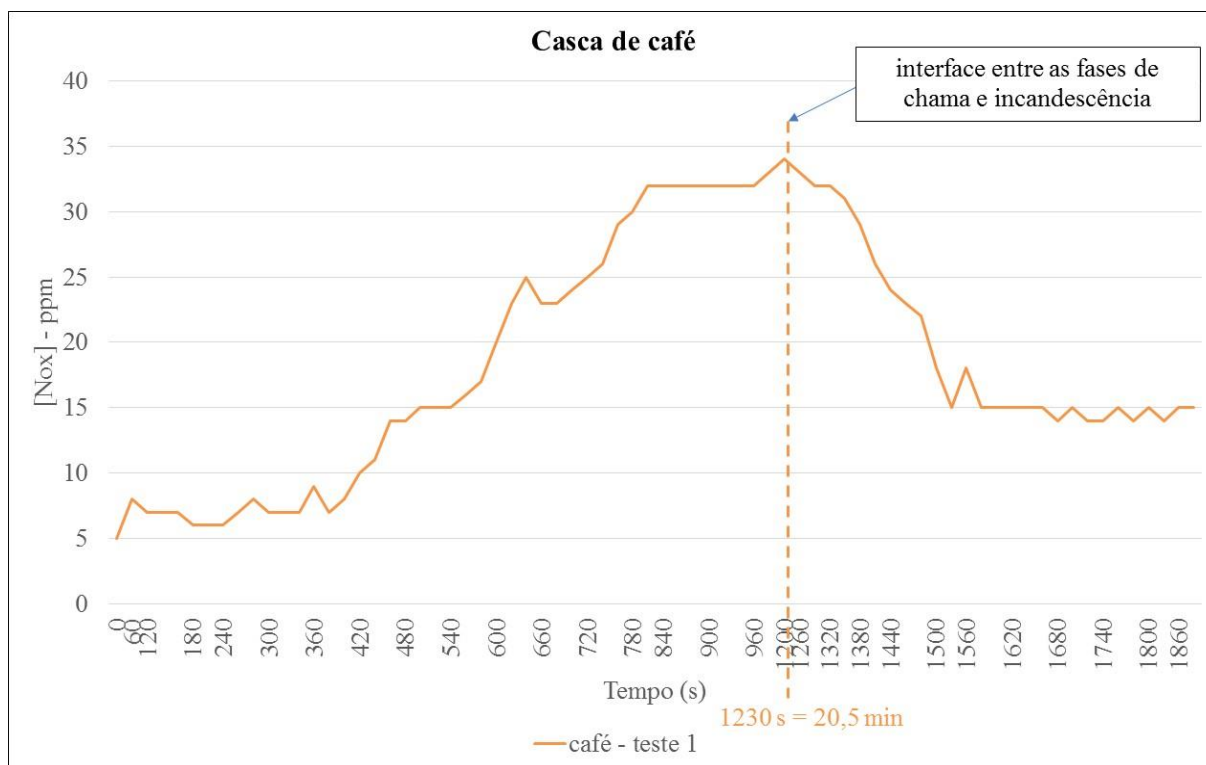


Fonte: Resultados sobre concentração de CO₂ e temperatura do gás como função do tempo de queima da casca de café

As concentrações médias atingidas nas fases de chama e de incandescência para o CO₂ foram 1,1% e 1,4%, respectivamente, entretanto, através da Figura 44 (a) observa-se uma tendência de queda na concentração de CO₂ na fase de incandescência (visualizada a partir de 1320 s), comportamento semelhante observado por Soares et al. (2011).

Através da Figuras 44 (a) e 44 (b), observou-se que as curvas apresentaram similaridade, ou seja, mostraram que as concentrações mais elevadas de CO₂ estão relacionadas a temperaturas mais altas do gás (curvas crescentes), e vice-versa, assim como também observado por Soares Neto et al. (2011).

Figura 45 – Concentração de NO_x em função do tempo de queima – casca de café – teste 1



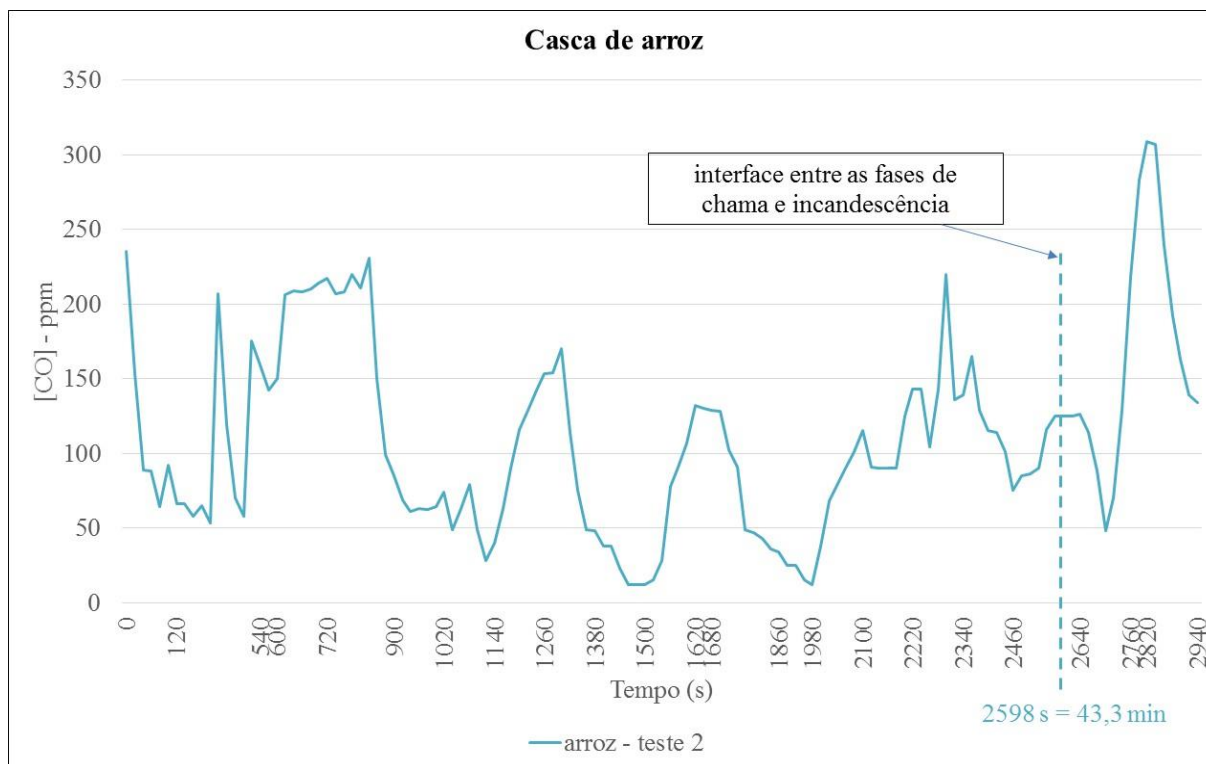
Fonte: Resultados sobre concentração de NO_x como função do tempo de queima da casca de café

Através da Figura 45 pode-se concluir que as emissões de NO_x diminuíram (curva decrescente) na fase de incandescência, comportamento também verificado por Soares Neto et al. (2011), inclusive com intervalos de concentrações de NO_x muito próximos nos dois estudos (5 – 34 ppm, presente trabalho e, 2 – 24 ppm no de Soares Neto et al. (2011)).

5.3.3. Casca de arroz

As Figuras 46 a 48 mostram as concentrações de CO (ppm), CO_2 (%) e NO_x (ppm) emitidos com a queima de casca de arroz. As condições da biomassa como teor de umidade (%) e poder calorífico superior (J/g) são as mesmas descritas no item 5.2.3 para o teste 2.

Figura 46 – Concentração de CO em função do tempo de queima – casca de arroz – teste 2



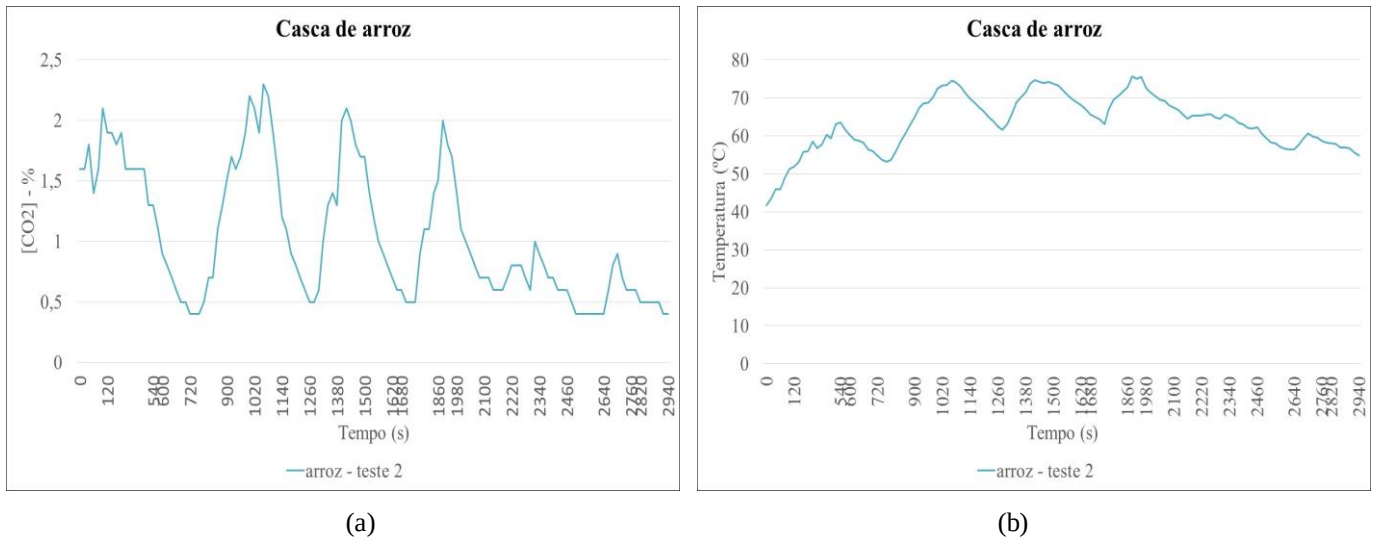
Fonte: Resultados sobre concentração de CO como função do tempo de queima da casca de arroz

A observação da Figura 46 e, em especial das fases da combustão delimitadas pela interface demarcada na mesma figura, mostram a tendência de aumento da concentração de CO ao longo da fase de incandescência.

Com relação às fases de combustão, as maiores concentrações observadas nas fases de chama e de incandescência, respectivamente, foram de 235 ppm e 309 ppm. Estes valores estão coerentes com os observados por Soares Neto et al. (2011) e Hossain et al. (2012) que concluíram que as máximas concentrações de CO aparecem na fase de incandescência. Inclusive Hossain et al. (2012) observaram em seu estudo que a relação de CO entre as fases de chama e de incandescência resultou 1:2,6.

Assim como as emissões de CO durante as queimas de bagaço de cana-de-açúcar e de casca de café, as de casca de arroz também ultrapassaram os padrões primário e secundário de qualidade do ar estabelecidos pelo CONAMA através da Resolução Conama nº 03/90, de 35 ppm para 1 hora de amostragem e o limite de emissão, estabelecido pelo mesmo órgão através da Resolução Conama nº 382/06, de 1,7 ppm para um queimador com potência térmica entre 0,15 e 1,0 MW.

