

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

TATIANE VIEIRA MACHADO

**AMOSTRAGEM DE POLUENTES GASOSOS E
PARTICULADOS EMITIDOS PELA QUEIMA DE BIOMASSA
VEGETAL**

Itapeva - SP
2013

TATIANE VIEIRA MACHADO

**AMOSTRAGEM DE POLUENTES GASOSOS E
PARTICULADOS EMITIDOS PELA QUEIMA DE BIOMASSA
VEGETAL**

Trabalho de Graduação apresentado no Campus Experimental de Itapeva - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira

Orientador(a): Prof^a. Dr^a. Maria Angélica Martins Costa

Itapeva - SP
2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Machado, Tatiane Vieira

M149a Amostragem de poluentes gasosos e particulados emitidos pela queima de biomassa vegetal / Tatiane Vieira Machado. -- Itapeva, SP, 2013
69 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Itapeva, 2013

Orientador: Prof^a. Dr^a. Maria Angélica Martins Costa

Banca examinadora: Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza;
Prof. Dr. Carlos de Oliveira Affonso

Bibliografia

1. Ar - Poluição. 2. Poluentes. 3. Biomassa vegetal. I. Título. II. Itapeva - Curso de Engenharia Industrial Madeireira.

CDD 628.53

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

**AMOSTRAGEM DE POLUENTES GASOSOS E
PARTICULADOS EMITIDOS PELA QUEIMA DE BIOMASSA
VEGETAL**

TATIANE VIEIRA MACHADO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL
MADEIREIRA

Prof. Dr. Carlos Aberto Oliveira de Matos
Coordenador de Curso

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dr^a. Maria Angélica Martins Costa
Orientador – Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza
Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Prof. Dr. Carlos Affonso
Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Dedico este trabalho, aqueles que, de alguma maneira, acreditaram que meu sonho era possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de tudo, ao Pai, criador dos céus e da terra, que nos dá tudo aquilo que necessitamos para seguirmos nossos sonhos.

Agradeço aos meus pais, Valter e Silvia, e meus irmãos Rafael e Gabriel, sem os quais nada disso teria sido concretizado.

Ao meu esposo Renato, responsável por me manter firme no caminho, me encorajando e me dando motivos para jamais desistir.

A minha orientadora Professora Maria Angélica, a qual me acolheu como orientada desde meu primeiro ano de curso, mostrando-se sempre presente, tanto como educadora quanto como amiga.

Agradeço a todos que em algum momento participaram da pesquisa, e de forma generosa deixaram sua contribuição, em especial, ao Francisco e ao Juscelino, sempre dispostos a ajudar.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

O uso da biomassa como fonte de energia vem se intensificando no Brasil, merecendo destaque o uso da biomassa proveniente da madeira, como cascas, cavaco e serragem, que depois de receber o tratamento adequado pode ser utilizada em queimadores, para geração de energia. Entretanto, a partir dessa queima são emitidas finas partículas conhecidas como material particulado e uma ampla faixa de componentes tóxicos orgânicos e inorgânicos na forma de gases que muito contribuem com a poluição atmosférica e o aquecimento global, afetando a saúde humana, o meio ambiente e o clima. O objetivo deste projeto foi a quantificação de poluentes gasosos e particulados, utilizando os equipamentos DR4000 (Dataram 4) na amostragem de particulados menores que 2,5 µm e o Eurotron (Ecoline 4000) na amostragem de poluentes gasosos; emitidos com a queima de biomassa vegetal, em tempo real de queima em chaminé acoplada a um queimador de biomassa. Observamos que não existem normas específicas que estabeleçam limites de emissão para material particulado com diâmetro inferior a 2,5µm, que são as mais prejudiciais à saúde humana; sendo que as maiores concentrações atingiram cerca de 800.000µg/m³, para os menores diâmetros. Nota-se então a necessidade de amostragem destes poluentes principalmente em indústrias que utilizam a biomassa como combustível para que possam ser implantados equipamentos de controle de emissão.

Palavras chave: Combustível alternativo. Particulados finos. Poluição atmosférica.

ABSTRACT

The use of biomass as an energy source has been increasing in Brazil, with emphasis on the use of wood biomass, such as bark, wood chips and sawdust, that after receiving the appropriate treatment can be used in burners for power generation. However, from this burning are emitted fine particles known as particulate matter and a wide range of toxic organic and inorganic components in the form of gases that contribute greatly to air pollution and global warming, affecting human health, the environment and climate. The objective of this project was the quantification of gaseous and particulate, using and evaluating the equipment DR4000 (Dataram 4) sampling of particulates smaller than $2.5\mu\text{m}$ and EUROTRON (Ecoline 4000) when sampling gaseous pollutants, emitted from the burning of biomass in real time in the firing burner to a chimney attached biomass . We note that there are no specific rules that establish emission limits for particulate matter with diameter less than $2.5\mu\text{m}$ that are most harmful to human health and the highest concentrations reached about $800000\mu\text{g}/\text{m}^3$, for smaller diameters. It is noticeable the need for sampling of pollutants especially in industries that use biomass to fuel that could be implanted emission control equipment .

Keywords: Alternative fuel. Fine particulates. Air pollution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Oferta interna de energia em porcentagem (%) 2011-2012.	18
Figura 2: Gráfico para seleção de boquilhas e vazão em Litros por minuto de acordo com a velocidade em pés por minuto.	35
Figura 3: Câmara de combustão (queimador aberto) e chaminé de amostragem acoplada à estufa de secagem a ar quente.	36
Figura 4: Biomassas utilizadas: a) Cavaco de Eucaliptus, b) Cavaco de Pinus, c) Bagaço de Cana-de-açúcar, d) Casca de Café, e) Casca de Arroz.	37
Figura 5: DATARAM acoplado à sonda de amostragem e bocais para amostragem.	39
Figura 6: Eurotron Ecoline 4000 para amostragem de gases.	41
Figura 7: Representação dos pontos de amostragem.	42
Figura 8: Concentração de partículas em função do tempo de amostragem – combustível Cana-de-açúcar - teste 1.	45
Figura 9: Concentração de partículas em função do tempo de amostragem – combustível Cana-de-açúcar - teste 2.	46
Figura 10: Concentração de partículas em função do tempo de amostragem – combustível Casca de Arroz.	46
Figura 11: Concentração de partículas em função do tempo de amostragem – combustível Casca de Café.	47
Figura 12: Concentração de partículas em função do tempo de amostragem – combustível Cavaco de Eucaliptus.	48
Figura 13: Concentração de partículas em função do tempo de amostragem – combustível Cavaco de Pinus.	48
Figura 14: Concentração em função do diâmetro das partículas – combustível Cana de açúcar – teste 1.	50
Figura 15: Diâmetro das partículas em função do tempo – combustível Cana de açúcar – teste 1.	50
Figura 16: Concentração em função do diâmetro das partículas – combustível Cana de açúcar – teste 2.	51
Figura 17 : Diâmetro das partículas em função do tempo – combustível Cana de açúcar – teste 2.	51

Figura 18: Concentração em função do diâmetro das partículas – combustível Casca de Arroz.....	52
Figura 19: Diâmetro das partículas em função do tempo – combustível Casca de Arroz.	52
Figura 20: Concentração em função do diâmetro das partículas – combustível Casca de Café.....	53
Figura 21: Diâmetro das partículas em função do tempo – combustível Casca de Café.	53
Figura 22: Concentração em função do diâmetro das partículas – combustível Cavaco de Eucaliptus.....	54
Figura 23: Diâmetro das partículas em função do tempo – combustível Eucaliptus.	54
Figura 24: Concentração em função do diâmetro das partículas – combustível Cavaco de Pinus.	55
Figura 25: Diâmetro das partículas em função do tempo – combustível Pinus.	55
Figura 26: Concentração de CO ₂ em função do tempo - combustível Cana de Açúcar.	57
Figura 27: Concentração de CO ₂ em função do tempo - combustível Casca de Arroz.	57
Figura 28: Concentração de CO, NO e NO _x em função do tempo - combustível Cana de Açúcar - teste 1.	58
Figura 29: Concentração de CO, NO e NO _x em função do tempo - combustível Cana de Açúcar - teste 2.	58
Figura 30: Concentração de CO, NO e NO _x em função do tempo - combustível Casca de Arroz.....	59
Figura 31: Concentração de CO, NO e NO _x em função do tempo - combustível Casca de Café.....	59
Figura 32: Concentração de CO, NO e NO _x em função do tempo - combustível Cavaco de Eucaliptus.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Oferta interna de energia em Milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) 2011-2012.....	18
Tabela 2: Classificação dos poluentes.....	25
Tabela 3: Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas - cana de açúcar.....	32
Tabela 4: Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas - derivados de madeira.....	33
Tabela 5: Valores de poder calorífico em Joules por grama e umidade das amostras em porcentagem.	44
Tabela 6: Valores de Poder Calorífico Superior.....	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Fontes de Energia	17
3.1.1 Biomassa.....	17
3.2 COMBUSTÃO	23
3.3 POLUENTES ATMOSFÉRICOS	24
3.3.1 Material Particulado.....	25
3.3.2 Dióxido de Enxofre (SO ₂)	27
3.3.3 Monóxido de Carbono (CO)	28
3.3.4 Ozônio (O ₃).....	29
3.3.5 Hidrocarbonetos	29
3.3.6 Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	29
3.4 NORMAS PARA QUALIDADE DO AR	30
3.5 EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE EMISSÕES	33
3.6 AMOSTRAGEM EM FONTES ESTACIONÁRIAS.....	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1 Determinação do teor de umidade e poder calorífico.....	37
4.2 Equipamentos	38
4.2.1 DataRam4: Modelo DR4000	38
4.2.2 Eurotron: Ecoline 4000	40
4.2 Amostragens	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
6. CONCLUSÃO.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

A maior parte da energia consumida em todo mundo provém, essencialmente, de combustíveis fósseis, porém surgiu uma preocupação em relação à sua possível exaustão no futuro, além de outras consequências ambientais, visto que a queima dos combustíveis fósseis gera poluentes, trazendo mudanças climáticas (BERNDES et al., 2003). Assim, iniciou-se a busca por alternativas renováveis existentes, em relação aos combustíveis fósseis, e a biomassa tem despertado maior interesse por ser proveniente de matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada como fonte de energia (SILVA et al., 2004).

Segundo o Balanço Energético Nacional – BEN (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2008), os principais setores consumidores da biomassa (bagaço de cana-de-açúcar, lenha e carvão vegetal, álcool e outras fontes primárias renováveis), são o industrial com cerca de 52% do consumo final, o residencial com 13% e de transportes com 14%. Na primeira metade da década de 80, houve a elevação do uso industrial de biomassa, devido a substituição do óleo combustível por carvão vegetal; a produção de álcool utilizando o bagaço de cana-de-açúcar e à expansão da siderurgia a carvão vegetal. Seu consumo nos setores residencial e agropecuário decaiu devido à menor utilização da lenha para cocção.

No Brasil, se destacam dentre os principais tipos que podem ser usados como combustíveis, os provenientes da madeira, como a lenha, serragem e cavacos. Além dessas, o bagaço de cana-de-açúcar também é muito empregado, devido à grande produção brasileira de açúcar e álcool (GENOVESE et al., 2006).

Mas, apesar das inúmeras vantagens frente às outras fontes, há algumas implicações que devem ser consideradas, como a emissão de efluentes gasosos, os quais afetam o meio ambiente e a saúde humana. Dentre os gases tóxicos liberados destacam-se o Monóxido de Carbono (CO), os Hidrocarbonetos (HC), os Óxidos de Nitrogênio (NOx) e os particulados (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2009).

Torna-se então de fundamental importância uma avaliação quantitativa desses impactos e para isso, o conhecimento das características das partículas oriundas da queima de biomassa como a distribuição do tamanho das mesmas, já que a maioria

das partículas emitidas possui diâmetro inferior a $2,5\mu\text{m}$, enquadrando-se na faixa dos particulados finos (HAYS et al., 2002).

Diante do contexto sobre as causas e os efeitos da emissão de particulados, nota-se a real necessidade do controle da poluição do ar por parte das indústrias, envolvendo também os órgãos públicos, universidades, empresas e a sociedade, tornando-se objeto de amplos estudos quanto às medidas cabíveis de serem aplicadas para se controlar a emissão destes poluentes.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho foi a quantificação de poluentes gasosos e particulados, utilizando equipamentos de amostragem específicos para particulados menores que 2,5 μm e poluentes gasosos; emitidos com a queima de biomassa vegetal, em tempo real de queima em chaminé acoplada a um queimador de biomassa.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica relacionada com os diversos tipos de biomassas utilizadas para a geração de energia, e a existência de leis e normas que estabeleçam limites para as emissões de poluentes provenientes de sua combustão;
- Obter valores de concentração e de diâmetro que são encontrados durante a queima em fontes fixas (chaminés) dos materiais particulados com diâmetro inferior a 2,5 μm ;
- Obter a concentração dos gases poluentes que são liberados com a combustão de determinadas biomassas;
- Realizar amostragens com equipamentos específicos para cada tipo de poluente, manuseá-los e aprender seus princípios de funcionamento, bem como utilizar normas existentes para essas amostragens;
- Demonstrar graficamente os resultados obtidos, para melhor visualização e compreensão dos mesmos, e comparar dentre os combustíveis utilizados aquele que apresentou os melhores e piores resultados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo desta revisão foi levantar o uso da biomassa como combustível para geração de energia, quais as mais utilizadas e quais são os possíveis impactos que a queima desse material pode causar. Também verificar quais as normas vigentes que limitem as emissões provenientes dessa fonte de energia, que por mais que seja considerada como um combustível limpo, libera certas substâncias ou materiais que também são prejudiciais.

3.1 Fontes de Energia

3.1.1 Biomassa

De acordo com o Balanço Energético Nacional 2013 – ano base 2012, a participação de renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, com 42,4%, com pequena redução em relação a 2011 devido à menor oferta de energia hidráulica e de etanol, sendo que a média mundial está em torno de 13,2%. Dentre as fontes renováveis, a biomassa de cana de açúcar representa 15,4% da oferta interna de energia, já a lenha e o carvão vegetal contribuem com 9,1%. A Tabela 1 e a Figura 1 mostram a distribuição da oferta interna de energia.

O Plano Decenal de Expansão de Energia – PDEE(2011), do Ministério de Minas e Energia, considera que de 2011 a 2021 a participação da biomassa dentre as fontes primárias no Brasil se mantenha praticamente constante, porém com grande redução do papel da lenha. Mas, o consumo de biomassa densificada tende a expandir e substituir combustíveis fósseis, aumentando a participação da biomassa na matriz energética nacional.

Tabela 1: Oferta interna de energia em Milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) 2011-2012.

em Mtep		
Fonte	2012	2011
RENOVÁVEIS	120,2	119,8
Energia hidráulica e eletricidade	39,2	39,9
Biomassa da cana	43,6	42,8
Lenha e Carvão Vegetal	25,7	26,0
Outras renováveis	11,8	11,1
NÃO RENOVÁVEIS	163,4	152,5
Petróleo	111,2	105,2
Gás natural	32,6	27,7
Carvão mineral	15,3	15,5
Urânio (U_3O_8)	4,3	4,2

Fonte: Balanço Energético Nacional 2013 – ano base 2012

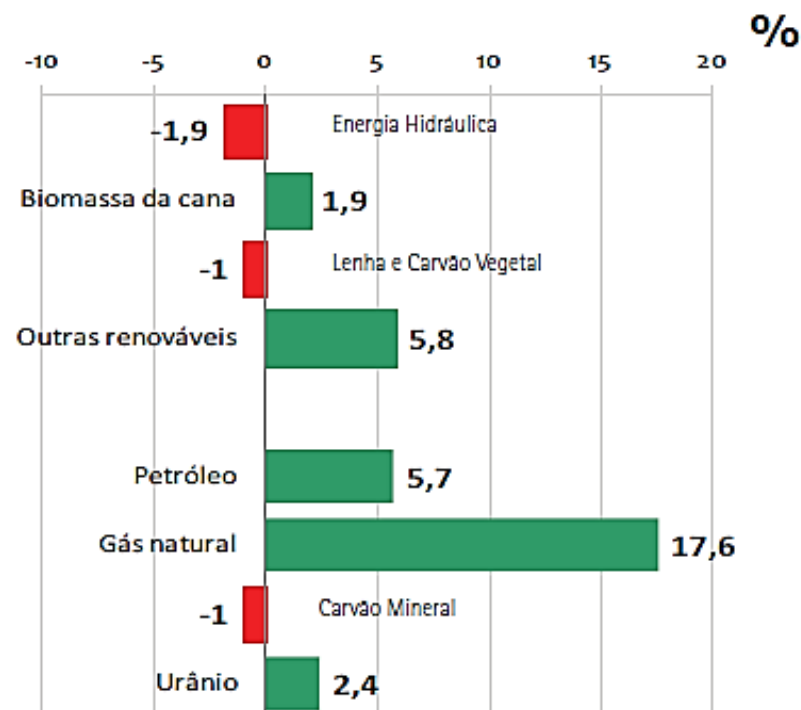


Figura 1: Oferta interna de energia em porcentagem (%) 2011-2012.

Fonte: Balanço Energético Nacional 2013 – ano base 2012

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL(2003), mesmo que a biomassa possua uma eficiência mais baixa em relação aos combustíveis fósseis, uma de suas principais vantagens é seu aproveitamento que pode ser feito diretamente, por meio da combustão em fornos, caldeiras etc. Porém, hoje tem-se investido em novas tecnologias que aumentam a eficiência do processo e reduzem impactos socioambientais, como por exemplo, a gaseificação e a pirólise, também sendo comum a cogeração em sistemas que utilizam a biomassa como fonte energética.

Uma outra vantagem segundo Muler (2008), é que a queima da biomassa (lenha, bagaço da cana-de-açúcar, casca de arroz, casca de coco e resíduos da indústria madeireira e de papel e celulose), tem suas emissões de gases que provocam o efeito estufa consideradas balanceadas, isso porque através da fotossíntese essas plantas absorvem dióxido de carbono, balanceando o que foi liberado através da combustão.

Já Timothy e Seen (2005) nos dizem que em um processo de combustão em queimadores de biomassa, são emitidas partículas muito finas e incombustas, que são os chamados materiais particulados. Segundo Lora (2002), materiais particulados são todas as substâncias, com exceção da água pura, que existem em suspensão na atmosfera, com dimensões microscópicas, porém são maiores que as moleculares, incluindo poeiras, fumos, nevoeiro, aspersão e cerração.

Essas substâncias podem ser classificadas de acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (2013) conforme sua dimensão, como exemplo, as partículas inaláveis finas (PM 2,5), que são as partículas com tamanho inferior a 2,5 μm . São geradas principalmente pela queima de combustível fóssil por veículos e pela queima de biomassa por indústrias. São consideradas muito prejudiciais à saúde, pois penetram nas regiões mais profundas dos pulmões podendo alcançar a região dos alvéolos pulmonares. E, além disso, podem ficar suspensas no ar por dias ou até mesmo algumas semanas, fazendo com que sejam carregadas para regiões mais distantes.

Em relação à saúde humana, Arbex et al. (2004) afirmam que as partículas mais prejudiciais a saúde são as finas e ultrafinas, que constituem 94% do total na atmosfera, pois transpõem a barreira epitelial e atingem o interstício pulmonar. As partículas ultrafinas podem rapidamente passar pelo sistema respiratório e se acumular nos pulmões, fígado e bexiga (NEMMAR et al., 2002). Estas são as mais

difíceis de serem removidas do organismo, pois de todas as partículas depositadas na região alveolar, apenas cerca de 20% das ultrafinas são removidas, enquanto que cerca de 80% de partículas acima de 0,5 μm podem ser extraídas (OBERDÖRSTER, 2005).

As emissões de material particulado pelas indústrias provêm das operações de estocagem, manuseio e transporte de matérias-primas e, principalmente, pela queima de combustíveis utilizados nas várias etapas do processo produtivo, e com o crescente desenvolvimento industrial, a emissão destes poluentes tende a crescer (JACOMINO et al., 2009).

No Brasil há padrões de qualidade do ar que foram estabelecidos pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA) e aprovados pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) e cada estado possui um órgão responsável pelo controle, fiscalização, monitoramento e licenciamento das atividades geradoras de poluição, sendo a CETESB o órgão responsável no estado de São Paulo. As normas brasileiras foram baseadas nas normas americanas regulamentadas pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), onde a resolução nº 3 da CONAMA de 28/06/90 estabelece um limite diário de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para partículas com tamanho entre 10 e 2,5 μm – PM 10 (CETESB, 2006).

3.1.1.1 Resíduos de madeira

Os resíduos industriais de madeira são encontrados em diversos tipos como serragem, cepilho, cavacos, maravalha, cascas e outros e são gerados desde o transporte da madeira em tora à indústria, até seu manuseio e processamento, finalizando no produto acabado. A maravalha é um dos resíduos de serrarias e do reprocessamento da madeira em empresas de móveis, e tem sido bastante utilizada como cama de aviários na criação de frangos de corte, mas teve seu preço aumentado devido a escassez no mercado (WIECHETECK, 2009).

Ainda segundo Wiecheteck (2009), em um Sumário Executivo sobre o aproveitamentos de resíduos e subprodutos florestais, o aproveitamento energético dos resíduos de madeira podem gerar energia térmica, elétrica ou ambas (cogeração), através de sua combustão direta ou incineração, sendo que a maioria das empresas e fábricas processadoras de madeira no Brasil possuem um processo fabril que utiliza

o vapor que é gerado a partir da queima em caldeira de resíduos de biomassa disponíveis na própria indústria, na forma de cavaco, serragem, resíduos florestais, recortes de painéis, etc. Essas indústrias geralmente usam a cogeração aproveitando este vapor em processos de secagem por exemplo, depois da passagem do mesmo por uma turbina a vapor, que pode estar acoplada a um gerador elétrico para a geração de energia.

3.1.1.2 Bagaço de cana-de-açúcar

De acordo com Paoliello (2006), o bagaço como combustível apresenta as seguintes características: produção de bagaço por tonelada de cana processada: 250 a 260 kg/t; energia útil contida no vapor gerado: 4,79 MJ/kg de bagaço; produção de 1,9 kg vapor por kg de bagaço; poder calorífico inferior (bagaço úmido): 7,53 MJ/kg; e poder calorífico inferior (bagaço seco): 10,56 MJ/kg.

Leme (2005), avaliou a emissão de gases de efeito estufa, óxidos de nitrogênio e material particulado, provenientes do aproveitamento da biomassa residual de cana-de-açúcar – bagaço e palha – como combustível, sendo que os valores obtidos foram estimados e calculados a partir de fatores de emissão e índices, onde para a queima de bagaço de cana de açúcar os valores foram de 6,75 quilogramas de CO₂ equivalente por tonelada de cana para gases de efeito estufa, óxidos de nitrogênio com 0,15 quilogramas de NO_x por tonelada de cana, e material particulado, 2,58 quilogramas de MP por tonelada de cana.

Os resultados obtidos por Leme (2005), mostram que há boas oportunidades de promover a redução das emissões de gases de efeito estufa pelo uso da biomassa como combustível, porém, o setor é intensivo nas emissões de óxidos de nitrogênio e material particulado, quando se considera emissões não controladas desses poluentes. Isso faz despertar a atenção quanto à necessidade de monitoramento e controle dessas emissões.

3.1.1.3 Casca de arroz

A casca de arroz pode representar até 20% do peso do total do arroz, o que representa uma grande quantidade de resíduos que se descartados de maneira incorreta, podem causar transtornos como a emissão de metano devido a sua

decomposição. Geralmente esse resíduo é utilizado em locais de incubação de frango, como aditivo na indústria de cimento e como fertilizante. (CHUNGSANGUNSIT, 2004).

Segundo o Levantamento de grãos publicado pela Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB(2013), para a próxima safra brasileira de arroz, a produção média deverá ser 3,4% superior em relação à safra 2012/13, atingindo 12.151,5 mil toneladas, onde a região sul é a responsável pela maior parte da produção.

De acordo com Foletto (2005), a utilização da casca de arroz como combustível é possível, uma vez que a tecnologia para tal já está disponível, a matéria-prima é abundante e sem destinação correta, além de capturar CO₂ durante seu crescimento.

Silva et al,(2012) fizeram um levantamento sobre o potencial energético da biomassa de casca de arroz no Brasil e concluíram que o Brasil gera 32,61 MW, representando 0,03% do total da produção energética nacional. Porém a produção está em torno de 12.628,2 toneladas, o que seria possível gerar cerca de 268,69 MW, representando 0,21% na produção energética total do Brasil.

Park et al.(2013), fizeram um estudo sobre o diâmetro das partículas emitidas a partir de diversos tipos de biomassa, chegando que para a casca de arroz, a maior parte das partículas apresentou diâmetro aerodinâmico inferior a 1µm.

Já Kim Oahn et al.(2011), analisaram o diâmetro e a concentração de material particulado emitido pela queima em campo de casca de arroz, concluindo que as maiores concentrações foram de material particulado menor que 2,5µm.

3.1.1.4 Casca de café

Para Vale (2013), durante o cultivo do café, aproximadamente dois milhões de toneladas de cascas de grãos são produzidas por ano no Brasil, sendo que na maioria das vezes isso não é aproveitado ou usado apenas para servir de adubo nos terrenos dos cafezais, porém, essas práticas não aproveitam o potencial energético da casca de café, que pode até substituir a lenha na geração de energia.

Quando usada como combustível, a casca do café, assim como outros resíduos agroflorestais, tem inúmeras vantagens em relação aos combustíveis fósseis, e uma das principais é o fato de ser um combustível renovável, e os compostos liberados na sua combustão são sequestrados pelos novos plantios, fechando o ciclo do carbono, e, portanto, não contribuindo com o efeito estufa. Sua utilização agrega valor a

resíduos que geralmente são descartados, que além de gerar um novo produto, diminui a poluição do meio ambiente e gera emprego, renda e desenvolvimento social nas regiões onde a cultura do café é uma prática (VALE, 2013).

3.2 COMBUSTÃO

O processo de combustão é um dos processos de conversão da biomassa sólida para extração de sua energia. Este processo envolve um processo de conversão termoquímica em três fases:

1. Aquecimento (<100°C): para que alguma reação aconteça é necessário que a biomassa atinja uma temperatura adequada;
2. Secagem (entre 100° C e 150° C): Nessa faixa de temperatura a água presente no combustível passa por vaporização, realizando então a secagem do mesmo;
3. Decomposição pirolítica (entre 150°C e 230°C): A terceira fase consiste na quebra das cadeias longas dos combustíveis sólidos em cadeias menores, resultando na produção de compostos líquidos de alcatrão e gases como o monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos gasosos (C_mH_n). A decomposição pirolítica da madeira não necessita de oxigênio.