Figura 47 – (a) Concentração de CO₂ em função do tempo de queima; (b) Temperatura do gás em função do tempo – casca de arroz - teste 2

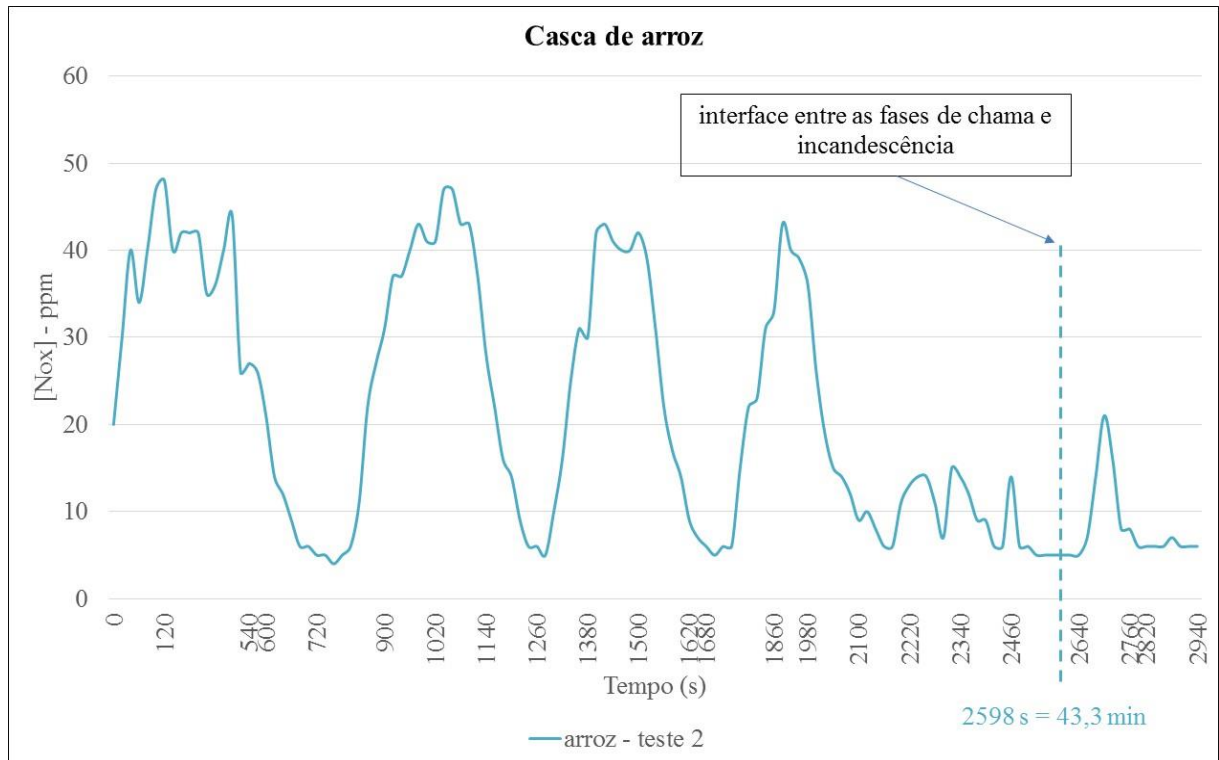


Fonte: Resultados sobre concentração de CO₂ e temperatura do gás como função do tempo de queima da casca de arroz

As máximas concentrações atingidas nas fases de chama e de incandescência foram 2,3% e 0,9%, respectivamente. E, as concentrações médias observadas nas mesmas fases foram 1,1% e 0,6%, ou seja, diferentemente das outros resíduos agrícolas estudadas neste trabalho, as concentrações de CO e de CO₂ foram inversamente proporcionais, comportamento esperado e comentado por diversos autores, entre eles Soares Neto et al. (2011), Hossain et al. (2012) e Amorim et al. (2013).

Através das Figuras 47 (a) e 47 (b), observou-se que as curvas apresentaram similaridade, ou seja, mostraram que as concentrações mais elevadas de CO₂ (picos de concentração) estão relacionadas a temperaturas mais altas do gás (picos de temperatura), e vice-versa, assim como também observado por Soares Neto et al. (2011).

Figura 48 – Concentração de NO_x em função do tempo de queima – casca de arroz – teste 2



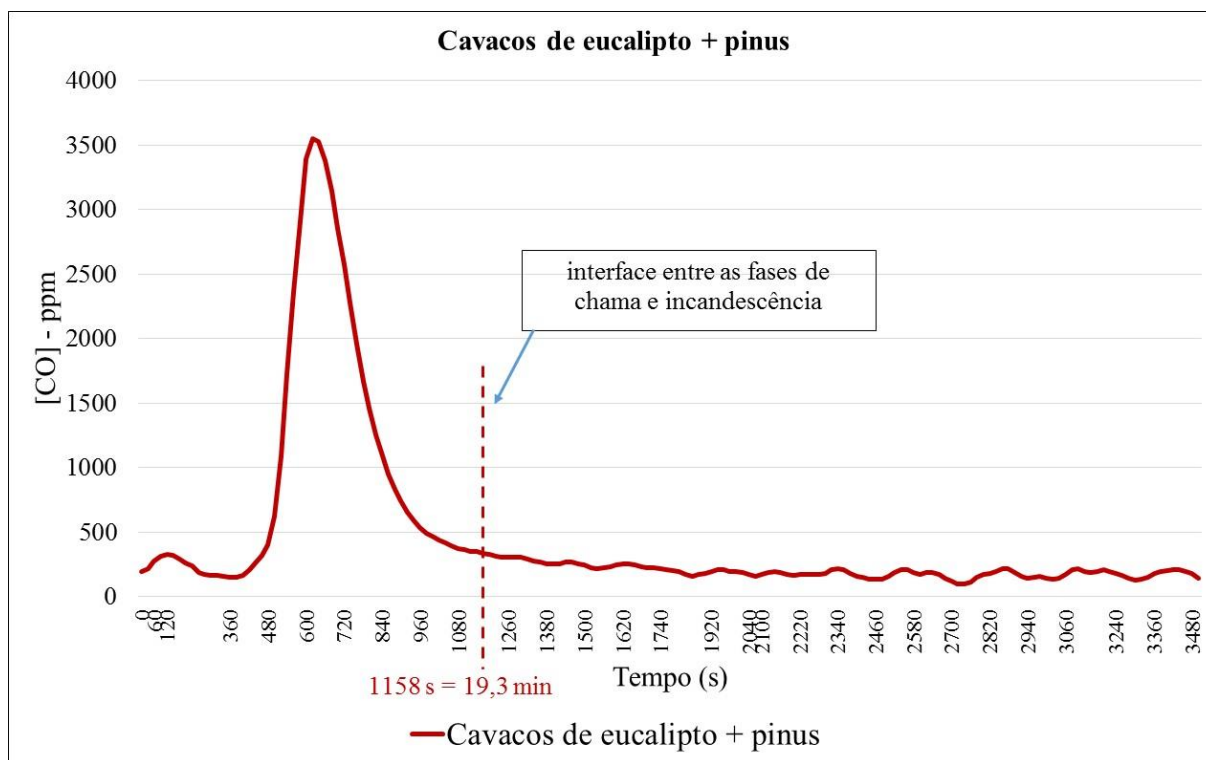
Fonte: Resultados sobre concentração de NO_x como função do tempo de queima da casca de arroz

Através da Figura 48 pode-se observar que as emissões de NO_x diminuíram da fase de chama para a fase de incandescência. Apesar de a casca de arroz não ter apresentado a maior média de emissão de NO_x , foi a biomassa agrícola que emitiu a maior concentração dentre os testes (48 ppm). Os comportamentos esperados de proporcionalidade direta entre as curvas de emissão de CO_2 e de NO_x foram observados através das Figuras 47 (a) e 48.

5.3.4. Resíduos madeireiros (cavacos de eucalipto e de pinus)

As Figuras 49 a 51 mostram as concentrações de, respectivamente, CO (ppm), CO_2 (%) e NO_x (ppm) emitidos com a queima de resíduos madeireiros. As condições da biomassa como teor de umidade (%) e poder calorífico superior (J/g) são as mesmas descritas no item 5.2.4 para o teste Cavacos de eucalipto + pinus.

Figura 49 – Concentração de CO em função do tempo de queima – cavacos de eucalipto + pinus



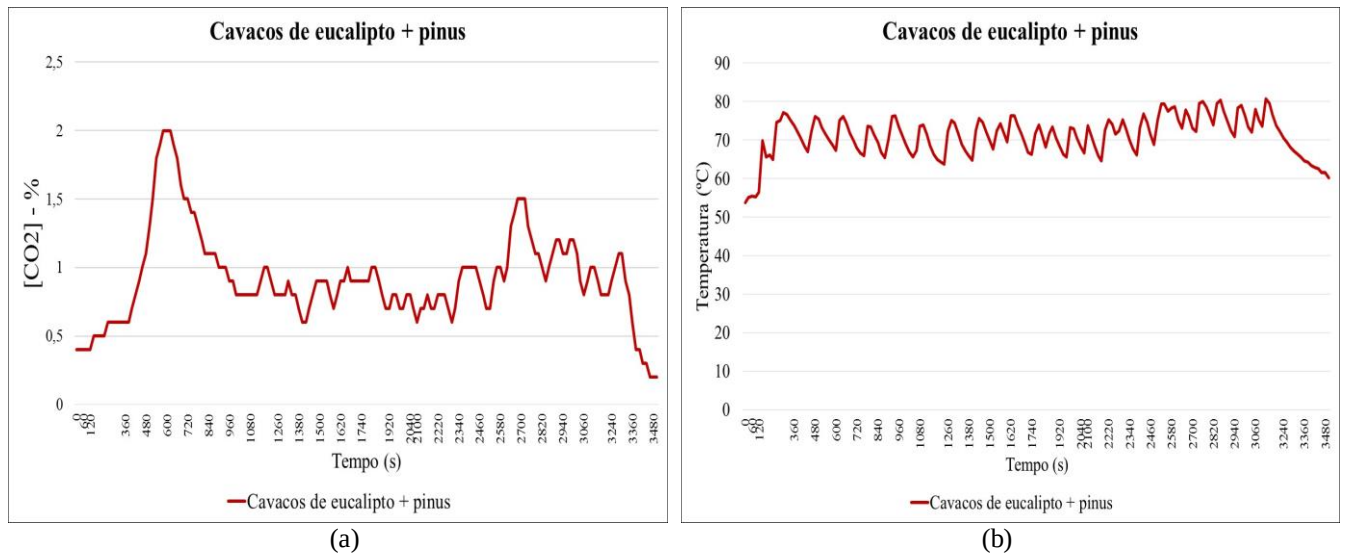
Fonte: Resultados sobre concentração de CO como função do tempo de queima de resíduos madeireiros

Através da Figura 49 observou-se um pico de concentração de CO pronunciado na fase de chama (máxima concentração de 3500 ppm).

Entre as fases de combustão, a maior emissão de CO ocorreu na fase de chama, diminuindo na fase de incandescência, comportamento contrário foi observado por Soares Neto et al. (2011), devido provavelmente a uma baixa taxa de queima e vazão constante dos gases na chaminé neste presente trabalho.

Assim como as emissões de CO durante as queimas dos resíduos agrícolas, as dos resíduos madeireiros também ultrapassaram os padrões primário e secundário de qualidade do ar estabelecidos pelo CONAMA através da Resolução Conama nº 03/90, de 35 ppm para 1 hora de amostragem e o limite de emissão, estabelecido pelo mesmo órgão através da Resolução Conama nº 382/06, de 1,7 ppm para um queimador com potência térmica entre 0,15 e 1,0 MW.

Figura 50 – (a) Concentração de CO₂ em função do tempo de queima; (b) Temperatura do gás em função do tempo – cavacos de eucalipto + pinus

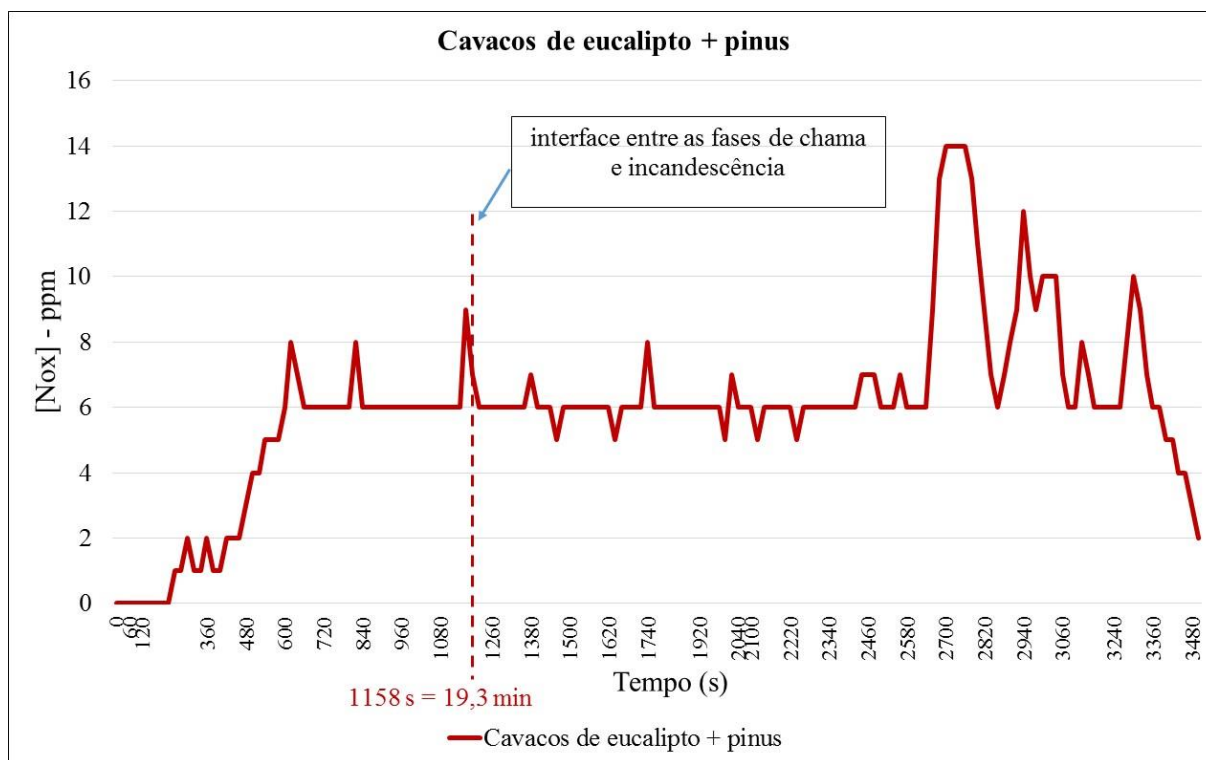


Fonte: Resultados sobre concentração de CO₂ e temperatura do gás como função do tempo de queima dos resíduos madeireiros

Quanto à emissão de CO₂ (Figura 50 (a)), observou-se um pico de concentração (2%), assim como com a emissão de CO (3547 ppm), no mesmo tempo na fase de chama (600 s). Entretanto, ao longo do período de queima as concentrações de CO₂ permaneceram praticamente constantes, assim como as de CO (Figura 49) e a curva de temperatura (Figura 50 (b)). As médias de concentração de CO₂ foram 1,0% e 0,9% para as fases de chama e de incandescência respectivamente, ou seja, seguiu o mesmo comportamento demonstrado no estudo de Soares Neto et al. (2011).