Os processos citados acontecem com a absorção de calor (endotérmicos), mas ultrapassando a temperatura de 230°C (ponto de inflamação) as reações exotérmicas se iniciam com a entrada de oxigênio, caracterizando assim uma reação de combustão (PORTAL DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2013).

A combustão também pode ser entendida, segundo Arbex et al. (2004), como um processo químico pelo qual um material reage com o oxigênio do ar produzindo luz e calor, e mais especificamente no caso da combustão de biomassa, esse processo envolve três fases: ignição, fase de chama e fase sem chama (incandescência).

Já o combustível, que pode ser de origem fóssil ou renovável, é definido segundo Hilsdorf et al.(2004), como qualquer substância que ao reagir quimicamente com outra libera energia na forma de calor, porém, para que seja vantajoso para as indústrias, essas substâncias devem ser de fácil aquisição, carbonáceo e liberar

grandes quantidades de energia térmica. Carbono e hidrogênio são os componentes básicos dos combustíveis, mas também podem apresentar oxigênio, nitrogênio e enxofre.

Nogueira (2005), cita que as reações elementares da combustão são: oxidação completa do carbono liberando 8100 kcal/kg e formando dióxido de carbono, oxidação incompleta do carbono formando monóxido de carbono e com a liberação de 2400kcal/kg, oxidação do hidrogênio, levando a formação de água e 34100kcal/kg de energia, e em alguns casos se houver a presença de enxofre na composição, haverá também a oxidação do mesmo liberando dióxido de enxofre e 2200kcal/kg de combustível.

3.3 POLUENTES ATMOSFÉRICOS

De acordo com a Resolução nº 003 de 28 de junho de 1990 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), poluente atmosférico é qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

I - impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;

II - inconveniente ao bem-estar público;

III - danoso aos materiais, à fauna e flora.

IV - prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Os poluentes atmosféricos existem sob a forma de gases e de partículas e podem ser naturais e artificiais, provenientes de fontes fixas como indústrias, usinas termoelétricas, incineradores de lixo, vulcões ou móveis tais como veículos automotores, trem, avião, embarcação marítima, etc. (MIRANDA, 2008).

Para a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB(2013), o nível de poluição atmosférica é medido pela quantidade de substâncias poluentes presentes no ar e para a classificação dos poluentes, os mesmos são divididos em duas categorias:

Poluentes Primários: aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão.

Poluentes Secundários: aqueles formados na atmosfera através da reação química entre poluentes primários e componentes naturais da atmosfera.

As substâncias poluentes podem ser classificadas da seguinte forma:

Tabela 2: Classificação dos poluentes.

Compostos de Enxofre	Compostos de Nitrogênio	Compostos Orgânicos	Monóxido de Carbono	Compostos Halogenados	Metais Pesados	Material Particulado	Oxidantes Fotoquímicos
SO ₂	NO	hidrocarbonetos álcoois		HCl	Pb		O ₃
SO ₃	NO ₂	aldeídos		HF	Cd	mistura de compostos no estado sólido ou líquido	formaldeído
Compostos de Enxofre Reduzido: (H ₂ S, Mercaptanas, Dissulfeto de carbono, etc) sulfatos	NH ₃	cetonas	CO	cloretos	As		acroleína
	HNO ₃	ácidos orgânicos		fluoretos	Ni		PAN
	nitratos				etc.		etc.

Fonte: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB(2013).

Temos no Brasil padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução CONAMA 03/90, para os sete seguintes indicadores:

- Partículas Totais em Suspensão (PTS)
- Fumaça
- Partículas Inaláveis (PI ou PM₁₀)
- Dióxido de Enxofre (SO₂)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Ozônio (O₃)
- Dióxido de Nitrogênio (NO₂)

De acordo com Mieville et.al., (2010), a queima de biomassa contribui com 50% do total das emissões diretas de CO e cerca de 15% das emissões de NO_x no mundo.

3.3.1 Material Particulado

A CETESB (2013) denomina material particulado como poluentes constituídos de poeiras, fumaças e qualquer tipo de material em suspensão na atmosfera por causa de seu pequeno diâmetro, sendo que as principais fontes de emissão são os veículos

automotores, os processos industriais, a queima de biomassa e a ressuspensão de poeira do solo, além de poder ser formado a partir de gases como dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, como resultado de reações químicas no ar.

Segundo CETESB (2013), o material particulado pode ser classificado como:

Partículas Totais em Suspensão (PTS): Aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é inferior a 50 μm . Essas partículas podem ser inaladas e causar problemas à saúde, e também a qualidade de vida da população, interferindo esteticamente no ambiente e prejudicando as atividades da comunidade.

Partículas Inaláveis (MP10): Partículas com diâmetro abaixo de 10 μm , que podem ficar retidas na parte superior do sistema respiratório.

Partículas Inaláveis Finas (MP2,5): São aquelas que possuem diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 μm . Devido ao seu tamanho microscópico, penetram profundamente no sistema respiratório, atingindo os alvéolos pulmonares.

Fumaça (FMC): Está associada ao material particulado suspenso na atmosfera proveniente dos processos de combustão.

Silva et al.(2010), realizaram uma investigação da autocorrelação espacial global da prevalência de internações por doenças respiratórias e do percentual de horas críticas de concentração do material particulado nos municípios do estado de Mato Grosso, e também uma regressão múltipla espacial, teve como variáveis resposta a prevalência de internações por doenças respiratórias, e como variável de exposição o percentual de horas críticas anuais. Como resultado observaram que havia associação estatisticamente significativa entre a prevalência de internações por doenças respiratórias e o percentual de horas críticas anuais de material particulado, concluindo que as emissões de material particulado originadas de queimadas na Amazônia Legal estão relacionadas à prevalência de internações por doenças respiratórias em grupos populacionais sensíveis nos municípios do Estado de Mato Grosso.

Soares Neto et al.(2009), fizeram um estudo sobre a emissão de poluentes gasosos e particulados provenientes da queima da biomassa realizado na floresta amazônica brasileira. Para os particulados de diâmetro inferior a 2,5 μm , os valores de concentração obtidos foram dados de acordo com as fases da combustão:

- i. Ignição: 6090 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,
- ii. Chama: 21450 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,

iii. Incandescência: $1500\mu\text{g}/\text{m}^3$, decaindo para $1000\mu\text{g}/\text{m}^3$ e por fim a $400\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Alguns outros estudos foram realizados em laboratório envolvendo diversos tipos de biomassa. Hays et al.(2002), encontraram valores de diâmetro médio geométrico de 0,1 a $0,2\mu\text{m}$, e constataram variação na distribuição de tamanho em relação às fases da combustão e ao tipo de biomassa, mas em todos os casos os menores diâmetros se deram na fase de incandescência, na fase de chama identificaram diâmetros intermediários e os maiores diâmetros obtidos foram na fase de ignição. Chakrabaty et al (2006), mediram a distribuição das partículas concluindo que o diâmetro variou de 30 a 200nm para biomassa úmida (20% de umidade em base seca) e seca (5-10% de umidade em base seca), respectivamente. Mais recentemente Hosseini et al. (2010), utilizaram um contador de partículas óptico, durante a queimada de savana, e obtiveram partículas de diâmetro variando de 0,2 a $0,3\mu\text{m}$ e outras acima de $2\mu\text{m}$, concluindo que a distribuição de tamanho varia de acordo com a fase da combustão, com a condição do combustível (vivo, morto e umidade), sua densidade e os tipos (folhas, galhos, casca, etc), sendo que neste estudo observaram que os menores diâmetros foram identificados na fase de chama e nas fases de ignição e incandescência foram maiores.

Kura (2010), realizou amostragens em escala laboratorial utilizando como combustível a biomassa proveniente da floresta Amazônica, utilizando para as coletas o amostrador de partículas DataRam, e observou que a maior parte da emissão de particulado aconteceu no início da fase de chama com concentrações de quase $350\text{mg}/\text{m}^3$, enquanto que neste mesmo período, o DataRAM registrou valores menores de diâmetro aerodinâmico médio com valores próximos de $0,2\mu\text{m}$.

3.3.2 Dióxido de Enxofre (SO₂)

De acordo com a Ficha de Identificação Toxicológica emitida pela CETESB (2012), o dióxido de enxofre é emitido por gases vulcânicos, atividades industriais como termelétricas, fabricação de fertilizantes, fundição de alumínio e aço, produção de ácido sulfúrico e papel. E também está presente na emissão veicular como resultado da queima de combustíveis fósseis e seu nível ambiental vem decrescendo em razão do maior controle das emissões e redução no teor de enxofre nos combustíveis.

A Resolução 315 do CONAMA (2002), determina a produção de diesel S50, que possui, no máximo, 50 ppm de enxofre, e em outubro deste ano a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) anunciou que a partir de 1º de janeiro de 2014 o teor de enxofre contido na gasolina comum comercializada no país deverá ser reduzido de 800 mg/kg para 50 mg/kg, o que significa a diminuição de 94% de emissão do gás na atmosfera, o que pode ser de extrema importância, já que o SO₂ presente na atmosfera causa a formação de chuva ácida e é precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis (PM₁₀).

As concentrações médias anuais de SO₂ no ar atmosférico variam de 20 a 60 µg/m³ (0,007-0,021 ppm), com média diária acima de 125 µg/m³ (0,044 ppm) (CETESB,2012).

3.3.3 Monóxido de Carbono (CO)

Segundo a CETESB(2012), o monóxido de carbono é um gás incolor e inodoro que resulta da queima incompleta de combustíveis de origem orgânica (combustíveis fósseis, biomassa, etc), sendo emitido principalmente por veículos automotores.

O CO é um poluente altamente tóxico, capaz de afetar a capacidade do sangue de transportar oxigênio, através da reação com a hemoglobina do sangue que resulta no surgimento da carboxihemoglobina (COHb), que numa concentração de 5 % no sangue já provoca distúrbios nervosos e de comportamento, assim como problemas no metabolismo do miocárdio (LORA,2000).

Como já citado, Soares Neto et al.(2009), realizaram também a amostragem de poluentes gasosos na queima de biomassa florestal na Amazônia, obtendo os seguintes valores para CO e CO₂:

- CO:
 - i. Ignição: 9,4ppmv,
 - ii. Chama: 130ppmv,
 - iii. Incandescência: 130, 137, 86 e 22,7ppmv.
- CO₂:
 - i. Ignição: 405ppmv,
 - ii. Chama: 2546ppmv,
 - iii. Incandescência: 1135, 1095, 824 e 451ppmv.

3.3.4 Ozônio (O₃)

Os oxidantes fotoquímicos são uma mistura de poluentes secundários formados pelas reações entre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, na presença de luz solar, tendo como produto a formação de ozônio, que serve então como parâmetro indicador da presença de oxidantes fotoquímicos na atmosfera. E Além de prejuízos à saúde, o ozônio pode causar danos à vegetação. (CETESB,2012).

3.3.5 Hidrocarbonetos

Em definição dada pela CETESB (2012), os hidrocarbonetos são gases e vapores resultantes da queima incompleta e evaporação de combustíveis e de outros produtos orgânicos voláteis. O benzeno, por exemplo, é altamente cancerígeno e mutagênico. Eles também participam das reações de formação da névoa fotoquímica, também chamado de *Smog*, que é o nome de um fenômeno comum nos modernos centros urbanos, gerado por grandes concentrações de poluentes estagnados, que, ao sofrer uma reação fotoquímica, produz uma camada roxo-acinzentada na atmosfera, de imensa periculosidade à saúde daqueles em contato com tal fenômeno. (SANTIAGO,2013).

3.3.6 Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

São formados durante processos de combustão. Em grandes cidades, os veículos geralmente são os principais responsáveis pela emissão dos óxidos de nitrogênio. O NO, sob a ação de luz solar se transforma em NO₂ e tem papel importante na formação de oxidantes fotoquímicos como o ozônio. Dependendo das concentrações, o NO₂ causa prejuízos à saúde (CETESB,2012).

Lora (2000) cita que estudos indicam que os óxidos de nitrogênio aumentam a susceptibilidade a infecções bacterianas nos pulmões e que concentrações de 1ppm pode provocar irritação dos alvéolos pulmonares com sintomas semelhantes aos de enfisema pulmonar.

Além destes poluentes que servem como indicadores de qualidade do ar, a CETESB monitora outros parâmetros, como por exemplo, o chumbo, regulamentado conforme o Decreto Estadual nº 59.113 DE 23/04/2013.

3.4 NORMAS PARA QUALIDADE DO AR

No Brasil há padrões de qualidade do ar que foram estabelecidos pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA) e aprovados pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) e cada estado possui um órgão responsável pelo controle, fiscalização, monitoramento e licenciamento das atividades geradoras de poluição, sendo a CETESB o órgão responsável no estado de São Paulo. As normas brasileiras foram baseadas nas normas americanas regulamentadas pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), sendo que a resolução nº 3 do CONAMA de 28/06/90 define:

I - Padrões Primários de Qualidade do Ar são as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população;

II - Padrões Secundários de Qualidade do Ar são as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Sendo assim, para os indicadores de qualidade do ar, os limites estabelecidos são:

- Partículas Totais em Suspensão

- a) Padrão Primário

- 1 - concentração média geométrica anual de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar.

- 2 - concentração média de 24 horas de 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

- b) Padrão Secundário

- 1 - concentração média geométrica anual de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar.

- 2 - concentração média de 24 horas, de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

- Fumaça

- a) Padrão Primário

- 1 - concentração média aritmética anual de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar.

- 2 - concentração média de 24 horas, de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

- b) Padrão Secundário

- 1 - concentração média aritmética anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar.

- 2 - concentração média de 24 horas, de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar, que não deve ser excedida uma de urna vez por ano.

- Partículas Inaláveis

- a) Padrão Primário e Secundário

- 1 - concentração média aritmética anual de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar.

- 2 - concentração média de 24 horas de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

- Dióxido de Enxofre

- a) Padrão Primário

- 1- concentração média aritmética anual de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar.

- 2- concentração média de 24 horas, de $365 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

- b) Padrão Secundário

- 1 - concentração média aritmética anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar.

- 2 - concentração média de 24 horas, de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

- Monóxido de Carbono

- a) Padrão Primário e Secundário

- 1- concentração média de 8 horas, de $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar (9 ppm), que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

- 2 - concentração média de 1 hora, de $40.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar (35 ppm), que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

- Ozônio

- a) Padrão Primário e Secundário

1 - concentração média de 1 hora, de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

- Dióxido de Nitrogênio

- a) Padrão Primário

1 - concentração média aritmética anual de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar.

2 - concentração média de 1 hora de $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar.

- b) Padrão Secundário

1- concentração média aritmética anual de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar.

2 - concentração média de 1 hora de $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar.

Assim, no caso das partículas inaláveis (tamanho entre 10 e $2,5 \mu\text{m}$ – PM_{10}), a resolução estabelece um limite diário de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Já a Resolução nº 436 do CONAMA, de 22 de dezembro de 2011 estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas de acordo com a potência térmica nominal em MegaWatts (MW):

- Provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de biomassa de cana-de-açúcar de acordo com a Tabela 3:

Tabela 3: Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas - cana de açúcar.

Potência térmica nominal (MW)	MP ⁽¹⁾	NO _x ⁽¹⁾ (como NO ₂)
MW < 50	520	NA
$50 \leq \text{MW} \leq 100$	450	350
MW > 100	390	350

(1) os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm^3 , em base seca a 8% de oxigênio.

NA - Não aplicável.

Fonte: Resolução CONAMA nº 436 de 22/12/11.

- Provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de derivados da madeira, como mostra a Tabela 4:

Tabela 4: Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas - derivados de madeira.

Potência térmica nominal (MW)	MP ⁽¹⁾	NOx ⁽¹⁾ (como NO ₂)
MW < 10	730	NA
10 ≤ MW ≤ 50	520	650
MW > 50	300	650

⁽¹⁾ os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca a 8% de oxigênio.

NA - Não aplicável.

Fonte: Resolução CONAMA nº 436 de 22/12/11.

Segundo a Organização Mundial da Saúde OMS (2012), os valores de referência para partículas de diâmetro de 2,5 µm em suspensão são de 10 µg/m³ numa média anual, porém na legislação brasileira ainda não há citações que limitem as emissões ou estipulem padrões para partículas de diâmetro inferior a 2,5 µm.

3.5 EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE EMISSÕES

Lisboa e Schirmer (2007), citam que os equipamentos de controle são classificados em função de diversos parâmetros como mecanismo de controle, uso ou não de água ou outro líquido e do estado físico do poluente a ser considerado. Para a coleta de material particulado, os principais equipamentos utilizados são: coletores mecânicos inerciais e gravitacionais, coletores mecânicos centrífugos (ciclones), precipitadores dinâmicos secos, filtro de tecido (filtro de mangas), precipitador eletrostático seco, torre de *spray* (pulverizadores), lavadores com enchimento, lavador ciclônico, lavador venturi e lavadores de leito móvel. Já o controle de gases e vapores pode ser feito por absorvedores, adsorvedores, incineração de gás com chama direta e incineradores de gás catalíticos.

Mazzer e Cavalcanti (2004) definem alguns desses equipamentos:

Absorvedores: São equipamentos utilizados para a absorção de gases através da transferência de massa de uma fase gasosa para uma fase líquida.

Adsorvedores: São mais seletivos sendo mais usados para a remoção de gases em baixas concentrações e para a recuperação de solventes, através de um material sólido, poroso e de grande área superficial específica.

Ciclones / mult ciclones: São equipamentos utilizados para realizar a separação de sólidos dissolvidos no ar através da ação da força centrífuga que é gerada pela entrada tangencial do gás no equipamento.

Filtros de tecido: A filtração é um método simples e eficiente para remoção de partículas de um fluxo gasoso, apresentando alta eficiência de coleta, inclusive para partículas finas, a perda de carga não é excessiva, além de apresentar resistência a corrosão.

Incinerador de chama direta: Consiste de uma câmara de combustão com paredes revestidas com material refratário, um ou mais queimadores, indicador-controlador de temperatura, equipamento de segurança e algumas vezes equipamento para recuperação de calor.

Lavadores de gás: Os lavadores podem ser utilizados tanto para remoção de gases e vapores, como para remoção de material particulado. A eficiência do lavador de gás está ligada ao tipo e forma de contato do gás com o líquido, pois é esse contato que irá permitir a remoção dos contaminantes gasosos.

3.6 AMOSTRAGEM EM FONTES ESTACIONÁRIAS

Para a realização da coleta do material particulado é necessário um procedimento anterior que garanta uma amostragem significativa, uma vez que os particulados mais finos seguem as linhas de corrente, o que significa que a sucção da amostra para o sistema de amostragem deve acontecer com a mesma vazão presente na chaminé (COSTA, 1998), ou seja, a velocidade de sucção pela sonda do equipamento amostrador deve ser a mesma observada no duto durante a queima, caracterizando assim uma amostragem isocinética.

Neste trabalho, utilizamos um sistema que acompanha o equipamento de amostragem, o DataRam, que se trata de um conjunto de boquilhas com diferentes diâmetros que são selecionadas de acordo com a velocidade do ar medida no interior do duto no momento do teste, de acordo com o gráfico representado pela Figura 2.

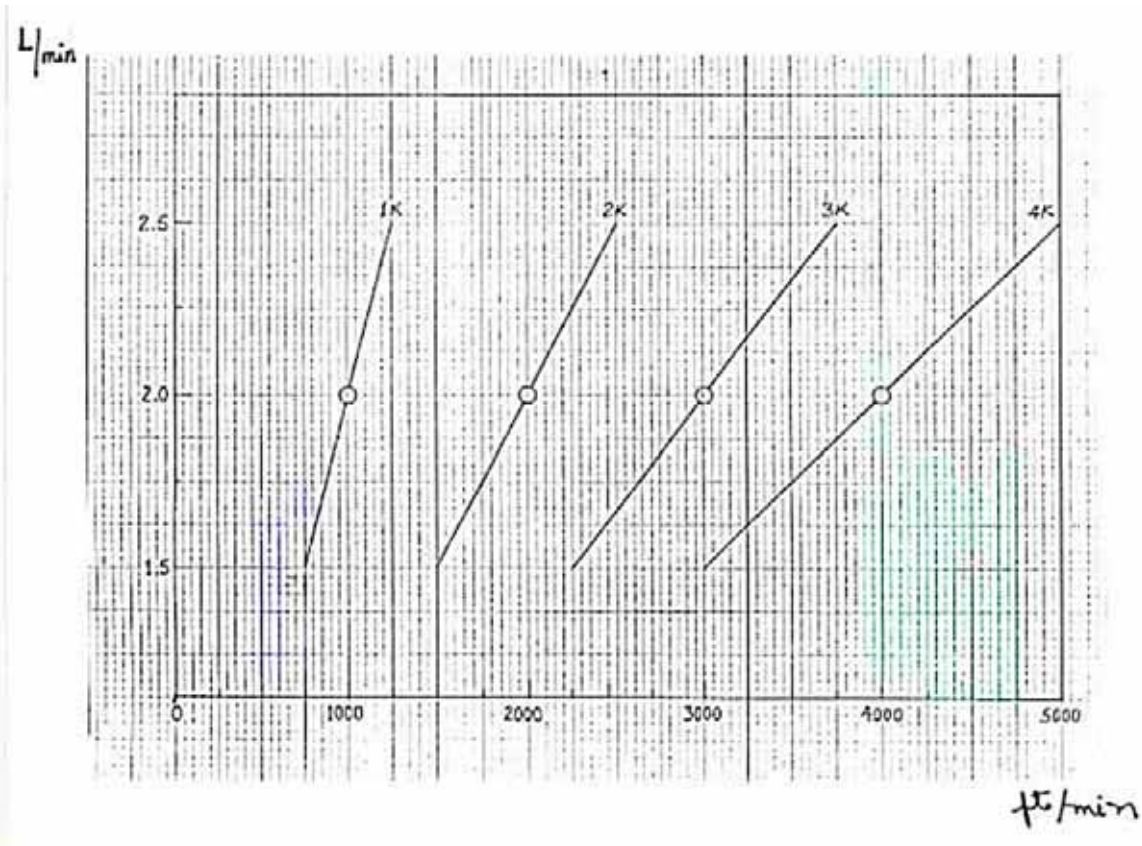


Figura 2: Gráfico para seleção de boquilhas e vazão em Litros por minuto de acordo com a velocidade em pés por minuto.

Fonte: Manual do DataRam DR4000.

A vazão também é encontrada no mesmo gráfico, sendo que este valor deve ser adicionado no DataRam antes de iniciar a amostragem.

Também deve-se considerar o poder calorífico do combustível, que pode ser definido como a quantidade de calor desprendida na sua queima completa, pois este é um parâmetro frequentemente utilizado para calcular a competitividade do combustível processado no mercado (FERNANDES et al., 2011).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de determinar as concentrações e a distribuição do tamanho do material particulado inalável e os poluentes gasosos que são emitidos na queima de resíduos da biomassa realizaram-se experimentos de queima e amostragem num queimador de biomassa da estufa de secagem a ar quente. A Figura 3 mostra esse equipamento.



Figura 3: Câmara de combustão (queimador aberto) e chaminé de amostragem acoplada à estufa de secagem a ar quente.

A Figura 4 apresenta as biomassas utilizadas durante o experimento.

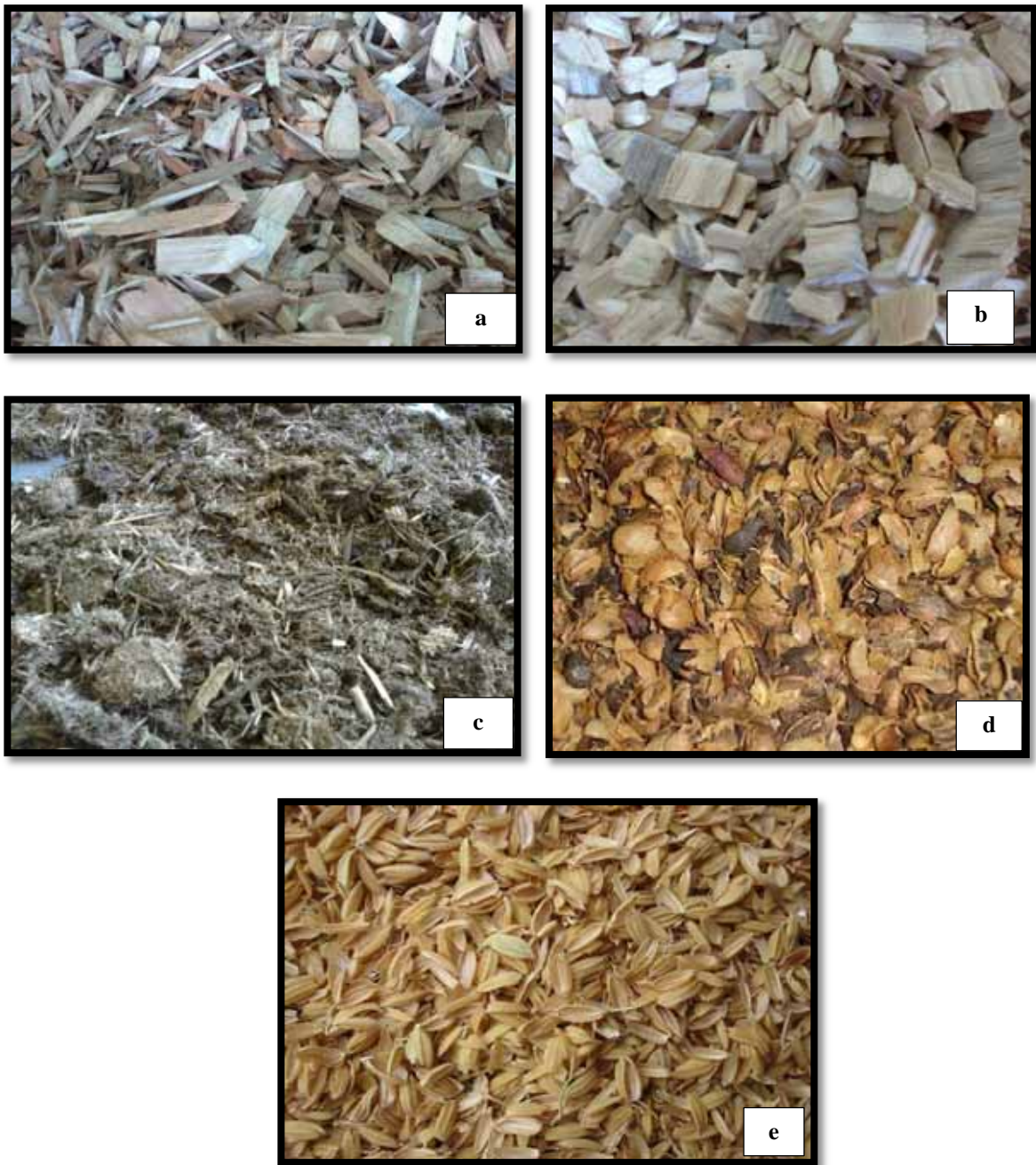


Figura 4: Biomassas utilizadas: a) Cavaco de Eucaliptus, b) Cavaco de Pinus, c) Bagaço de Cana-de-açúcar, d) Casca de Café, e) Casca de Arroz.