Novamente, as concentrações mais elevadas de CO₂ (picos de concentração) estão relacionadas a temperaturas mais altas do gás (picos de temperatura), e vice-versa, assim como também observado por Soares Neto et al. (2011).

Figura 51 – Concentração de NO_x em função do tempo de queima – resíduos madeireiros



Fonte: resultados sobre concentração de NO_x como função do tempo de queima de resíduos florestais

Através da Figura 51 pode-se observar que as emissões de NO_x permaneceram praticamente constantes durante todo o teste, com alterações no início (curva ascendente) e no final da queima (curva descendente). Comportamento semelhante foi observado para as emissões de CO_2 e no estudo de Soares Neto et al. (2011).

5.4. QUEIMA DE BIOMASSA – CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO E GASES

O controle do material particulado e dos gases provenientes das queimas das biomassas foi realizado conforme descrição encontrada no item 4.5.2 e os resultados obtidos encontram-se descritos neste item.

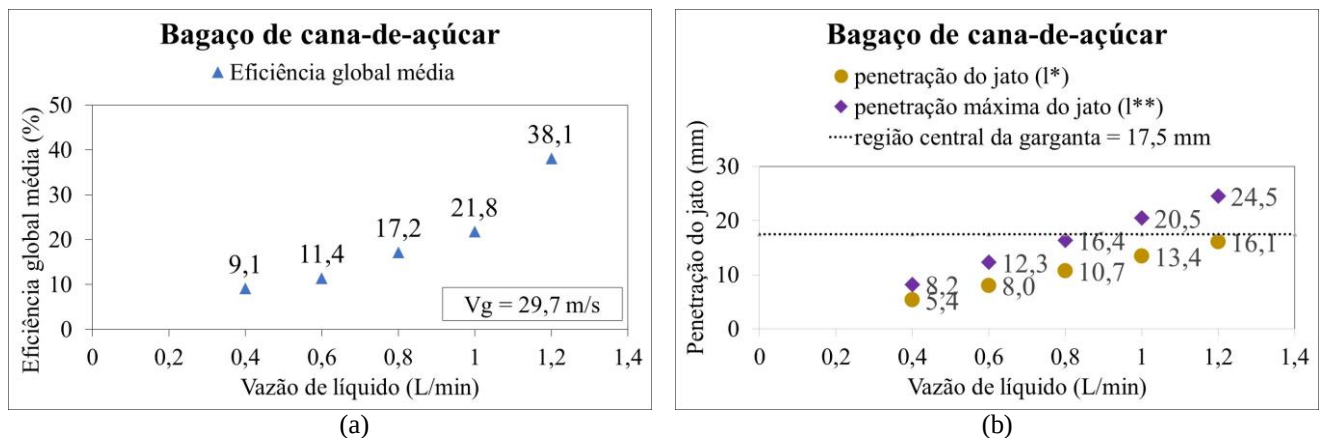
5.4.1. Bagaço de cana-de-açúcar

O teor de umidade do bagaço de cana-de-açúcar que passou pelo controle do material particulado e dos gases produzidos com sua queima foi de 11,83%.

5.4.1.1. Efeito da vazão de líquido na eficiência global média de coleta de material particulado

Os resultados de eficiência global média de coleta de particulados (%) , de penetração do jato líquido (mm) e de penetração máxima da linha central do jato líquido (mm) *versus* vazão de líquido (água) encontram-se na Figura 52.

Figura 52 – (a) Eficiência global média *versus* vazão de líquido; (b) Penetração do jato e penetração máxima da linha central do jato *versus* vazão de líquido – bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Resultados sobre eficiência global média e penetração do jato líquido em função da vazão de líquido para o controle da queima do bagaço de cana-de-açúcar

Através da Figura 52 (a) pode-se observar que a eficiência global média de coleta de partículas aumentou com o aumento da vazão de líquido, assim como observado por Costa et al. (2008) pois, quanto maior a vazão de líquido, maior é o número de gotas disponíveis para coleta e, portanto, maior a eficiência.

A maior eficiência de coleta foi de 38,1% para uma vazão de líquido de 1,2 L/min, diferentemente dos valores bem superiores (acima de 90%) atingidos por diversos autores devido provavelmente ao sistema de alimentação de gás “sujo” no Venturi. A maioria dos

trabalhos encontrados na literatura demonstram que a corrente gasosa contendo partículas é direcionada ao Venturi diretamente por sucção e neste presente trabalho a corrente gasosa foi captada diretamente do queimador, com auxílio de um soprador para que as condições experimentais estivessem as mais próximas das condições industriais. Outras explicações pertinentes quanto à diferença de eficiência atingida neste trabalho e na literatura estudada seriam as biomassas utilizadas, os métodos de análise (normalmente partículas não provenientes de queima), a velocidade do gás na garganta, o comprimento da garganta, os diâmetros de partículas analisadas e a penetração do jato líquido.

Segundo Costa (2002), as maiores eficiências são observadas para:

- maior velocidade do gás na garganta;
- maior comprimento da garganta;
- maiores partículas (diâmetros maiores);
- jato atomizado próximo ou na área central da seção transversal da garganta (região central) e com isso as gotas formadas são integralmente utilizadas na coleta de partículas;

Para todos os trabalhos estudados na literatura, os diâmetros de partículas foram superiores ($> 0,5 \mu\text{m}$) aos das partículas emitidas neste trabalho com a queima do bagaço de cana-de-açúcar (média de $0,3937 \mu\text{m}$) o que, inicialmente, demonstra as eficiências menores para este último. Para Costa et al. (2008), por exemplo, as eficiências foram maiores pois, o comprimento da garganta do Venturi era maior (90 mm) que o do presente trabalho (24 mm) e o diâmetro das partículas também era maior ($17 \mu\text{m}$) que neste trabalho.

Na Figura 52 (b), para as vazões de líquido de 1,0 e 1,2 L/min, o jato líquido alcançou a região central da garganta, ou seja, a penetração do jato ficou entre 13,4 e 20,5 mm (para 1,0 L/min) e entre 16,1 e 24,5 mm (para 1,2 L/min) sendo que a região central da garganta dista 17,5 mm das paredes da garganta. Isso indica que a nuvem de gotas encontrava-se dispersa na região central da garganta favorecendo a coleta das partículas (maior eficiência), comportamento também observado por Costa (2002). Jatos de penetração curta fazem com que a fração de líquido que escoar como filme seja grande e este é ineficiente para coleta das partículas.

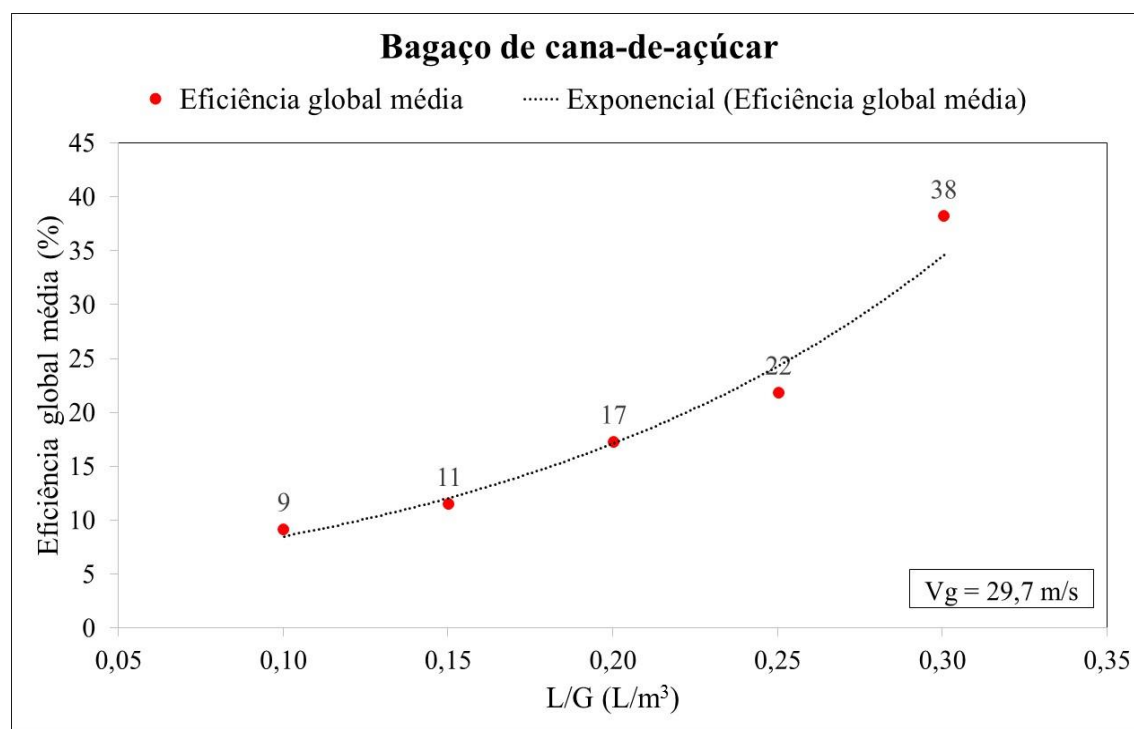
A maior variação entre a penetração máxima da linha central do jato (l^{**}) e a penetração do jato líquido (l^*) ocorreu para vazão de líquido de 1,2 L/min ($8,4 \text{ mm} = 24,5 - 16,1 \text{ mm}$), demonstrando que a “largura” do jato foi maior e portanto, a eficiência de coleta

foi maior (38,1%), ou seja, havia uma maior faixa de gotas líquidas disponíveis para captura das partículas poluentes.

5.4.1.2. Efeito da razão líquido-gás na eficiência global média de coleta de material particulado

Os resultados de eficiência global média de coleta de particulados (%) *versus* razão líquido-gás (L/m^3) encontram-se na Figura 53.

Figura 53 – Eficiência global média *versus* razão líquido-gás – bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Resultados sobre eficiência global média em função da razão líquido-gás para o controle da queima do bagaço de cana-de-açúcar.

De acordo com a Figura 53, a eficiência global de coleta aumentou com o aumento da razão líquido-gás, assim como observado por Mi e Yu (2012). O aumento na razão líquido-gás aumenta a concentração das gotas (maior número de gotas) e consequentemente a eficiência de coleta.