Os pontos de coleta foram na saída da chaminé do queimador de biomassa, sendo que cada amostragem teve duração de 30 minutos em média.

4.1 Determinação do teor de umidade e poder calorífico

Inicialmente a biomassa foi seca ao ar livre e, então, foi realizada a análise do teor de umidade (em base seca) através do método de secagem convencional em estufa, onde uma amostra do material úmido de aproximadamente 1g foi pesada

em balança analítica em cadinho seco e tarado, colocada em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ por 24 horas, e novamente pesada para cálculo do teor de umidade, com base na estabilidade de massa das amostras. O teor de umidade na base seca foi calculado de acordo com a equação 1:

$$U = \frac{P_i - P_f}{P_f} \times 100$$

Onde:

U = Teor de umidade em base seca em %,

P_i = Peso da amostra úmida em gramas,

P_f = Peso da amostra seca em gramas.

A determinação do teor de umidade foi repetida até que os resultados obtidos não diferissem um do outro em valores relativos mais que 5%.

Foram determinadas também as capacidades caloríficas das biomassas utilizadas como combustível através de uma bomba calorimétrica, que é o equipamento mais utilizado para a determinação do poder calorífico de sólidos e líquidos. As medidas foram feitas a volume constante e não existiu escoamento de combustível. Estes valores podem ser vistos na Tabela 2 na seção de resultados. Esses resultados foram comparados com o trabalho de Vieira (2012).

4.2 Equipamentos

4.2.1 DataRam4: Modelo DR4000

O DataRam4 é um equipamento capaz de fornecer o tamanho médio e as concentrações de poeira, fumaça, névoa e fumos (material particulado) em suspensão no ambiente (líquido ou sólido) ou no interior de dutos, bem como a temperatura e a umidade do fluxo gasoso. Este equipamento pode coletar partículas dispersas em correntes gasosas confinadas em dutos com o auxílio de Sonda de Amostragem Isocinética com diâmetros variando de $0,04 \mu\text{m}$ à $4 \mu\text{m}$, sendo que o aquecedor de fluxo acoplado ao equipamento permite eliminar o efeito da condensação de umidade nas partículas, evitando leituras equivocadas.

O DataRam4 (Figura 5) abrange uma ampla faixa de medição de concentração variando de $0,0001 \text{ mg/m}^3$ a 400 mg/m^3 , dada de acordo com o volume das amostras coletadas considerando uma densidade de $2,6 \text{ g/cm}^3$.

Para a amostragem isocinética do material particulado utilizou-se o sistema de sondas e bocais, como mostra a Figura 5. Na ponta da sonda acopla-se um bocal de amostragem, que varia conforme a velocidade da corrente gasosa. Com a boquilha correta se determina qual a vazão de amostragem que deve ser configurada no equipamento, garantindo assim que a amostragem seja isocinética, ou seja, o equipamento succiona o gás da corrente gasosa na mesma velocidade em que este flui dentro do simulador de chaminé industrial.



Figura 5: DATARAM acoplado à sonda de amostragem e bocais para amostragem.

Para a escolha do bocal de amostragem correto que deve ser utilizado no equipamento de amostragem, para cada teste determinou-se a velocidade do ar no interior da chaminé através de um termoanemômetro. Com a velocidade encontrada calculou-se, então, a vazão de amostragem isocinética e a boquilha correta para o teste, a qual foi programada no DATARAM4 de acordo com o gráfico representado pela Figura 2.

Junto ao equipamento também usa-se um aquecedor, que eleva a temperatura do ar que passa através dele, evaporando a água que pode estar presente nas partículas devido a umidade do material e da própria reação de combustão. A presença da água ao redor das partículas pode afetar a leitura dos diâmetros, por isso o uso desse acessório é imprescindível.

4.2.2 Eurotron: Ecoline 4000

O Eurotron Ecoline 4000 representado na Figura 6 é um equipamento para amostragem de poluentes gasosos, onde a amostra de gás é succionada através da sonda por uma bomba interna ao instrumento alimentada com uma tensão constante. Sua atuação é feita através de sensores:

O sensor de oxigênio (O_2) é uma célula eletroquímica, com dois eletrodos imersos em uma solução eletrolítica. A medição dos gases poluentes (CO , NO , NO_2 e SO_2) também usam sensores eletroquímicos que garantem resultados precisos se utilizados em um intervalo máximo de 60 minutos.



Figura 6: Eurotron Ecoline 4000 para amostragem de gases.

A temperatura dos gases da combustão, medida na extremidade de sonda, e do ar de queima são usados juntamente com a concentração dos gases para o cálculo da eficiência, excesso de ar e a concentração de CO_2 .

O instrumento utiliza parâmetros de até dez tipos diferentes de combustíveis, que são utilizados para os cálculos em acordo com a norma DIN33962.

4.2 Amostragens

Antes do início dos testes realizou-se as medições necessárias para a amostragem em pontos múltiplos de acordo com a Norma Técnica L9.221 da CETESB(1990) para poluentes particulados, como mostra a Figura 7.

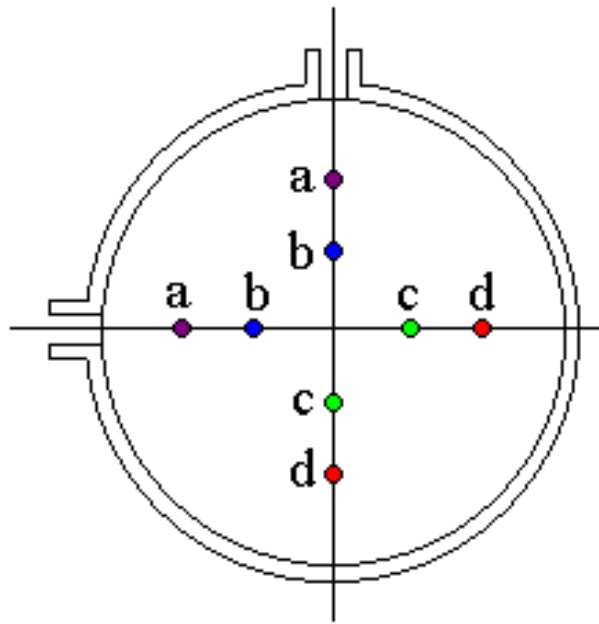


Figura 7: Representação dos pontos de amostragem.

Depois da determinação do teor de umidade e do poder calorífico das biomassas utilizadas, antes do início de cada teste, com o auxílio de um termoanemômetro, realizou-se a medida de velocidade do fluxo gasoso no interior do duto, para que, como citado anteriormente, pudéssemos selecionar a boquilha adequada, sendo que em todos os testes realizados, mesmo com alguma variação de velocidade, esta ficou entre 2500 e 3000 ft/min, sendo que a boquilha selecionada foi a 3K (Figura 5) e de acordo com o gráfico da Figura 2, a vazão utilizada foi de 1,6 a 1,8L/min.

Utilizou-se também filtros que possibilitaram a amostragem de partículas somente na faixa dos particulados finos, ou seja, com diâmetro inferior a $2,5\mu\text{m}$.

Com a boquilha já acoplada a sonda, dava-se início a queima, colocando a sonda na posição (a) da Figura 7, e permanecia-se no mesmo ponto por 3 minutos, passando então para o ponto seguinte, até que todos os pontos fossem amostrados.

Enquanto a sonda do DataRam estava acoplada em um dos orifícios da chaminé, no outro estava acoplada a sonda do Eurotron, que por sua vez ficava fixo numa mesma posição, cerca de $1/3$ do diâmetro da chaminé, e que antes do início da amostragem era preparado com a seleção em seu visor do combustível que seria utilizado.

Ao final de aproximadamente 30 minutos os aparelhos eram retirados para realização da coleta dos dados. Cada aparelho possui seu próprio *software* para aquisição dos dados e a partir desses realizou-se o tratamento dos gases para material particulado e gases.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente serão apresentados e discutidos os resultados de poder calorífico e umidade do material avaliado como combustível. A Tabela 5 evidencia os valores obtidos e a Tabela 6 apresenta os resultados encontrados por Vieira (2012).

Tabela 5: Valores de poder calorífico em Joules por grama e umidade das amostras em porcentagem.

Biomassa	Poder calorífico (J/g)	Umidade média relativa (%)
<i>Corymbia citriodora</i>	18966	11,8
Casca de arroz	14341	11,6
<i>Pinus spp</i>	18113	11,8
Bagaço de cana-de-açúcar	15958	10,5
Casca de café	18610	17,2

Tabela 6: Valores de Poder Calorífico Superior.

Biomassa	PCS (KJ.kg⁻¹)
Bagaço de Cana	8903,40
Lenha	12958,00
Casca de Arroz	16775,60
Restos de Algodão	16775,60
Eucalipto	18420,00
Sabugo de Milho	18972,60
Cascas de Castanhas	20470,30
Madeira Picada	20470,30
Carvão	30900,00

Fonte: Vieira (2012).

Os resultados obtidos do poder calorífico dos combustíveis utilizados neste trabalho ficaram próximos dos resultados de Vieira (2012) e a casca de arroz foi a que apresentou menor poder calorífico.

As Figuras 8 a 13 apresentam a variação da concentração do material particulado em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em função do tempo de amostragem em minutos.

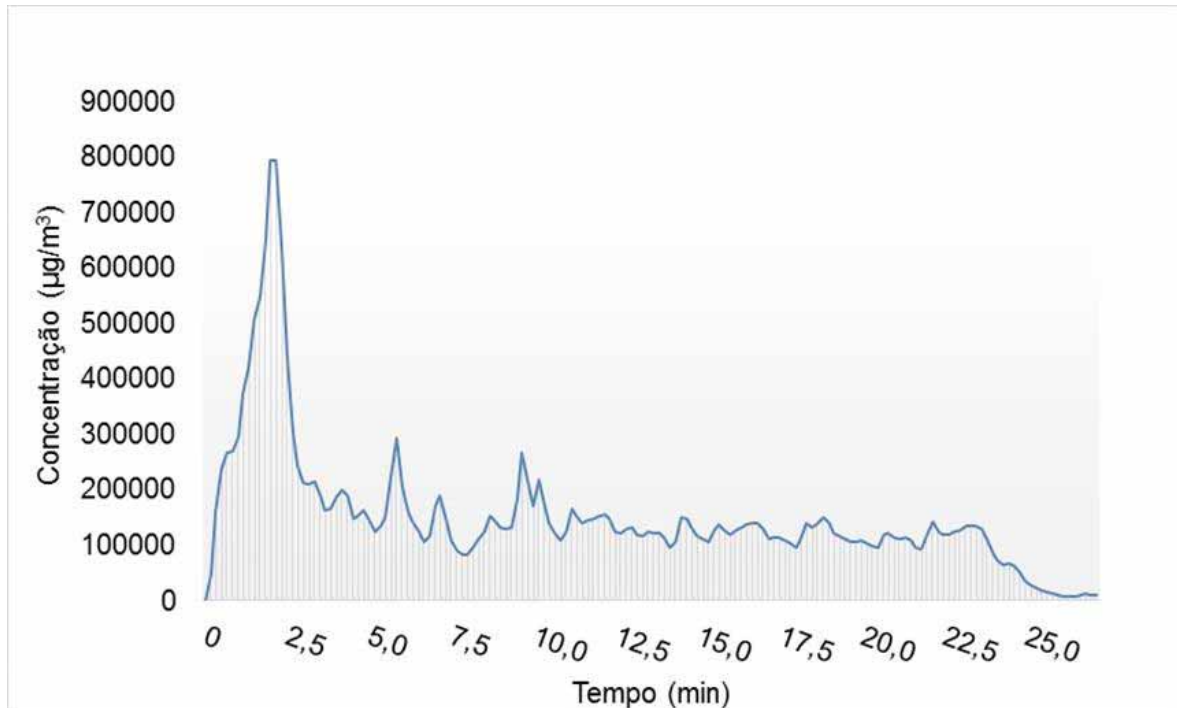


Figura 8: Concentração de partículas em função do tempo de amostragem – combustível Cana-de-açúcar - teste 1.

Na Figura 8 observa-se um pico com concentração de $794.041,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ logo no segundo minuto de queima de bagaço de Cana-de-açúcar, ou seja, na fase de chama, sendo que o valor médio foi de $150.791,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Na Figura 9, verificamos que o valor médio de concentração foi de $18.532,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, porém alcançou-se um valor máximo de $87.198,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no tempo de 1,3 minutos.

Os valores mais elevados de concentração se deram inicialmente na fase de chama, e aos 5 minutos houve uma queda devido a alimentação de combustível pela rosca transportadora, que diminuiu a alimentação nesse período voltando a alimentar normalmente aos 7,5min, provocando novamente a fase de chama, elevando a concentração de material particulado. A partir dos 15min se iniciou a fase de incandescência, diminuindo drasticamente os valores.