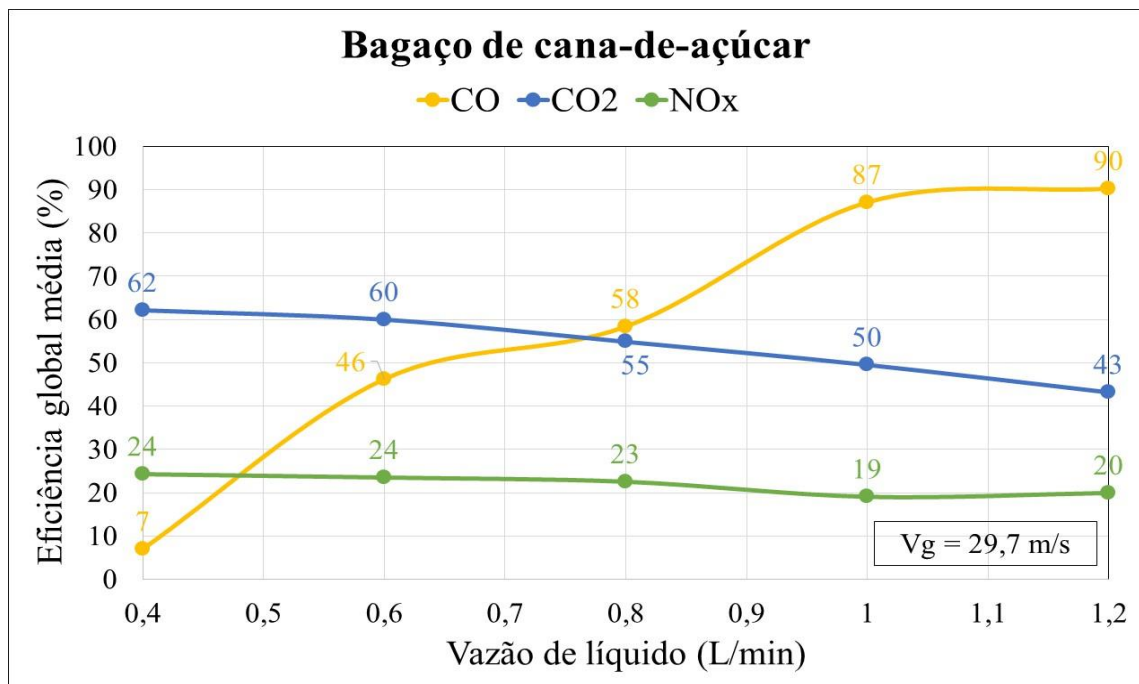
A avaliação do efeito da razão líquido-gás (L/G), de acordo com Ananthanarayanan e

Viswanathan (1998) mostra que existe um L/G ótimo no qual as gotas estão uniformemente distribuídas e a eficiência de coleta é máxima. Aumentando-se essa razão, a uma velocidade do gás na garganta constante, afeta-se a penetração do jato e a uniformidade da distribuição do fluxo de gotas alterando a eficiência de coleta. Este comportamento não foi observado para o bagaço de cana-de-açúcar pois não foram avaliadas as eficiências para vazões de líquido acima de 1,2 L/min ($L/G > 0,30 \text{ L/m}^3$), ou seja, até 1,2 L/min não houve queda de eficiência com o aumento da vazão de líquido ou com a razão L/G.

5.4.1.3. Efeito da vazão de líquido na eficiência global média de coleta de gases

Os resultados de eficiência global média de coleta dos gases CO, CO₂ e NO_x (%) *versus* vazão de líquido (L/min) encontram-se na Figura 54.

Figura 54 – Eficiência global média de coleta de gases *versus* vazão de líquido – bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Resultados sobre eficiência global média de coleta de gases em função da vazão de líquido para o controle da queima do bagaço de cana-de-açúcar

Através da Figura 54 foi possível observar que as maiores eficiências de coleta ocorreram para o CO, chegando ao máximo de 90% para a vazão de líquido (água) de 1,2

L/min.

Para Pourmohammadbagher et al. (2011), a eficiência de coleta com água para o CO₂ atingiu o máximo (33%) para as vazões de líquido de 4 e 6,5 L/min ($L/G = 0,45$ e $1,21$, respectivamente) e vazão de gás de 3,3 m³/min, com tendência de queda para menores razões líquido-gás. Neste presente trabalho foram utilizadas vazões de líquido menores (0,4 até 1,2 L/min) e vazão de gás de 4 m³/min e a máxima eficiência encontrada foi de 62% para uma vazão de líquido de 0,4 L/min ($L/G = 0,1$), com a mesma tendência de queda para maiores vazões de líquido (ou razão líquido-gás). Além disso, o maior valor de vazão de gás neste trabalho denota maiores eficiências de coleta para todas as vazões de líquido.

Os NO_x apresentaram as menores eficiências o que, segundo Pourmohammadbagher et al. (2011), seria devido ao NO ser relativamente insolúvel em água, ou seja, durante a queima do bagaço de cana-de-açúcar a produção do NO dentre os NO_x foi pronunciada (acima de 90% do produzido de NO_x foi NO).

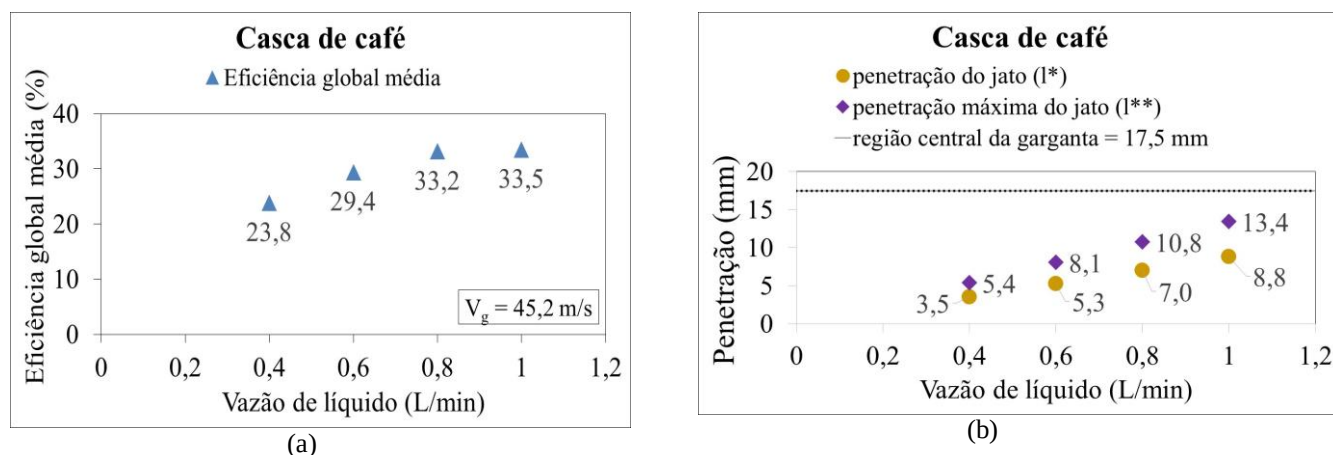
5.4.2. Casca de café

O teor de umidade da casca de café que passou pelo controle do material particulado e dos gases produzidos com sua queima foi de 14,51%.

5.4.2.1. Efeito da vazão de líquido na eficiência global média de coleta de material particulado

Os resultados de eficiência global média de coleta de particulados (%), de penetração do jato líquido (mm) e de penetração máxima da linha central do jato líquido (mm) *versus* vazão de líquido (água) encontram-se na Figura 55.

Figura 55 – (a) Eficiência global média *versus* vazão de líquido; (b) Penetração do jato e penetração máxima da linha central do jato *versus* vazão de líquido – casca de café



Fonte: Resultados sobre eficiência global média, penetração do jato e penetração máxima da linha central do jato em função da vazão de líquido para o controle da queima da casca de café.

Através da Figura 55 (a) pode-se observar que a eficiência global média de coleta de partículas aumentou com o aumento da vazão de líquido, assim como observado para o bagaço de cana-de-açúcar e por Costa et al. (2008).

A maior eficiência de coleta foi de 33,5% para uma vazão de líquido de 1,0 L/min e penetração máxima do jato líquido de 13,4 mm. Na mesma vazão de líquido de 1,0 L/min, a eficiência e a penetração máxima do jato líquido para o bagaço de cana-de-açúcar foram, respectivamente, 21,8% e 20,5 mm. Esta menor eficiência atingida pelo bagaço de cana-de-açúcar foi devida à velocidade do gás na garganta de 29,7 m/s.

A pequena diferença entre as eficiências a 0,8 L/min (33,2%) e 1,0 L/min (33,5%) é devida, também, à velocidade do gás. Uma maior velocidade do gás (45,2 m/s) no interior da garganta causa o “achatamento” do jato líquido, produzindo uma grande fração de filme líquido na parede inferior da garganta diminuindo a eficiência.

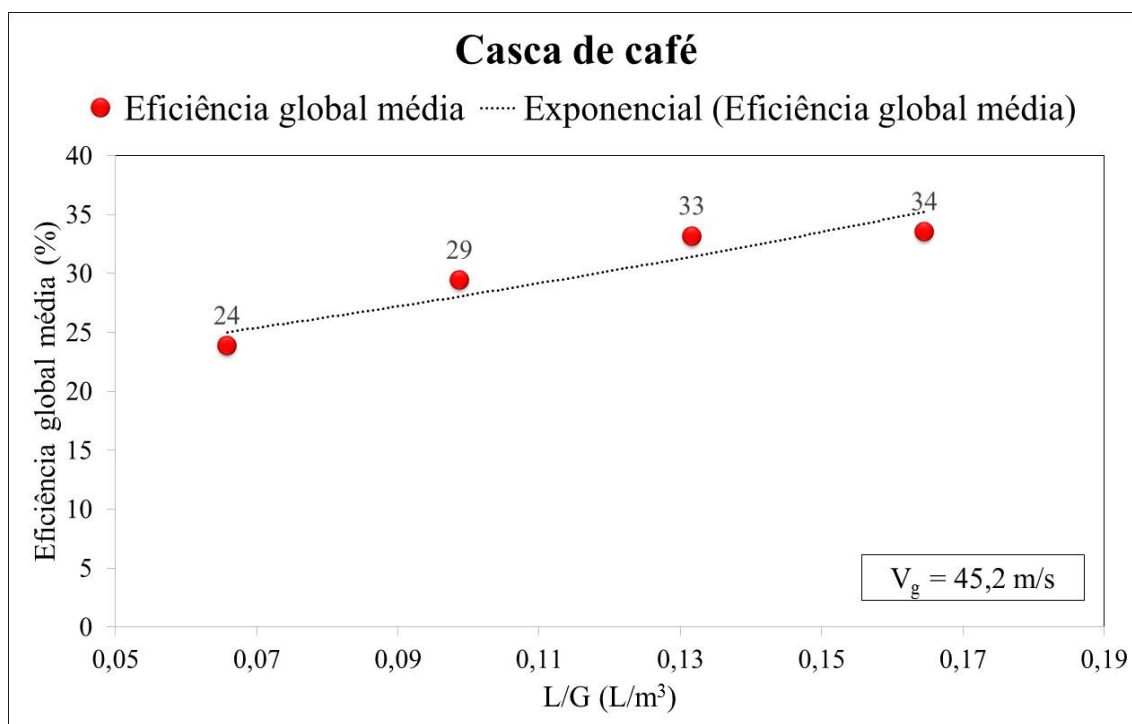
A penetração máxima do jato líquido para a vazão de líquido (1,0 L/min) atingida para a casca de café foi inferior à observada para o bagaço de cana-de-açúcar

Assim como para o bagaço de cana-de-açúcar, a maior variação entre a penetração máxima da linha central do jato (I**) e a penetração do jato líquido (I*) ocorreu para a maior vazão de líquido demonstrando que a “largura” do jato foi maior e portanto, a eficiência de coleta foi maior, ou seja, havia uma maior faixa de gotas líquidas disponíveis para captura das partículas poluentes.

5.4.2.2. Efeito da razão líquido-gás na eficiência global média de coleta de material particulado

Os resultados de eficiência global média de coleta de particulados (%) *versus* razão líquido-gás (L/m^3) encontram-se na Figura 56.

Figura 56 – Eficiência global média *versus* razão líquido-gás – casca de café



Fonte: Resultados sobre eficiência global média em função da razão líquido-gás para o controle da queima da casca de café.

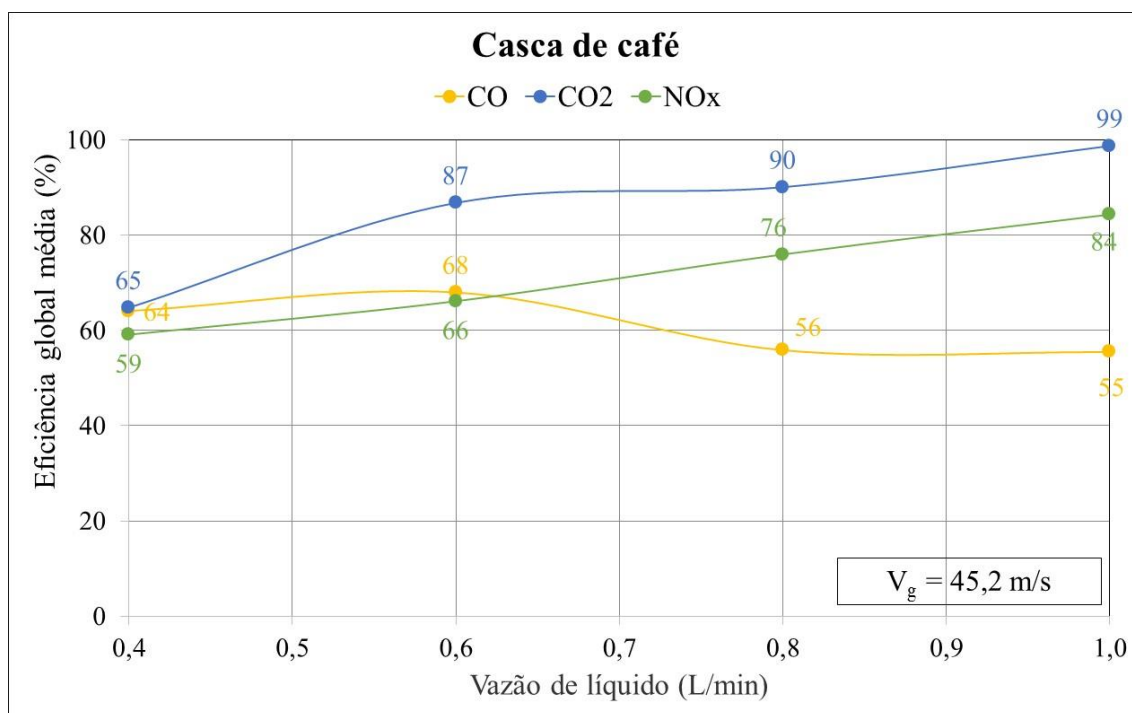
De acordo com a Figura 56, a eficiência global de coleta aumentou com o aumento da razão líquido-gás, assim como observado para o bagaço de cana-de-açúcar e por Mi e Yu (2012). O aumento na razão líquido-gás aumenta a concentração das gotas e consequentemente a eficiência de coleta, como já mencionado no item 5.4.1.2.

Assim como para o bagaço de cana-de-açúcar, não foi possível observar um L/G ótimo pois não houve diminuição da eficiência com o aumento da razão L/G.

5.4.2.3. Efeito da vazão de líquido na eficiência global média de coleta de gases

Os resultados de eficiência global média de coleta dos gases CO, CO₂ e NO_x (%) *versus* vazão de líquido (L/min) encontram-se na Figura 57.

Figura 57 – Eficiência global média de coleta de gases *versus* vazão de líquido – casca de café



Fonte: Resultados sobre eficiência global média de coleta de gases em função da vazão de líquido para o controle da queima da casca de café

Através da Figura 57 foi possível observar que as maiores eficiências de coleta ocorreram para o CO₂, chegando ao máximo de 99% para a vazão de líquido (água) de 1,0 L/min.

Para Pourmohammadbagher et al. (2011), a eficiência de coleta com água para o CO₂ atingiu o máximo (33%) para as vazões de líquido de 4 e 6,5 L/min (L/G = 0,45 e 1,21, respectivamente) e vazão de gás de 3,3 m³/min, com tendência de queda para menores razões líquido-gás. Neste presente trabalho foram utilizadas vazões de líquido menores (0,4 até 1,2 L/min) e vazão de gás de 6,07 m³/min e a máxima eficiência encontrada foi de 99

% para uma vazão de líquido de 1,0 L/min (L/G = 0,16), entretanto a tendência de queda para maiores vazões de líquido (ou razão líquido-gás) não foi observada,

provavelmente devido a maior vazão (velocidade) do gás.

Os NO_x apresentaram maiores eficiências que as observadas para o controle do bagaço de cana-de-açúcar, provavelmente devido à maior velocidade do gás na garganta do Venturi.

A eficiência máxima de coleta de CO observada para a casca de café foi de 64% (vazão de líquido de 0,4 L/min) e diminuiu sucessivamente para as vazões de 0,8 L/min (56%) e 1,0 L/min (55%), diferente do aumento sucessivo com o aumento da vazão de líquido observado para o bagaço de cana-de-açúcar. As possíveis razões para estes comportamentos seriam a maior temperatura e a maior concentração dos gases emitidos com a queima da casca de café que diminuem a eficiência de coleta.

5.4.3. Casca de arroz

O teor de umidade da casca de arroz que passou pelo controle do material particulado e dos gases produzidos com sua queima foi de 9,14%.

Os resultados de eficiência global média de coleta de material particulado, penetração do jato líquido dentro da garganta (penetração do jato e penetração máxima da linha central do jato) e razão líquido-gás encontram-se na Tabela 37. Os resultados de eficiência global média de coleta dos gases encontram-se na Figura 58.

Tabela 37 – Eficiência global média de coleta de material particulado, penetração do jato líquido e razão líquido-gás – casca de arroz

Eficiência global média de coleta de material particulado (%)	Penetração do jato (I*) (mm)	Penetração máxima da linha central do jato (I**) (mm)	L/G (L/m³)
86,3	3,7	5,6	0,068

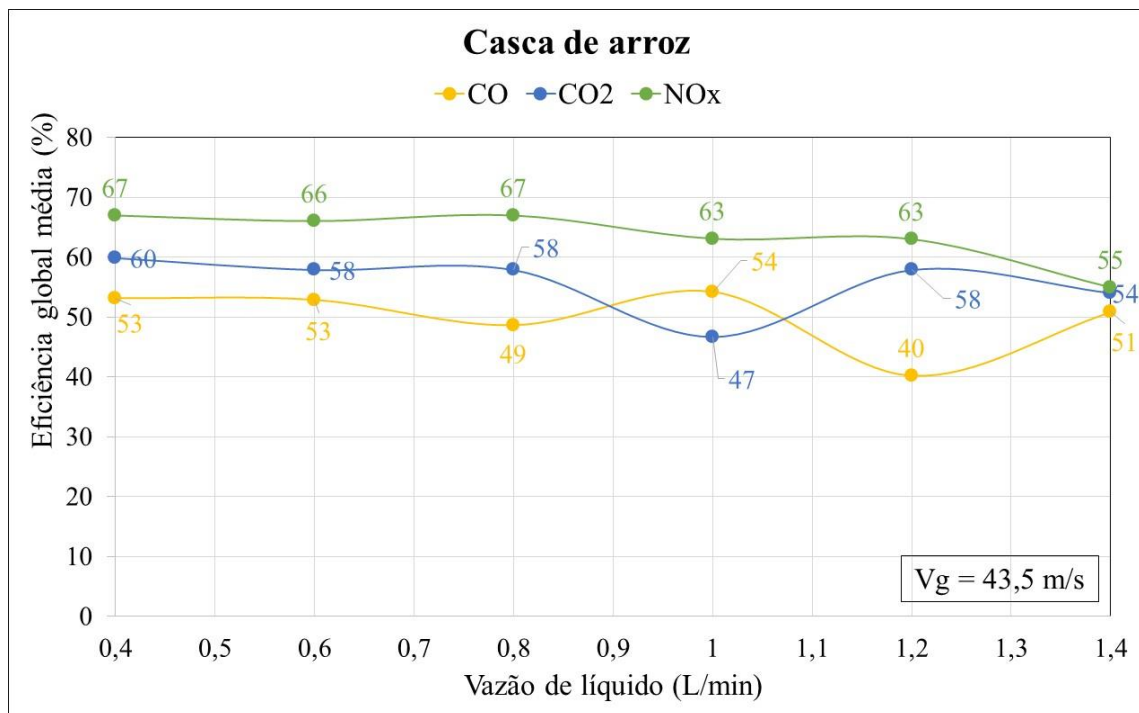
Fonte: Resultados sobre eficiência global média de coleta de material particulado, penetração do jato, penetração máxima da linha central do jato e razão líquido-gás em função da vazão de líquido de 0,4 L/min para o controle da queima da casca de arroz.

Através da Tabela 37 pode-se observar que a eficiência global média de coleta de partículas menores que 2,5 μm para a vazão de líquido de 0,4 L/min foi bem superior (86,3%) à observada para a casca de café (23,8%) na mesma vazão de líquido e velocidade de gás próxima (casca de café = 45,2 m/s e casca de arroz = 43,5 m/s) o que, segundo Costa (2002), é devido ao maior diâmetro médio de partículas emitidas com a queima da casca de arroz (D_p

médio = 0,2984 μm) em comparação com a casca de café (D_p médio = 0,0961 μm), mesmo a penetração do jato líquido não ter sido eficiente (muito distante da região central da garganta).

A eficiência global de coleta foi bem maior (86% - razão líquido-gás de 0,068 L/m^3) que a observada pela casca de café (24%) numa razão líquido-gás próxima ($\text{L}/\text{G} = 0,066 \text{ L}/\text{m}^3$) devido também ao maior diâmetro médio de partículas apresentado pela casca de arroz, ou seja, as gotas líquidas (água) conseguem capturar mais facilmente as partículas maiores.

Figura 58 – Eficiência global média de coleta de gases *versus* vazão de líquido – casca de arroz



Fonte: Resultados sobre eficiência global média de coleta de gases em função da vazão de líquido para o controle da queima da casca de arroz.

Através da Figura 58 foi possível observar que a máxima eficiência de coleta dos NO_x para a casca de arroz foi de 67% para a vazão de líquido de 0,8 L/min. Para o bagaço de cana-de-açúcar e para a casca de café, na mesma vazão de líquido, foi de, respectivamente, 23% e 76%, devido às diferentes vazões de gás (bagaço de cana-de-açúcar = 29,7 m/s; casca de arroz = 43,5 m/s; casca de arroz = 45,2 m/s). Quanto maior a velocidade do gás, maior a eficiência de coleta.

A eficiência máxima de coleta de CO₂ foi atingida para a menor vazão de líquido (0,4 L/min) com tendência de queda à medida que a vazão de líquido foi aumentada, assim como também observado para o bagaço de cana-de-açúcar e para Pourmohammadbagher et al.

(2011).

As eficiências de coleta de CO₂ foram superiores às de CO para todas as vazões de líquido, com exceção para 1,0 L/min. Para essa vazão a concentração de CO₂ medida foi a maior (0,25%) e, portanto, apresentou a menor eficiência (47%), pois quanto maior a concentração do gás menor é a eficiência de coleta.

5.4.4. Cavaco de eucalipto

O teor de umidade do cavaco de eucalipto que passou pelo controle do material particulado e dos gases produzidos com sua queima foi de 11,12%.

Os resultados de eficiência global média de coleta de material particulado, penetração do jato líquido dentro da garganta (penetração do jato e penetração máxima da linha central do jato) e razão líquido-gás encontram-se na Tabela 38. Os resultados de eficiência global média de coleta dos gases encontram-se na Figura 59.

Tabela 38 – Eficiência global média de coleta de material particulado, penetração do jato líquido e razão líquido-gás – cavaco de eucalipto

Eficiência global média de coleta de material particulado (%)	Penetração do jato (I*) (mm)	Penetração máxima da linha central do jato (I**) (mm)	L/G (L/m³)
53,9	11,1	17,0	0,1563

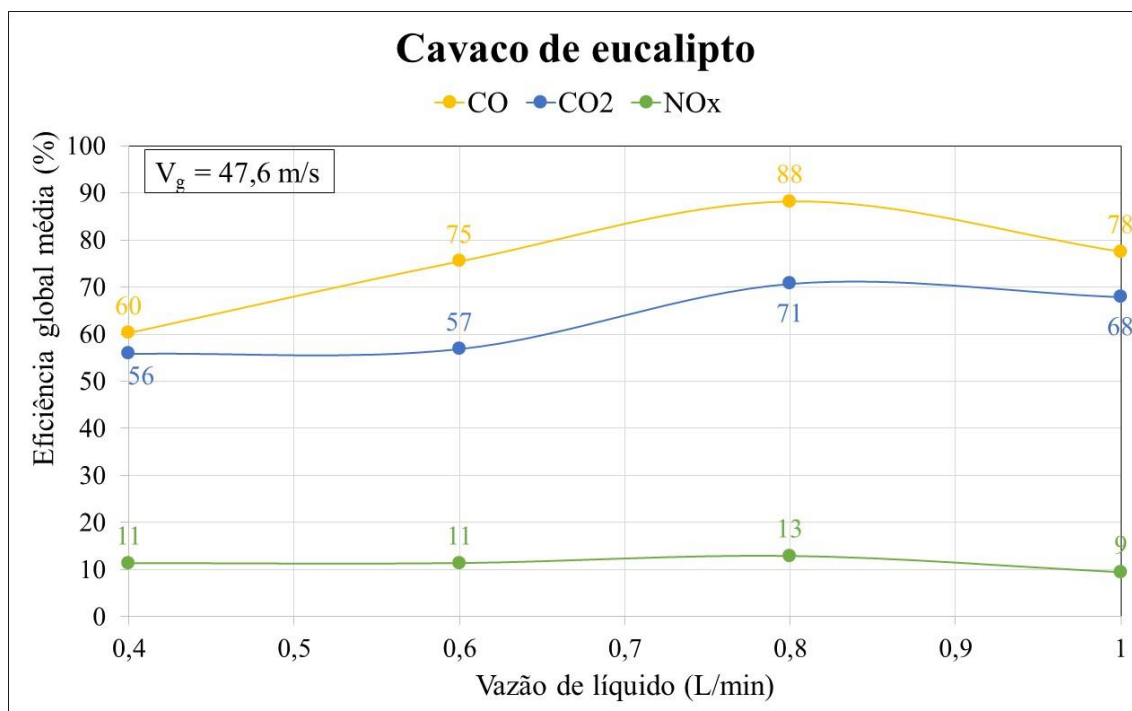
Fonte: Resultados sobre eficiência global média de coleta de material particulado, penetração do jato, penetração máxima da linha central do jato e razão líquido-gás em função da vazão de líquido de 0,4 L/min para o controle da queima do cavaco de eucalipto.