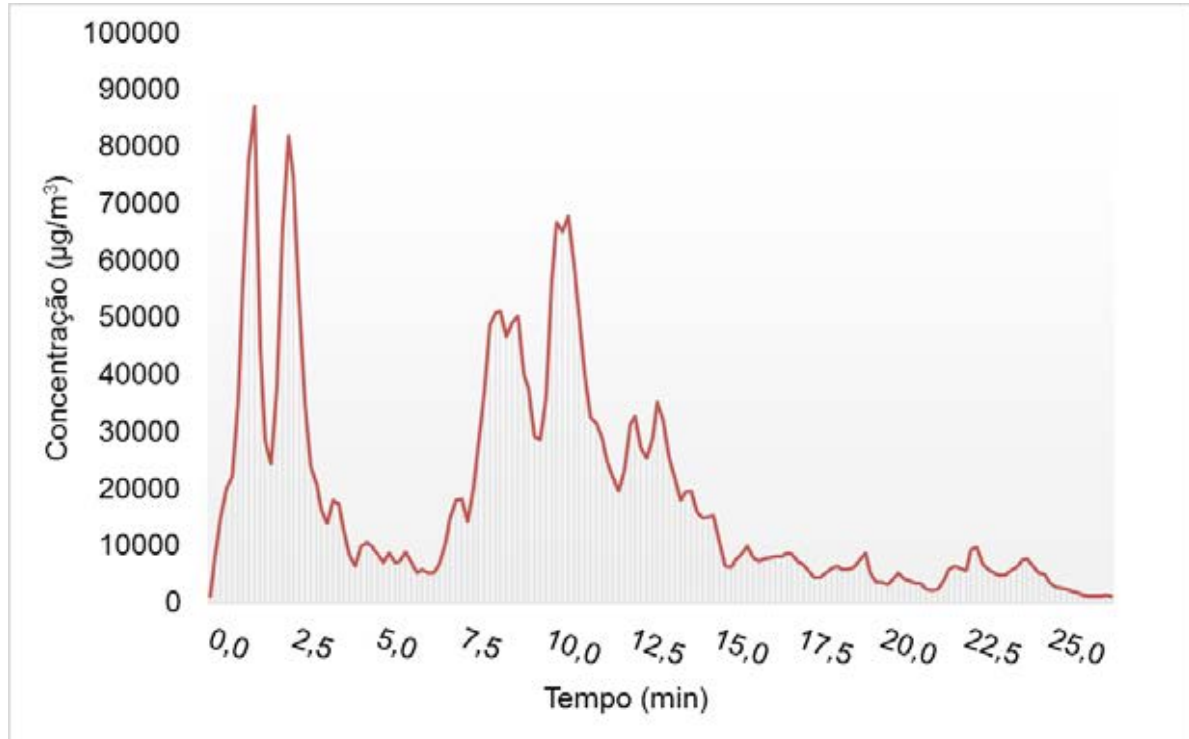


Figura 9: Concentração de partículas em função do tempo de amostragem – combustível Cana-de-açúcar - teste 2.

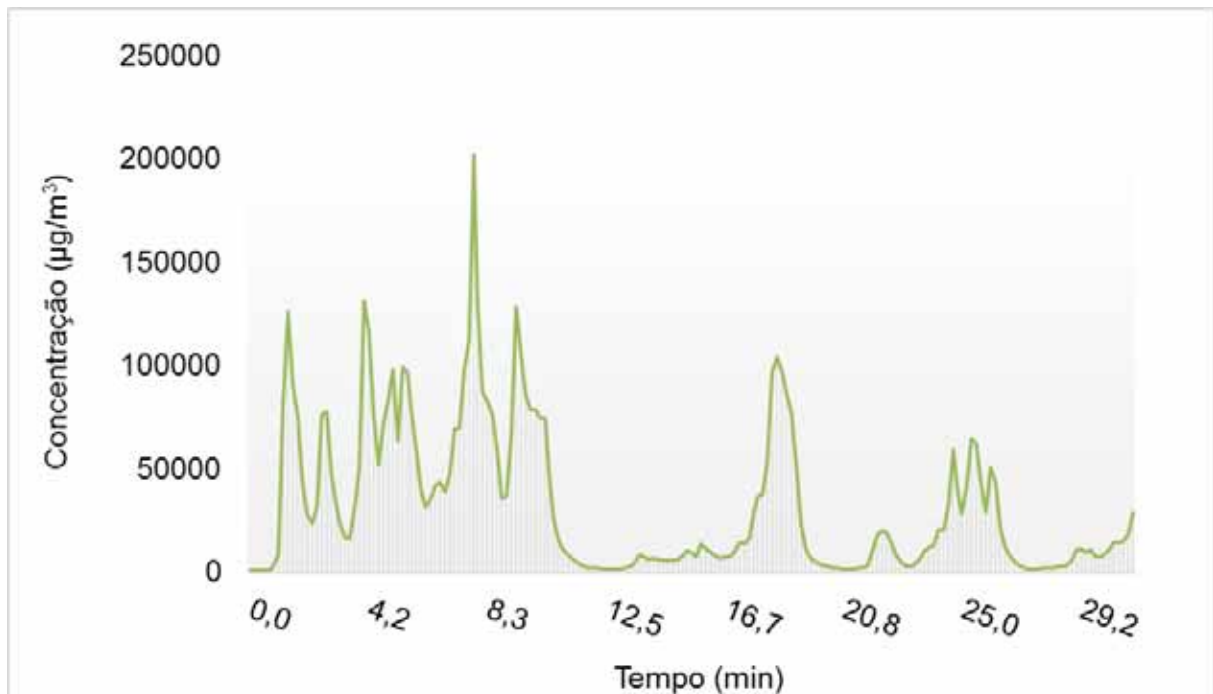


Figura 10: Concentração de partículas em função do tempo de amostragem – combustível Casca de Arroz.

Para a queima de casca de arroz a maior concentração obtida foi de 201.882,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no instante de 7,8 minutos conforme a Figura 10, e o valor médio ficou em 32.052,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nesta figura observamos um comportamento semelhante ao encontrado na queima de cana de açúcar da Figura 9. Os maiores valores foram identificados na fase de chama e queda de concentração na fase de incandescência, com o aparecimento de elevações devido a forma de alimentação no queimador.

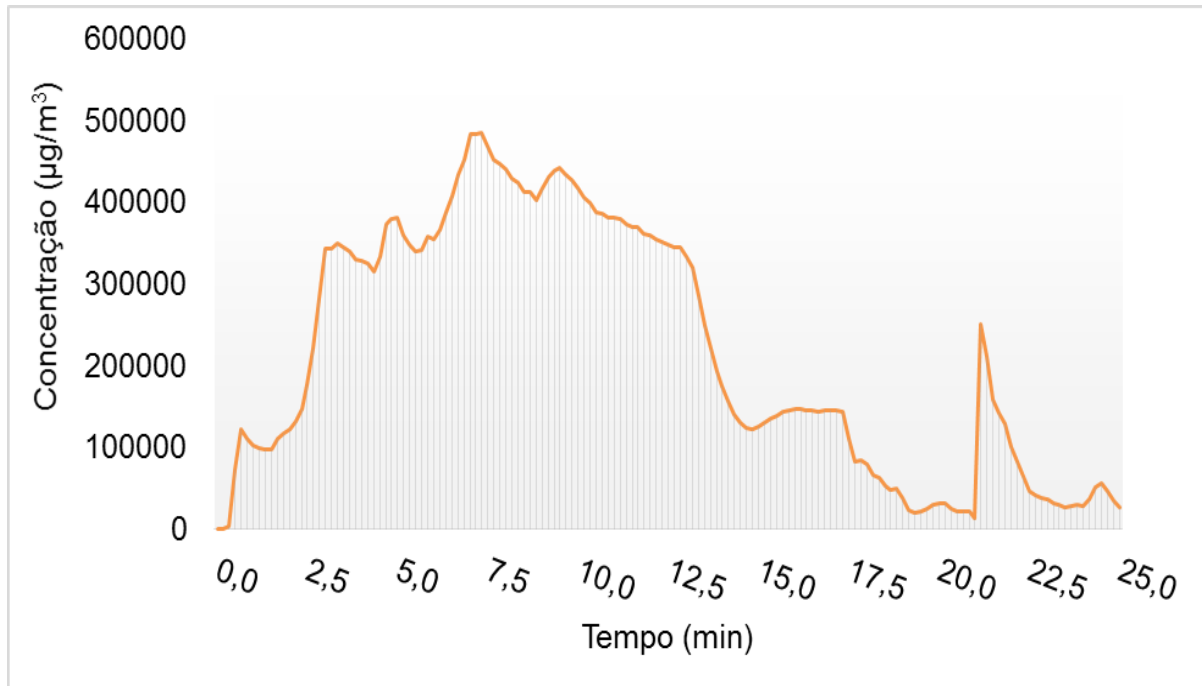


Figura 11: Concentração de partículas em função do tempo de amostragem – combustível Casca de Café.

Na Figura 11 temos a concentração para o teste com casca de café, onde a média foi de 216.126,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, porém com um valor máximo de 485.119,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em 7,3 minutos. A fase de chama para a casca de arroz durou cerca de 10min, sendo que a partir dos 12,5min a concentração decaiu, mas aos 20min houve um salto brusco, típico de um aumento na alimentação de biomassa, fazendo que a chama voltasse por pouco tempo.

Para a queima de cavaco de Eucalipto, observamos na Figura 12 que as maiores concentrações se deram logo no início do teste, alcançando um pico de 558.073,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em 4,2 minutos, e o valor médio foi de 112.092,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. O teste com cavaco de Eucalipto foi o que apresentou uma maior homogeneidade em relação a alimentação de combustível, e as fases da combustão podem ser claramente definidas de acordo com os níveis de concentração. A fase de ignição durou cerca de 1min, a

fase de chama se estendeu até aproximadamente 8min e em seguida se iniciou a fase de incandescência com concentrações inferiores.

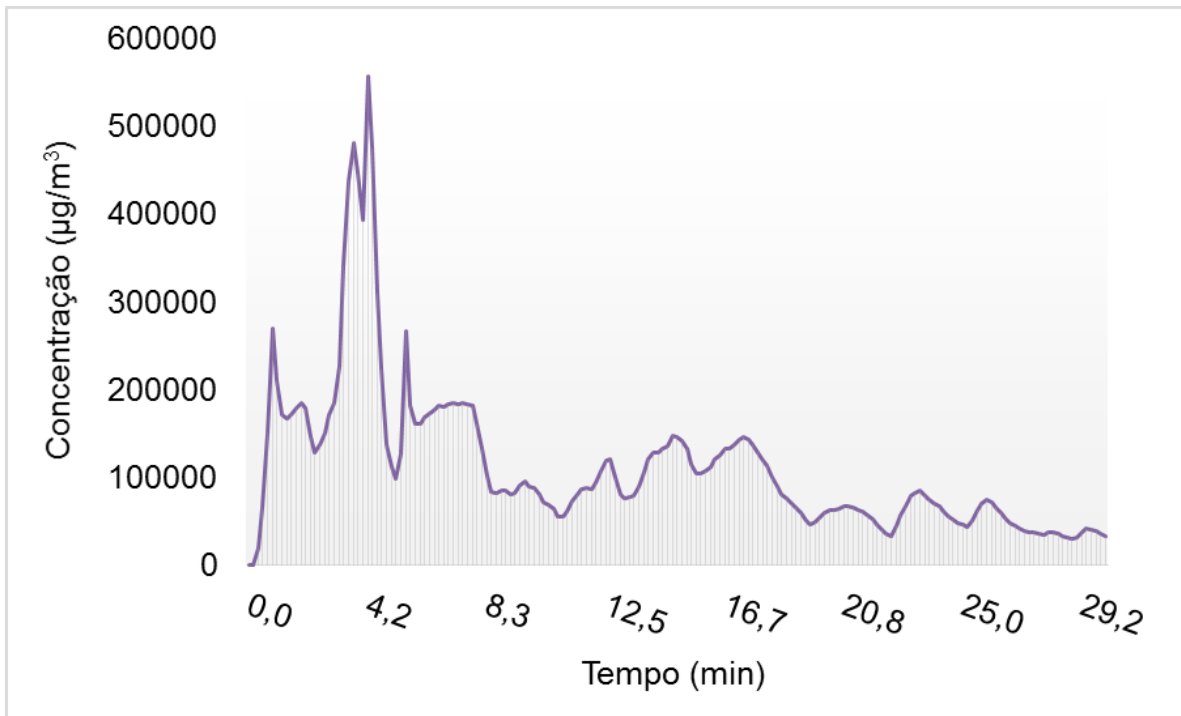


Figura 12: Concentração de partículas em função do tempo de amostragem – combustível Cavaco de Eucaliptus.