Através da Tabela 38 pode-se observar que a eficiência global média de coleta de partículas para a vazão de líquido de 1,0 L/min foi superior (53,9%) ao valor observado para a casca de café (33,5%) na mesma vazão de líquido e velocidade de gás próxima (casca de café = 45,2 m/s e cavaco de eucalipto = 47,6 m/s) o que, segundo Costa (2002), é devido ao diâmetro médio de partículas emitidas nas queimas. Para o cavaco de eucalipto o diâmetro médio de partículas foi de 0,4175 µm, enquanto que para a casca de café foi de 0,0961 µm. Portanto, o cavaco de eucalipto apresentou o maior diâmetro de partículas e, consequentemente, a maior eficiência de coleta, assim como ocorreu para a casca de arroz.

A eficiência global de coleta foi maior (53,9%) que a observada pela casca de café

(33,5%) numa razão líquido-gás próxima ($L/G = 0,1563 \text{ L/m}^3$ para o cavaco de eucalipto e $L/G = 0,165 \text{ L/m}^3$ para a casca de café) devido também ao maior diâmetro médio de partículas apresentado pelo cavaco de eucalipto, ou seja, as gotas líquidas (água) conseguem capturar mais facilmente as partículas maiores.

Figura 59 – Eficiência global média de coleta de gases *versus* vazão de líquido – cavaco de eucalipto



Fonte: Resultados sobre eficiência global média de coleta de gases em função da vazão de líquido para o controle da queima do cavaco de eucalipto.

Através da Figura 59 foi possível observar que as maiores eficiências de coleta ocorreram para o CO, assim como para o bagaço de cana-de-açúcar, chegando ao máximo de 88% para a vazão de líquido (água) de 0,8 L/min e diminuindo (78%) para 1,0 L/min, assim como observado para o bagaço de cana-de-açúcar.

As eficiências de coleta de CO₂ para o cavaco de eucalipto foram maiores que as observadas por Pourmohammadbagher et al. (2011) para menores vazões de líquido, assim como ocorreu com as biomassas anteriores.

Os NO_x apresentaram as menores eficiências demonstrando que houve maior produção de NO e este é praticamente insolúvel em água.

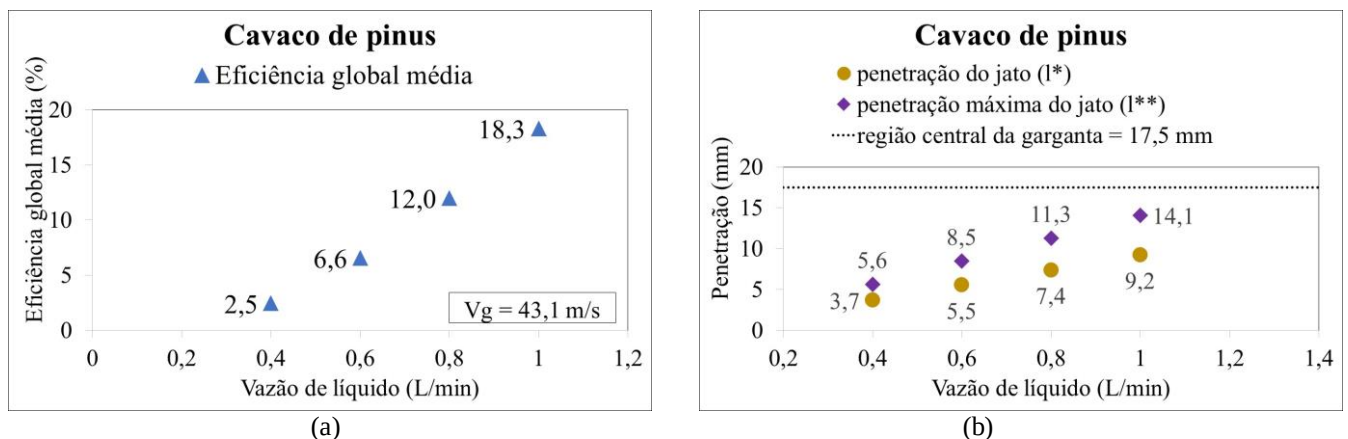
5.4.5. Cavaco de pinus

O teor de umidade do cavaco de pinus que passou pelo controle do material particulado e dos gases produzidos com sua queima foi de 9,76%.

5.4.5.1. Efeito da vazão de líquido na eficiência global média de coleta de material particulado

Os resultados de eficiência global média de coleta de particulados (%), de penetração do jato líquido (mm) e de penetração máxima da linha central do jato líquido (mm) *versus* vazão de líquido (água) encontram-se na Figura 60.

Figura 60 – (a) Eficiência global média *versus* vazão de líquido; (b) Penetração do jato líquido e penetração máxima da linha central do jato *versus* vazão de líquido – cavaco de pinus



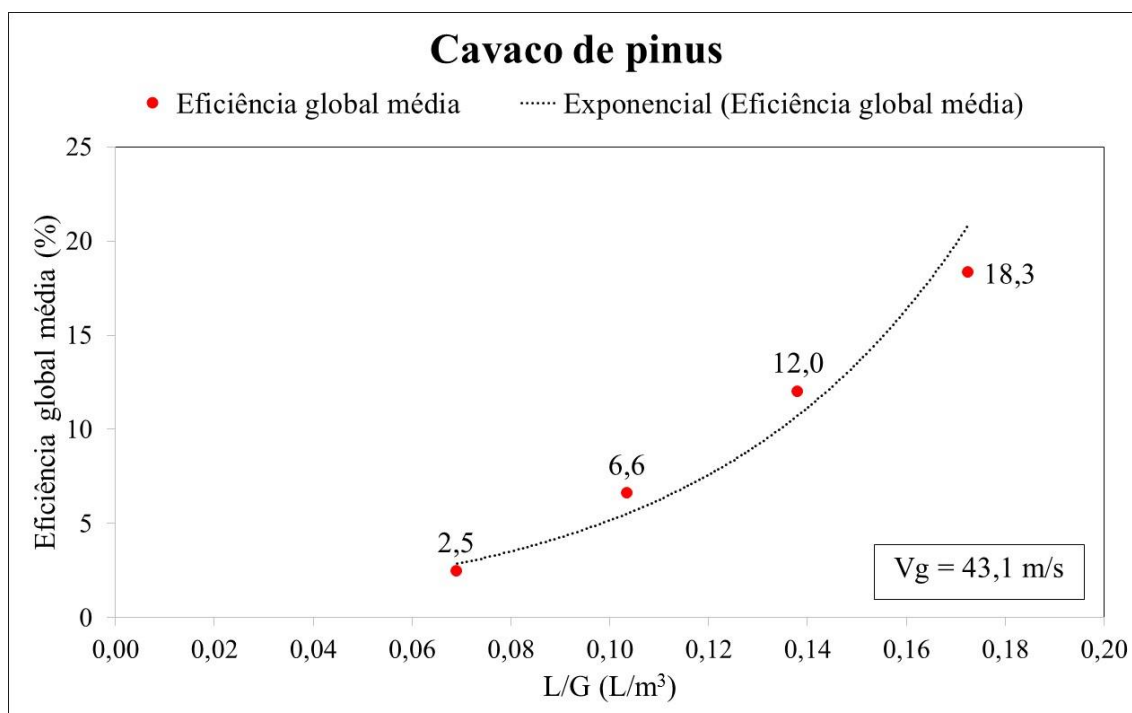
Fonte: Resultados sobre eficiência global média, penetração do jato e penetração máxima da linha central do jato em função da vazão de líquido para o controle da queima do cavaco de pinus.

Através da Figura 60 (a) pode-se observar que a máxima eficiência global média de coleta de partículas (18,3%) ocorreu para a vazão de líquido de 1,0 L/min. Comparando esta eficiência com a obtida para o cavaco de eucalipto (53,9%) para a mesma vazão de líquido, conclui-se que a diferença deve-se aos diâmetros de partículas emitidas com as queimas desses resíduos de 0,3849 μm e 0,4175 μm , respectivamente, para o cavaco de pinus e de *Eucalyptus*. Conforme já mencionado anteriormente, quanto maior o diâmetro de partícula maior é a eficiência de coleta.

5.4.5.2. Efeito da razão líquido-gás na eficiência global média de coleta de material particulado

Os resultados de eficiência global média de coleta de particulados (%) *versus* razão líquido-gás (L/m^3) encontram-se na Figura 61.

Figura 61 – Eficiência global média *versus* razão líquido-gás – cavaco de pinus

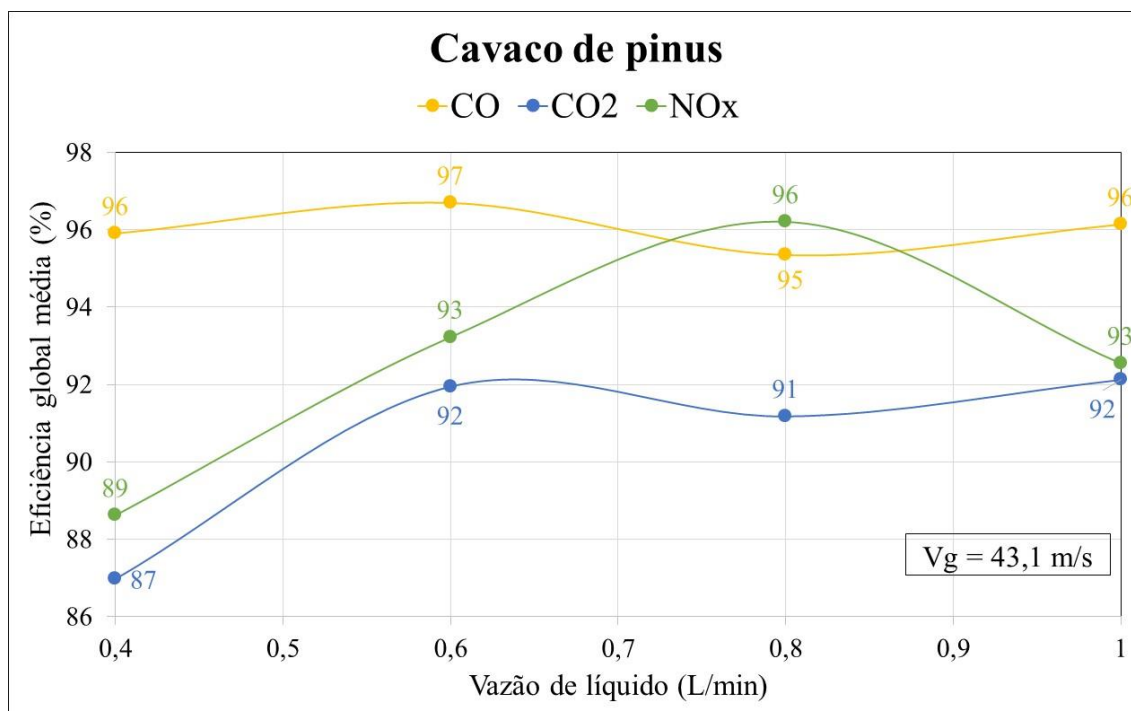


Fonte: Resultados sobre eficiência global média em função da razão líquido-gás para o controle da queima do cavaco de pinus.

De acordo com a Figura 61, a eficiência global de coleta aumentou com o aumento da razão líquido-gás, assim como observado por Mi e Yu (2012) e para o bagaço de cana-de-açúcar e para a casca de café. O aumento na razão líquido-gás aumenta a concentração das gotas (maior número de gotas) e consequentemente a eficiência de coleta.

5.4.5.3. Efeito da vazão de líquido na eficiência global média de coleta de gases

Os resultados de eficiência global média de coleta dos gases CO, CO₂ e NO_x (%) *versus* vazão de líquido (L/min) encontram-se na Figura 62.

Figura 62 – Eficiência global média de coleta de gases *versus* vazão de líquido – cavaco de pinus

Fonte: Resultados sobre eficiência global média de coleta de gases em função da vazão de líquido para o controle da queima do cavaco de pinus.

Através da Figura 62 foi possível observar que a máxima eficiência de coleta dos NO_x para o cavaco de pinus foi de 96% para a vazão de líquido de 0,8 L/min. Para a mesma vazão de líquido a casca de café apresentou eficiência de 76%. Comportamento que pode ser explicado pela maior concentração de NO_x (19 ppm) emitida com a queima da casca de café em comparação com o cavaco de pinus (12,3 ppm). Para maiores concentrações há menores eficiências de coleta.

Ainda, de acordo com Costa (2002), um aumento da velocidade do gás causa uma diminuição do tamanho das gotas de líquido e, com isso, diminui a eficiência de coleta, pois gotas maiores são mais lentas e eficientes. No caso, a velocidade do gás na queima da casca de café foi de 45,2 m/s e na queima do cavaco de pinus foi de 43,1 m/s, ou seja, as gotas de líquido para a casca de café foram menores e, conseqüentemente, a eficiência de coleta foi menor.

As curvas de eficiência para o CO e para o CO₂ foram semelhantes, atingindo um máximo de eficiência (97% e 92%, respectivamente) para 0,6 L/min. Para maiores vazões de líquido houve diminuição das eficiências, como observado para todas as biomassas, com exceção para o bagaço de cana-de-açúcar.

6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, nas condições experimentais utilizadas, pode-se concluir que:

1) Emissão de material particulado e gases (Monitoramento)

- O bagaço de cana-de-açúcar, a casca de café e os cavacos de eucalipto e de pinus apresentaram as maiores concentrações de particulados para os menores diâmetros de partícula. Para a casca de arroz isso não foi observado devido à natureza das partículas e à volatilidade;
- Todas as biomassas emitiram altas concentrações de partículas ultrafinas (menores que $0,1 \mu\text{m}$), as mais prejudiciais à saúde humana;
- Todas as biomassas apresentaram valores de concentração de particulados superiores ao estabelecido como padrão de qualidade do ar ambiente pela OMS para partículas inaláveis finas ($\text{PM}_{2,5}$) de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para uma amostragem de 24 horas, sendo necessário seu controle através de lavagem (lavador Venturi) ou outro equipamento de coleta adequado;
- Os limites de emissão estabelecidos pelo CONAMA (Resolução nº 382/06) para fontes fixas de queima para geração de calor não foram ultrapassados nas queimas, o que demonstra a necessidade de verificação e atualização de tais limites pelos órgãos ambientais;
- Dentre as biomassas isoladas (não misturadas) e as com teor de umidade de no máximo 20-30%, a casca de café apresentou a maior concentração de particulados emitidos com sua queima e o bagaço de cana-de-açúcar a menor;
- As emissões de CO foram mais pronunciadas na fase de incandescência para todas as biomassas, com exceção para os cavacos de eucalipto + pinus;
- As curvas de emissão de CO_2 apresentaram similaridade com as de temperatura dos gases para todas as biomassas;
- As emissões de NO_x para o bagaço de cana-de-açúcar e para os cavacos de eucalipto + pinus permaneceram praticamente constantes durante as queimas. Para as demais biomassas as concentrações de NO_x diminuíram na fase de incandescência;
- A casca de café apresentou as maiores concentrações de CO e o bagaço de cana-de-

açúcar as menores;

- Dentre as biomassas isoladas (não misturadas) e as com teor de umidade de no máximo 20-30%, a casca de arroz apresentou a maior concentração de NO_x emitidos com sua queima e o bagaço de cana-de-açúcar a menor;
- Todas as biomassas ultrapassaram os padrões primário e secundário de qualidade do ar estabelecidos pelo CONAMA através da Resolução Conama nº 03/90, de 35 ppm para 1 hora de amostragem sendo necessário seu controle através de lavagem (lavador Venturi) ou outro equipamento de coleta adequado;
- Os limites de emissão estabelecidos pelo CONAMA (Resolução nº 382/06) para fontes fixas de queima para geração de calor foram ultrapassados em todas as queimas.

2) Controle do material particulado e dos gases

- As eficiências globais máximas de coleta de material particulado atingidas pelas biomassas foram: 38,1%, 33,5%, 86,3%, 53,9% e 18,3%, respectivamente, para o bagaço de cana-de-açúcar, casca de café, casca de arroz, cavacos de eucalipto e de pinus. Com exceção da casca de arroz (86,3%), as eficiências de coleta foram pequenas se comparadas às alcançadas por outros autores (trabalharam com partículas mais grossas), o que denota a dificuldade em se coletar partículas finas ($d_p < 2,5 \mu\text{m}$);
- As eficiências globais máximas de coleta de CO atingidas pelas biomassas foram: 90%, 68%, 54%, 88%, 97%, respectivamente, para o bagaço de cana-de-açúcar, casca de café, casca de arroz, cavacos de eucalipto e de pinus, demonstrando que as emissões foram satisfatoriamente reduzidas ($> 50\%$) para todas as biomassas, sendo que tanto o bagaço de cana-de-açúcar quanto o cavaco de pinus apresentaram eficiências iguais ou superiores a 90%;
- As eficiências globais máximas de coleta de CO_2 atingidas pelas biomassas foram: 62%, 99%, 60%, 71%, 92%, respectivamente, para o bagaço de cana-de-açúcar, casca de café, casca de arroz, cavacos de eucalipto e de pinus, demonstrando que o controle das emissões de todas as biomassas atingiu eficiências superiores a 50%, sendo que a casca de café obteve um máximo de eficiência de 99%;
- As eficiências globais máximas de coleta de NO_x atingidas pelas biomassas foram: 24%, 84%, 67%, 13%, 96%, respectivamente, para o bagaço de cana-de-açúcar,

casca de café, casca de arroz, cavacos de eucalipto e de pinus, demonstrando que para o bagaço de cana-de-açúcar e para o cavaco de eucalipto a coleta de NO_x pelo lavador Venturi não foi eficiente, sendo sugerido o uso de outro líquido de lavagem;

Em resumo, a queima do bagaço de cana-de-açúcar apresentou as menores emissões de material particulado e de gases poluentes em condições adequadas de umidade, sendo promissora a sua utilização como fonte de energia nas indústrias, entretanto faz-se necessário um controle dessas emissões para adequação aos padrões ambientais estabelecidos.

A eficiência de coleta do material particulado pelo lavador Venturi para esta biomassa não foi elevada, sugerindo que a velocidade do gás ou a vazão de líquido sejam elevadas nos próximos testes. A eficiência de coleta do CO atingiu um alto valor, entretanto para os demais gases estudados o mesmo não foi observado, sugerindo novos testes com outros líquidos de lavagem mais eficientes.

A escolha pelo lavador Venturi como equipamento de controle neste trabalho deveu-se à sua utilização tanto para material particulado quanto para gases poluentes, o que não é observado para os demais equipamentos de controle existentes.

Especificamente com relação ao material particulado, constatou-se a dificuldade de coleta de partículas finas e ultrafinas, o que demonstra a necessidade de novos estudos envolvendo os parâmetros utilizados nos testes de controle (líquido de lavagem, vazão de líquido, velocidade do gás) com intuito de melhorar a penetração do jato líquido dentro da garganta do lavador Venturi.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, G. C.; MELO, G. C. B. **Metodologia para definição de uma rede de monitoramento contínuo de efluentes atmosféricos em uma indústria siderúrgica**. Foz do Iguaçu: Abes, 1997. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes97/inside.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2013.

ACREBIOCLIMA, Grupo de Estudos e Serviços Ambientais -. Nefelometria. Disponível em: <<http://www.acrebioclima.pro.br/Areas/AND.htm>>. Acesso em: 07 jul. 2011.

AFFONSO, C. O. **Redes neurais aplicadas em processos de usinagem da madeira**. 2013. 102 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2013.

AGUIAR, A. V.; SOUSA, V. A.; SHIMIZU, J. Y. Cultivo de Pinus. **Sistemas de Produção: Embrapa Florestas** - 2ª edição, v. 5, p.15-25, maio 2011. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Pinus/CultivodoPinus_2ed/index.htm>. Acesso em: 14 mar. 2013.

ALI, M. et al. Dust particle removal efficiency of a venturi scrubber. **Annals of Nuclear Energy**, v. 54, p. 178-183, 2013.

ALI, M. et al. CFD simulation of dust particle removal efficiency of a venturi scrubber in CFX. **Nuclear Engineering and Design**, v. 256, p. 169-177, 2013.

ALMEIDA FILHO, F. **Monitoramento e controle de emissão de material particulado em**

uma fonte estacionária. 2008. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

ALVES, N. O. et al. Genotoxicity and composition of particulate matter from biomass burning in the eastern Brazilian Amazon region. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 74, p.1427-1433, 2011.

AMORIM, E. B. et al. Influence of specimen size, tray inclination and air flow rate on the emission of gases from biomass combustion. **Atmospheric Environment**, v. 74, p.52-59, 2013.

ANANTHANARAYANAN, N. V.; VISWANATHAN, S. Estimating maximum removal efficiency in Venturi scrubbers. *AIChE Journal*, v. 44, p.2549-2560, 1998.

ARAÚJO, D. S. S. **Co-Combustão de Biomassa e Carvão em Leito Fluidizado: Impacto nas emissões atmosféricas de NO_x, SO₂, CO, dioxinas e furanos e material particulado.** 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nova Lisboa, Lisboa, 2008.

ARBEX, M. A. et al. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, São Paulo, p. 158-175, 2004.

BARKER, T. et al. **Mudança do clima: Mitigação.** Reino Unido: Editora da Universidade de Cambridge, 2007.

BEENACKERS, A. A. C. M.; BRIDGWATER, A. V. Gasification and pyrolysis of biomass in Europe. In: *Pyrolysis and gasification*. Londres: Elsevier Applied Sciences, 1989, vol 1, p.

129 – 155.

BRAND, M. A. **Fontes de biomassa para a geração de energia**: notas de aula. Uniplac e Udesc, 2008. Disponível em: <<http://www.solumad.com.br/artigos/201011171818441.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2013.

BRÁS, A. M. et al. Biomassa e produção de energia. **O Minho, A Terra e O Homem**, Braga, Portugal, v. 51, p.23-30, dez. 2006.

BRINK, J. A.; CONTANT, C. E. Experiments on an industrial venture scrubber. **Ind. Eng. Chem**, v. 50, p. 1157-1160, 1958.

BSI STANDARDS. **BS 3405**: British Standard Method. Measure of particulate emission including grit and dust (simplified Method), 1983.

CALVERT, S.; LUNDGREN, D.; MEHTA, D. S. Venturi scrubber performance. **Journal Air Pollutant Control Assoc.**, v. 22, p. 529-532, 1972.

CARVALHO JUNIOR, J. A.; LACAVA, P. T.. **Emissões em processos de combustão**. São Paulo: Editora da Unesp, 2003. 137 p.

CARVALHO JUNIOR, J. A.; MCQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada**. Florianópolis: Editora da Ufsc, 2007. 176 p.

CETESB. **Qualidade do ar**: poluentes. Disponível em:

<<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/Informa??es-B?sicas/21-Poluentes>>. Acesso em: 07 jul. 2011.

CETESB. **L9.221**: Dutos e chaminés de fontes estacionárias. Determinação dos pontos de amostragem, 1990.

CHAKRABARTY, R. K. et al. Emissions from the laboratory combustion of Wildland fuels: Particle morphology and size. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 111, n. D07204, 2006.

CHENG, M. T. et al. Particulate matter characteristics during agricultural waste burning in Taichung city, Taiwan. **Journal of Hazard Mater**, v. 165, p. 187-192, 2009.

CONAMA. **Resolução Conama nº 03/90**: Padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR, 1990.

CONAMA. **Resolução Conama nº 382/06**: Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas, 2006.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (Org.). **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. 736 p.

COSTA, M. A. M. **Amostragem de partículas dispersas em correntes gasosas confinadas**. 1998. 138 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 1998.