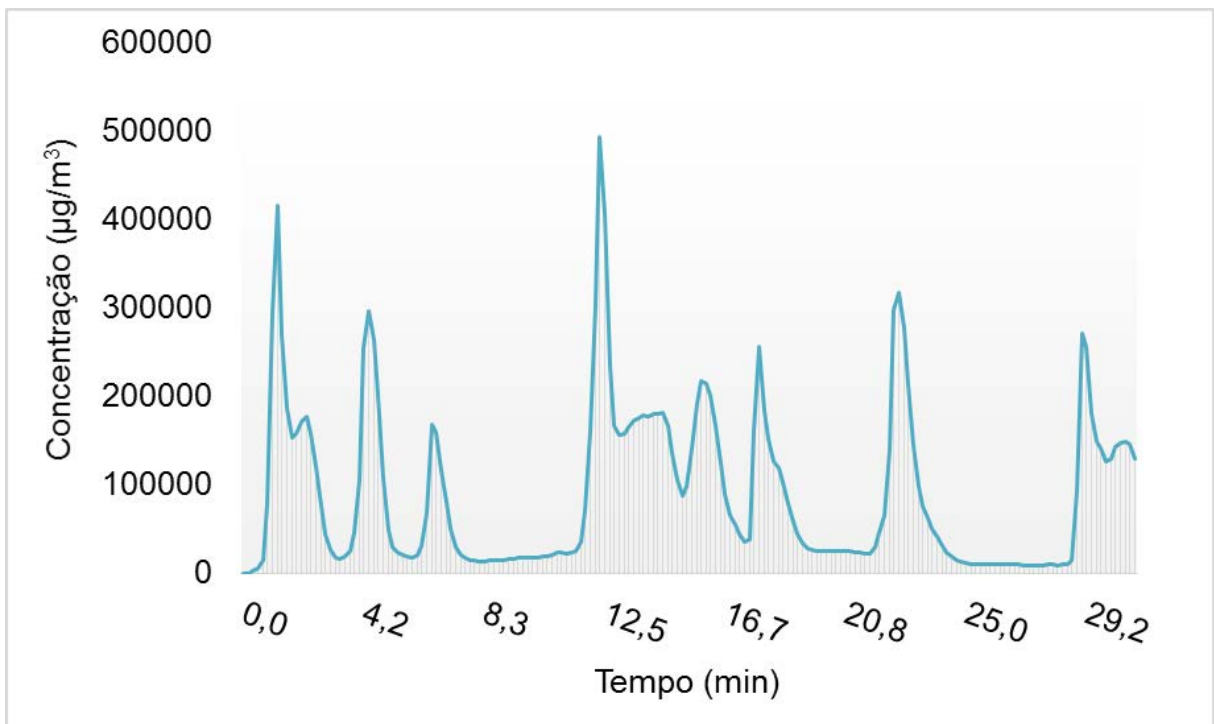


Figura 13: Concentração de partículas em função do tempo de amostragem – combustível Cavaco de Pinus.

No caso do teste com Pinus, na Figura 13 temos que os valores oscilaram numa média de $89.861,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, com um valor máximo de $492.742,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em 12,3 min. Já o cavaco de Pinus foi o que mais apresentou variação de concentração, apresentando picos e vales do início ao fim do teste.

Concentrações mais elevadas na fase de chama também foram constatadas por Soares Neto et al, 2009, com valores de $21.450 \mu\text{g}/\text{m}^3$, porém este valor aproximou-se somente dos valores médios encontrados para casca de arroz com $32.052,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e bagaço de cana de açúcar – teste 2 com $18.532,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Já Kura(2010), alcançou em seu experimento uma concentração de $350.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na fase de chama, sendo este um valor mais próximo dos encontrados neste trabalho para casca de café, eucalipto e pinus.

Em todos os testes a concentração das partículas tendeu a diminuir no decorrer do processo de combustão, assim como constatado por Hosseini et al. (2010) e Costa et al. (2012).

Essas concentrações estão muito acima dos limites permitidos, segundo a legislação, que determina um valor de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em uma média de vinte e quatro horas, portanto, observando cada ponto, temos que as medidas estão muito acima do estipulado pelas normas. Claramente vemos que utilizando um combustível alternativo, como a biomassa, as emissões são danosas e quantitativamente acima do permitido pelos padrões da qualidade do ar, sendo assim as indústrias que utilizam esses tipos de combustíveis devem utilizar equipamentos adequados ao controle destes poluentes, principalmente quando avaliamos os resultados da distribuição de tamanho destas emissões.

Um dos itens mais importantes a ser considerado em relação ao material particulado é o diâmetro da partícula, assim, utilizamos no DataRam um filtro para amostrar especificamente àquelas menores de $2,5 \mu\text{m}$, que são consideradas as mais prejudiciais ao meio ambiente e ao corpo humano.

As Figuras 14 a 25 apresentam os gráficos das concentrações de material particulado de acordo com os diâmetros encontrados e a variação do diâmetro em função do tempo de amostragem.

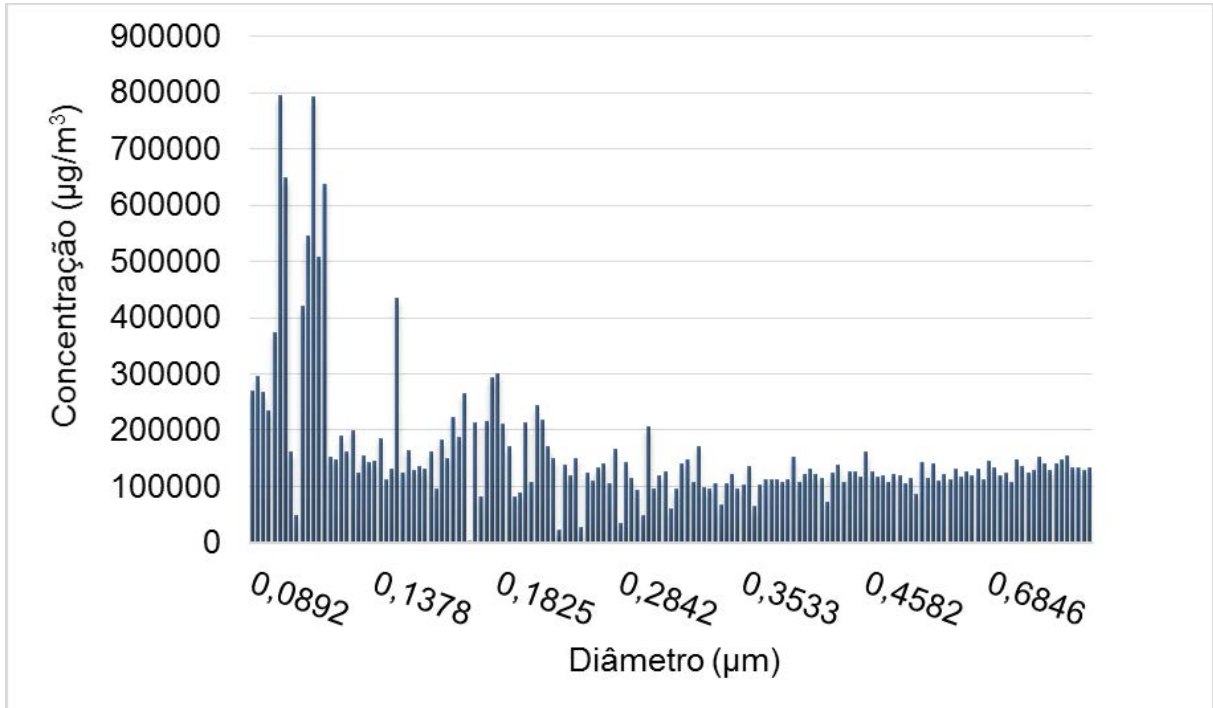


Figura 14: Concentração em função do diâmetro das partículas – combustível Cana de açúcar – teste 1.

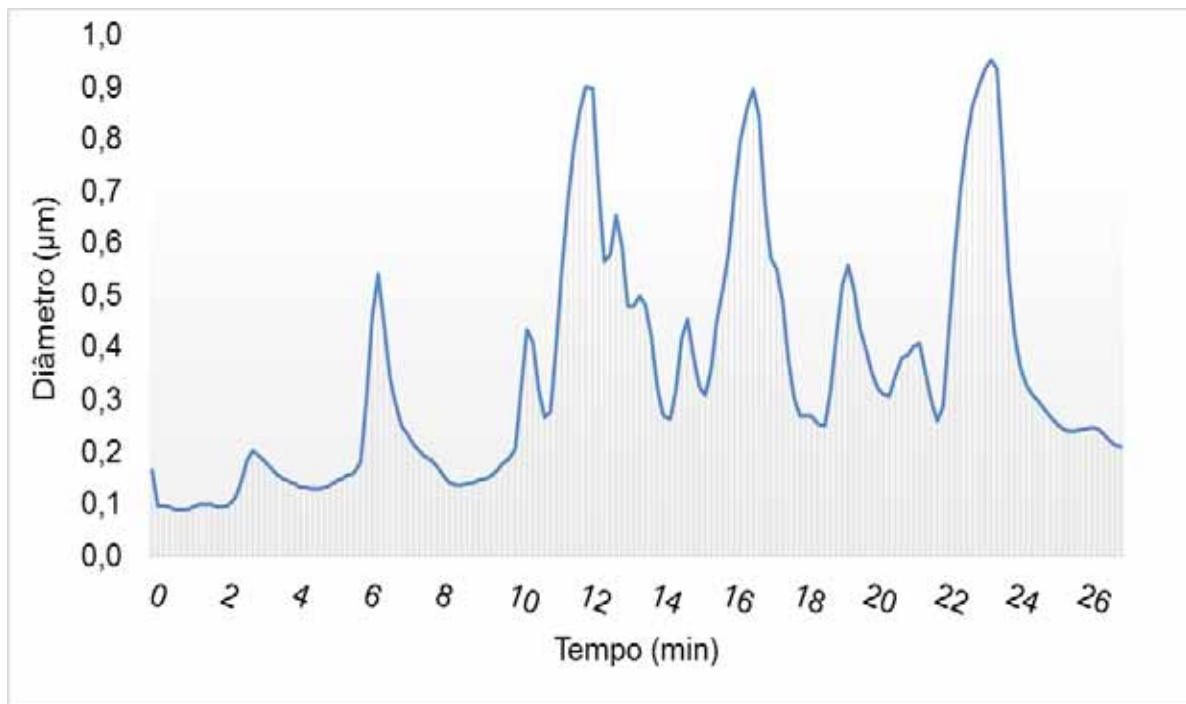


Figura 15: Diâmetro das partículas em função do tempo – combustível Cana de açúcar – teste 1.

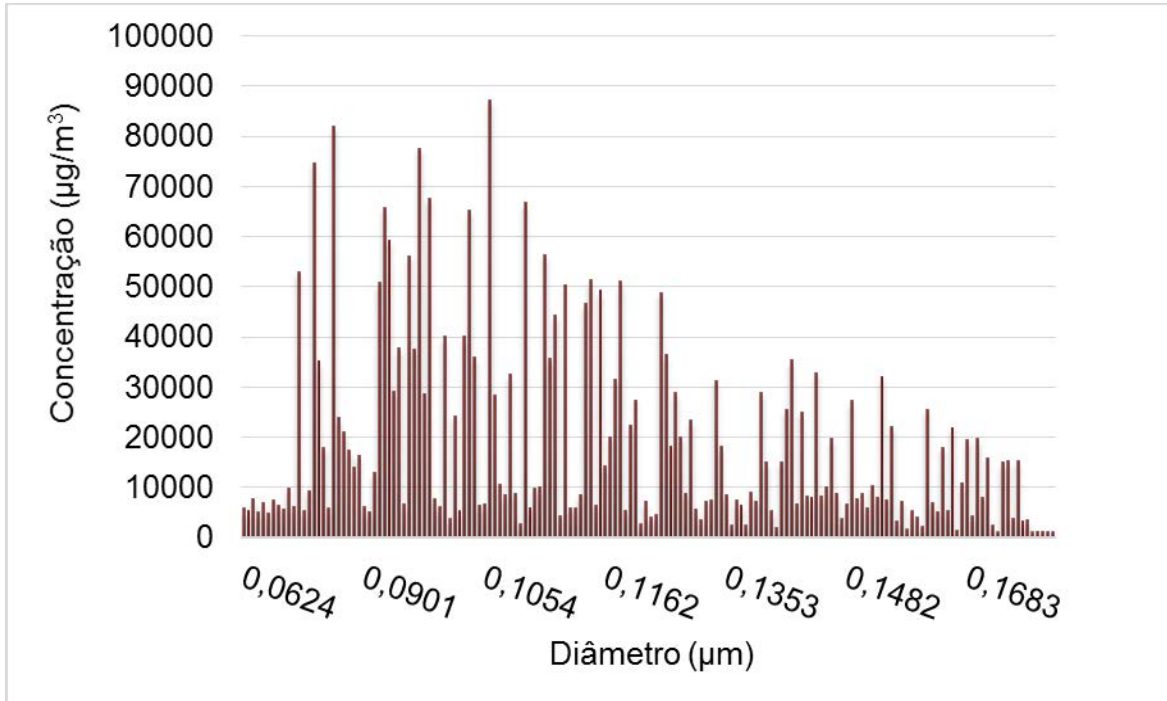


Figura 16: Concentração em função do diâmetro das partículas – combustível Cana de açúcar – teste 2.