COSTA, M. A. M. **Eficiência de coleta de partículas em lavadores Venturi**. 2002. 262 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

COSTA, M. A. M. et al. Controle da emissão de poluente particulado emitido pela queima de biomassa usada como combustível. In: Congresso Interamericano AIDIS, 31., 2008, Santiago. **Anais...**

COSTA, M. A. M. et al. Controle da emissão de particulados finos emitidos com a queima de biomassa madeirável utilizada para geração de energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 34., 2009, Campinas. **Anais...** . Campinas: Enemp, 2009. p. 15 - 56.

COSTA, M. A. M. et al. Real-time sampling of particulate matter smaller than 2.5 μm from Amazon forest biomass combustion. **Atmospheric Environment**, v. 54, p.480-489, 2012.

CUNHA, M. P. S. C. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: Encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira, 3., 1989, São Carlos. **Anais...**São Carlos, p. 93-121.

DASHEFSKY, H. Steven. **Dicionário de educação ambiental**: Um guia de A Z. São Paulo: Gaia, 2001. 313 p.

DERISIO, J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 3. ed. São Paulo: Signus, 1992. 164 p.

DIAS, G. F. **Ecopercepção: um resumo didático dos desafios socioambientais**. São Paulo: Gaia, 2004.

ENGLING, G. et al. Anhydrosugar characteristics in biomass smoke aerosol - case study of environmental influence on particle-size of rice straw burning aerosol. **Journal of Aerosol Science**, v. 56, p. 2-14, 2013.

EPA. **National ambient air quality standards**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/air/criteria.html>>. Acesso em: 05 set. 2012.

ESMANHOTO, E. **Desenvolvimento de sistema de amostragem isocinética com análise quantitativa de material particulado em dutos e chaminés de fontes estacionárias**. 2010. 89 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

ESTRELLAN, C. R.; LINO, F. Toxic emissions from open burning. **Chemosphere**, v. 80, p. 193-207, 2010.

FERNANDES, A. P. S. **Emissão de PM_{2,5} e gases em sistemas domésticos de queima de biomassa**. 2009. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

FERNÁNDEZ, R. G. et al. Study of main combustion characteristics for biomass fuels used in boilers. **Fuel Processing Technology**, v. 103, p. 16-26, 2012.

GAMA, M. S. C. **Estudo de um sistema de limpeza de gases usando um lavador Venturi**

de seção circular. 2008. 60 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 03, p.582-589, 2009.

GONÇALVES, H. A.; SOARES NETO, T. G. **Concentrações das espécies químicas liberadas durante a combustão de biomassa**. 2013. 39 p. Disponível em: <[http://mtc-m19.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/09.03.11.41.37/doc/Heber Albuquerque Gonçalves.pdf](http://mtc-m19.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/09.03.11.41.37/doc/Heber%20Albuquerque%20Goncalves.pdf)>. Acesso em: 30 out. 2013.

GUERRA, V. G. **Investigação do efeito de injeção de líquido por orifícios múltiplos na formação de gotas em um lavador Venturi**. 2009. 154 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

HALL, D. et al. PAHs, carbonyls, VOCs and PM_{2,5} emission factors for pre-harvest burning of Florida sugarcane. **Atmospheric Environment**, v. 55, p.164-172, 2012.

HAYS, M. D. et al. Open burning of agricultural biomass: physical and chemical properties of particle-phase emissions. **Atmospheric Environment**, v. 39, p.6747-6764, 2005.

HILSDORF, J. W. et al. **Química Tecnológica**. São Paulo: Cengage Learning, 2009. 348 p.

HOSSAIN, A. M. M. M. et al. Volatility and mixing states of ultrafine particles from biomass burning. **Journal of Hazardous Materials**, v. 205-206, p. 189-197, 2012.

HOSSEINI, S. et al. Particle size distributions from laboratory-scale biomass fires using fast response instruments. **Atmospheric Chemistry And Physics**, v. 10, p.8065-8076, 2010.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Programa de proteção respiratória**. Disponível em: <<http://ibama.gov.br>>. Acesso em: 07 jul. 2011.

IBGE. **Indicadores IBGE**: Estatística da produção agrícola. Brasília: Ibge, 2013. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 26 fev. 2014.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente para secagem de grãos**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

LACAVA, P. T.; MARTINS, C. A. (Org.). **Métodos experimentais de análise aplicados à combustão**. Taubaté: Papel Brasil, 2010.

LANDIM, A. B. et al. Sistema de lavagem e recuperação de biomassa. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 34., 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** . Rio de Janeiro: Abtcp, 2001. Disponível em: <www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd51/lavagem.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2012.

LIMOUSY, L. et al. Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. **Fuel**, v. 107, p.323-329, 2013.

LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 482 p.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. de. Tratamento de minérios. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. 858 p.

MAYER, F. D.; HOFFMANN, R.; RUPPENTHAL, J. E. Gestão energética, econômica e ambiental do resíduo casca de arroz em pequenas e médias agroindústrias de arroz. In: Simpósio de Engenharia de Produção, 13., 2006. Bauru. **Anais...**

MAZZOLI-ROCHA F. et al. Comparative respiratory toxicity of particles produced by traffic and sugar cane burning. **Environmental Research**, v. 108, p. 35-41, 2008.

MCILVEEN-WRIGHT, D. R. et al. A Techno-economic assessment of the reduction of carbon dioxide emissions through the use of biomass co-combustion. **Fuel: The Science and Technology of Fuel and Energy**, p. 11-18, 2011.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p.37-46, maio 2002.

MI, T. e YU, X. M. Dust removal and desulphurization in a novel venturi scrubber. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 62, p. 159-167, 2012.

MME. **Matriz Energética Nacional 2030**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/spe/galerias/arquivos/Publicacoes/matriz_energetica_nacional_2030/MatrizEnergeticaNacional2030.pdf>. Acesso em: 05 set. 2012.

MME. **Plano nacional de energia 2030**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html>. Acesso em: 05 set. 2012.

MMA. **Padrões de qualidade do ar**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/padroes-de-qualidade-do-ar>>. Acesso em: 05 set. 2012.

NASSEH, S. et al. Predicting pressure drop in venturi scrubbers with artificial neural networks. **Journal of Hazardous Materials**, v. 143, p.144-149, 2007.

NEVERS, N. **Air pollution control engineering**. New York: Mcgraw-hill, 1995. 586 p.

NONHEBEL, S. Energy from agricultural residues and consequences for land requirements for food production. **Agricultural Systems**. Holanda: Elsevier, v. 94, p. 586–592, 2007.

OZGEN, S.; CERNUSCHI, S.; GIUGLIANO, M. Experimental evaluation of particle number emissions from wood combustion in a closed fireplace. **Biomass & Bioenergy**, p.1-10, 2013.

PHILIPPI JÚNIOR, A. **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Barueri: Manole, 2005. 864 p.

POURMOHAMMADBAGHER, A. et al. Simultaneous removal of gaseous pollutants with a novel swirl wet scrubber. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 50, p. 773-779, 2011.

PRADO, G. F. et al. Burnt sugarcane harvesting: Particulate matter exposure and the effects on lung function, oxidative stress, and urinary 1-hydroxypyrene. **Science of the Total Environment**, v. 437, p. 200-208, 2012.

QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p.100-106, abr. 2005.

RABELO, E. R. C. **Análise teórica e experimental sobre incandescência em espécimes de madeira**. 2003. 120 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Energia, Unesp, Guaratinguetá, 2003.

RAHIMI, A.; NIKSIAR, A.; MOBASHERI, M.. Considering roles of heat and mass transfer for increasing the ability of pressure drop models in venturi scrubbers. **Chemical Engineering And Processing: Process Intensification**, v. 50, p.104-112, 2011.

RAM, K.; SARIN, M. M.; TRIPATHI, S. N. Temporal trends in atmospheric PM_{2,5}, PM₁₀, elemental carbon, organic carbon, water-soluble organic carbon, and optical properties: Impact of biomass burning emissions in the Indo-Gangetic Plain. **Environmental Science & Technology**, v. 46, p. 686-695, 2012.

RENDEIRO, G. et al. Caracterização energética da biomassa vegetal. **Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p.52-63. Disponível em: <http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes_Energeticas_para_a_Amazonia_Biomassa.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2013.

RESÍDUOS: Fonte de energia. **Referência: A revista do setor madeireiro**, Curitiba, n. 47, ago. 2005. Disponível em: <http://www.revistareferencia.com.br/index2.php?principal=ver_conteudo.php&uid=237&ediacao2;=>>. Acesso em: 23 jan. 2013.

REIS, A. C.; COURRY, J. R.; GUERRA, V. G. Estudo da distribuição de líquido e queda de pressão em um lavador venturi retangular. In: IX Congresso brasileiro de engenharia química – iniciação científica e IV Simpósio de engenharia química, 2011, Maringá. **Anais...**

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. (Org.). **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas: Editora da Unicamp, 2005. 448 p.

SÁNCHEZ, C. G. (Org.). **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Campinas: Editora Átomo, 2010.

SAÚDE EM MOVIMENTO. **OMS divulga novos padrões de qualidade do ar e cidades brasileiras ficam acima dos níveis recomendados**. Disponível em: <http://www.saudeemmovimento.com.br/reportagem/noticia_exibe.asp?cod_noticia=2237>. Acesso em: 05 set. 2012.

SILVA, A. M.; TEIXEIRA, J. C. F.; TEIXEIRA, S. F. C. F. Experiments in a large-scale venturi scrubber - Part I: Pressure drop. **Chemical Engineering And Processing**, v. 48, p.59-67, 2009.

SILVA, A. M. C. Material particulado (PM_{2.5}) de queima de biomassa e doenças respiratórias no sul da Amazônia brasileira. **Rev. Bras. Epidemiol.**, v. 13(2), p.337-351, 2010.

SIMONEIT, B. R. T. Biomass burning – a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion. **Appl. Geochem.**, v. 17, p.129-162, 2002.

SOARES, R.V. Queimas Controladas: Prós e Contrás. In: Fórum Nacional sobre Incêndios Florestais, 1., 1995, São Paulo. **Anais...**São Paulo, p. 6-10.

SOARES NETO, T. G. et al. Biomass consumption and CO₂, CO and main hydrocarbon gas emissions in na Amazonian forest clearing fire. **Atmospheric Environment**, v. 43, p. 438-446, 2009.

SOARES NETO, T. G. et al. Laboratory evaluation of Amazon forest biomass burning emissions. **Atmospheric Environment**, v. 45, p. 7455-7461, 2011.

SOUZA, R. C. R. et al. Carbonização da casca de arroz (*Oriza sativa*) para uso energético. In: XXXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2007, Bonito. **Anais....**

SPRINGSTEEN, B. et al. Emission reductions from woody biomass waste for energy as an a alternative to open burning. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 61, p. 63-68, 2011.

TAHERI, M. e MOHEBBI, A. Design of artificial neural networks using a genetic algorithm to predict collection efficiency in venturi scrubbers. **Journal of Hazardous Materials**, v. 157, p. 122-129, 2008.

THEODORE, L.; BUONICORE, A. **Air pollution control equipment**. CRC Press, 1988.

VERDESIO, J. J. **Energia da Biomassa**: publicado em 2007. Disponível em: <<http://vsites.unb.br/fav/renova/renova/AULAS/Energia%20da%20Biomassa.ppt>>. Acesso em: 10 jan. 2010.

VIANA, U. B. **Instrumentação Básica II - Vazão, Temperatura e Analítica**. Vitória: Senai, 1999. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/3970591/12/Analísadores-por-Paramagnetismo>>. Acesso em: 12 ago. 2013.

APOSTILA de aulas práticas: energia da madeira. Viçosa: UFV, 2005. 90 p.

VISWANATHAN, S. et al. Jet penetration measurements in a Venturi scrubber. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 61, p.504-508, 1983.

WEBIOENERGIAS. **Casca do café substitui carvão vegetal**. Disponível em: <<http://www.webioenergias.com.br/noticias/biomassa/405/casca-de-cafe-substitui-carvao-vegetal.html>>. Acesso em: 05 jul. 2010.

WEBIOENERGIAS. **Casca do café também é fonte de energia**. Disponível em: <<http://www.webioenergias.com.br/noticias/biomassa/896/casca-do-cafe-tambem-e-fonte-de-energia.html>>. Acesso em: 16 abr. 2011.

WILLIAMS, A.; JONES, J. M.; MA, L.; POURKASHANIAN, M. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 38, n. 2, p. 113-137, 2012.

WHO. **Air quality and health.** Disponível em:
<www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/index.html>. Acesso em: 05 set. 2012.

YOKELSON, R. J. et al. The tropical forest and fire emissions experiment: laboratory fire measurements and synthesis of campaign data. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, p.3509-3527, 2008.