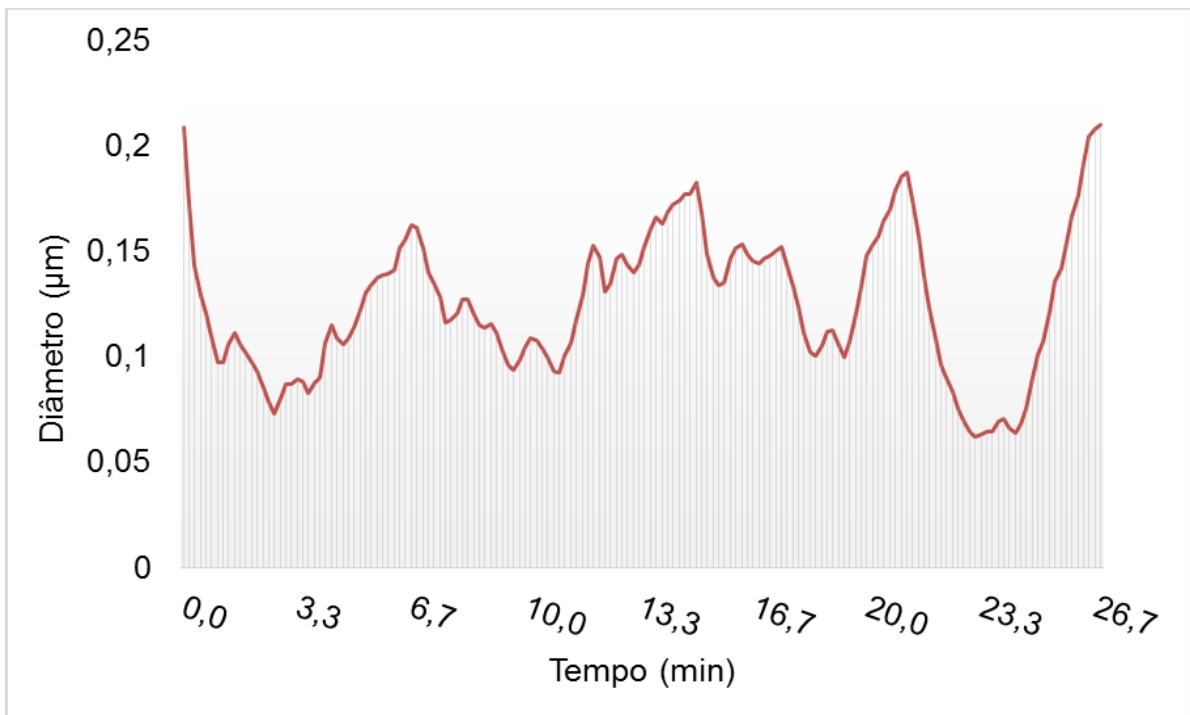


Figura 17: Diâmetro das partículas em função do tempo – combustível Cana de açúcar – teste 2.

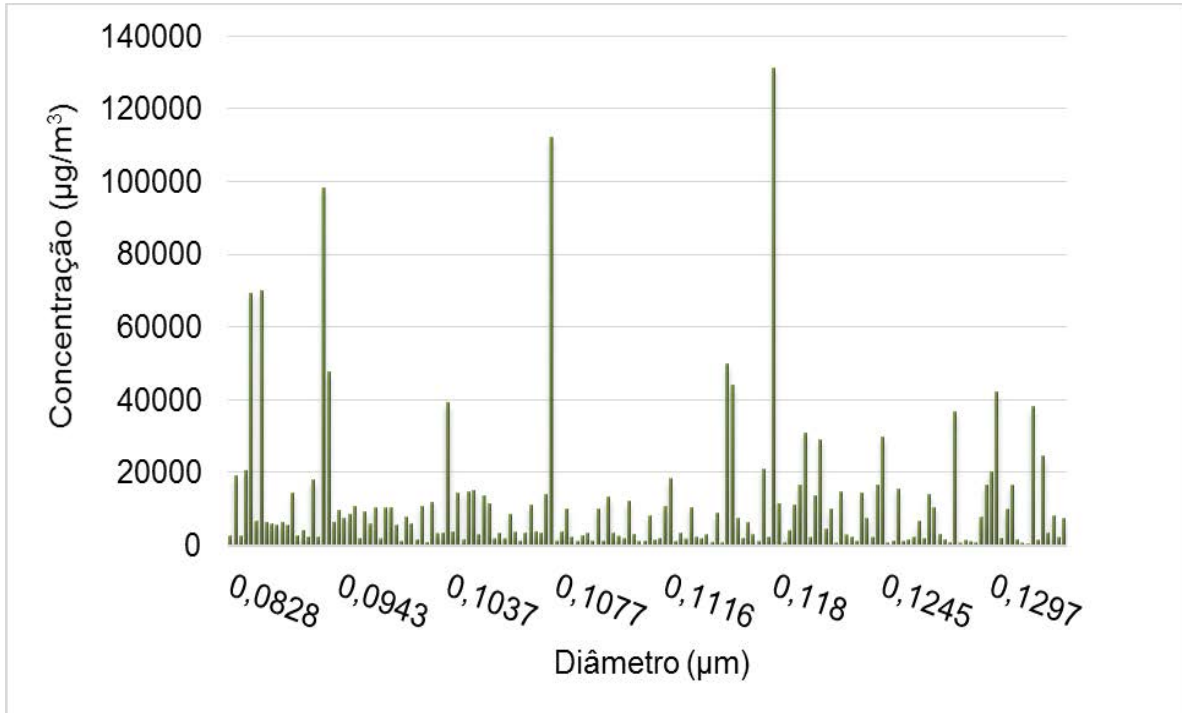


Figura 18: Concentração em função do diâmetro das partículas – combustível Casca de Arroz.

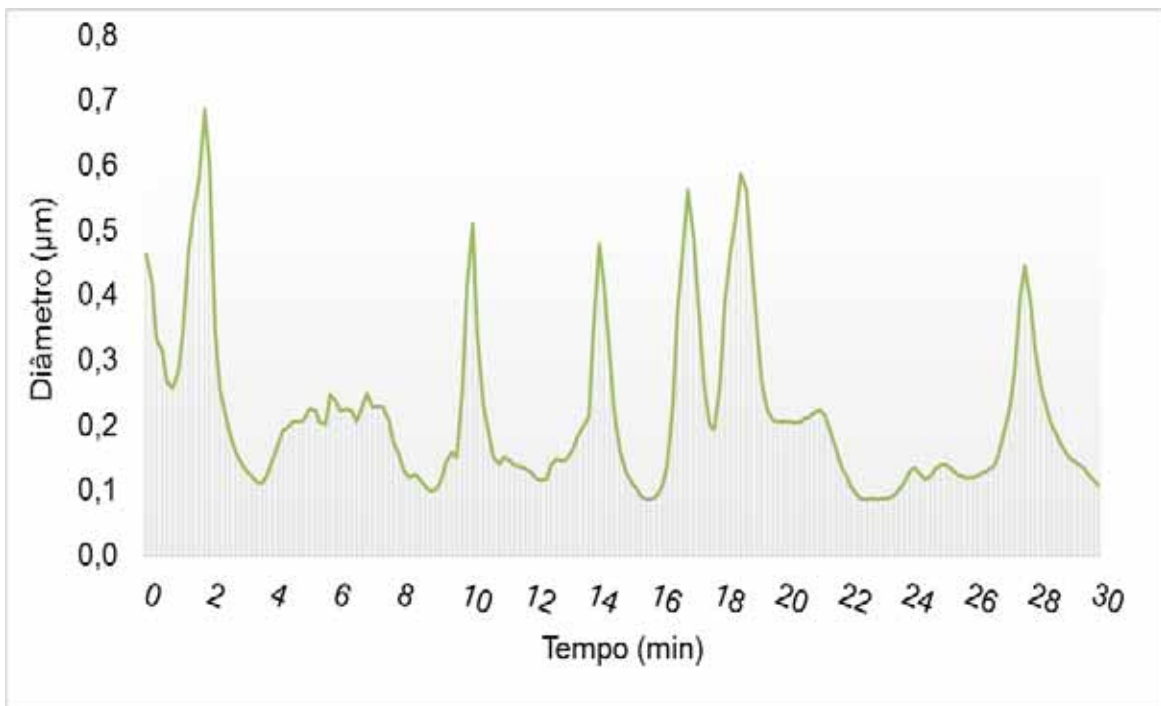


Figura 19: Diâmetro das partículas em função do tempo – combustível Casca de Arroz.

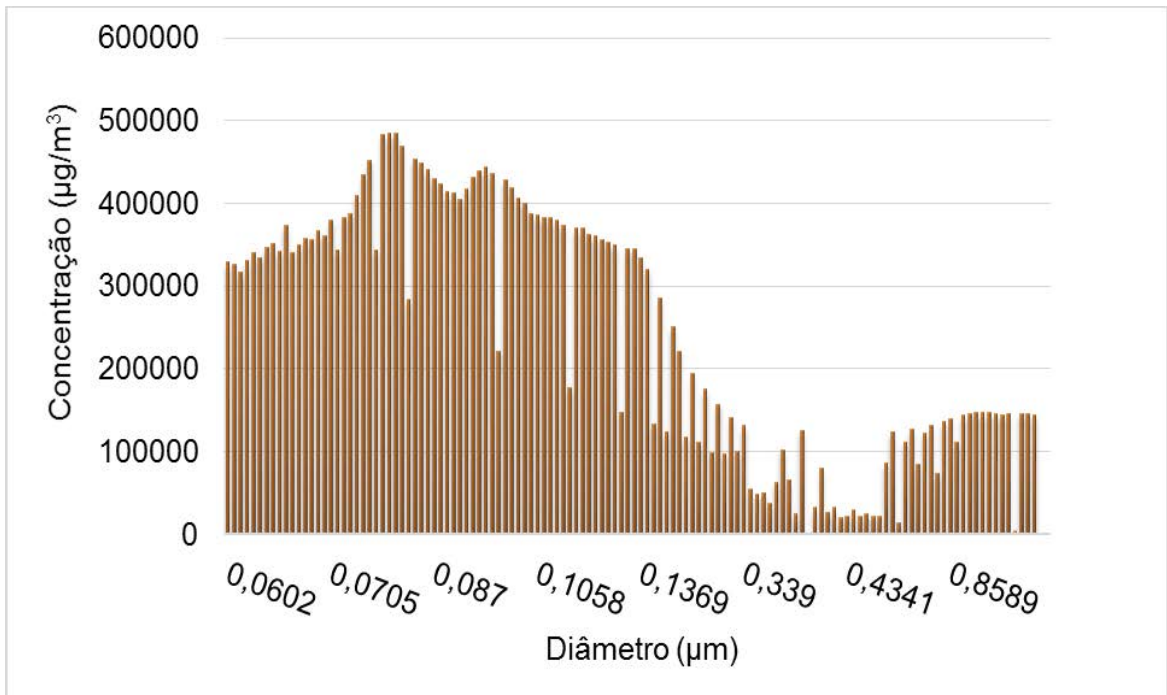


Figura 20: Concentração em função do diâmetro das partículas – combustível Casca de Café.

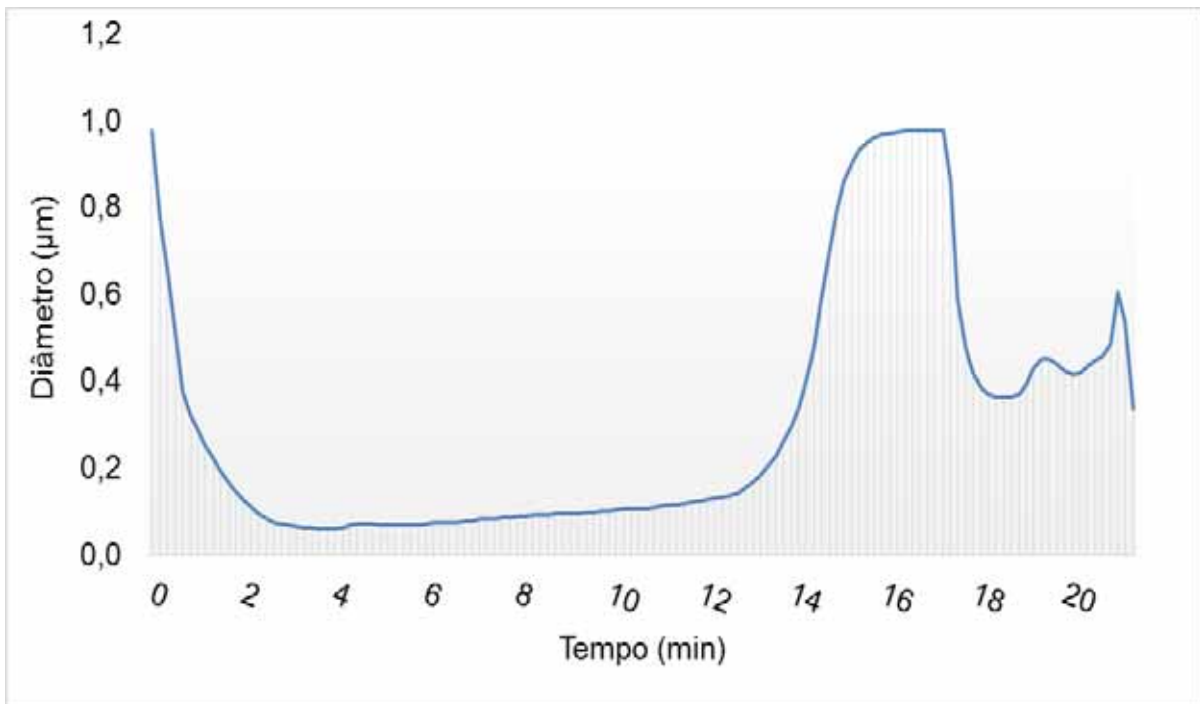


Figura 21: Diâmetro das partículas em função do tempo – combustível Casca de Café.

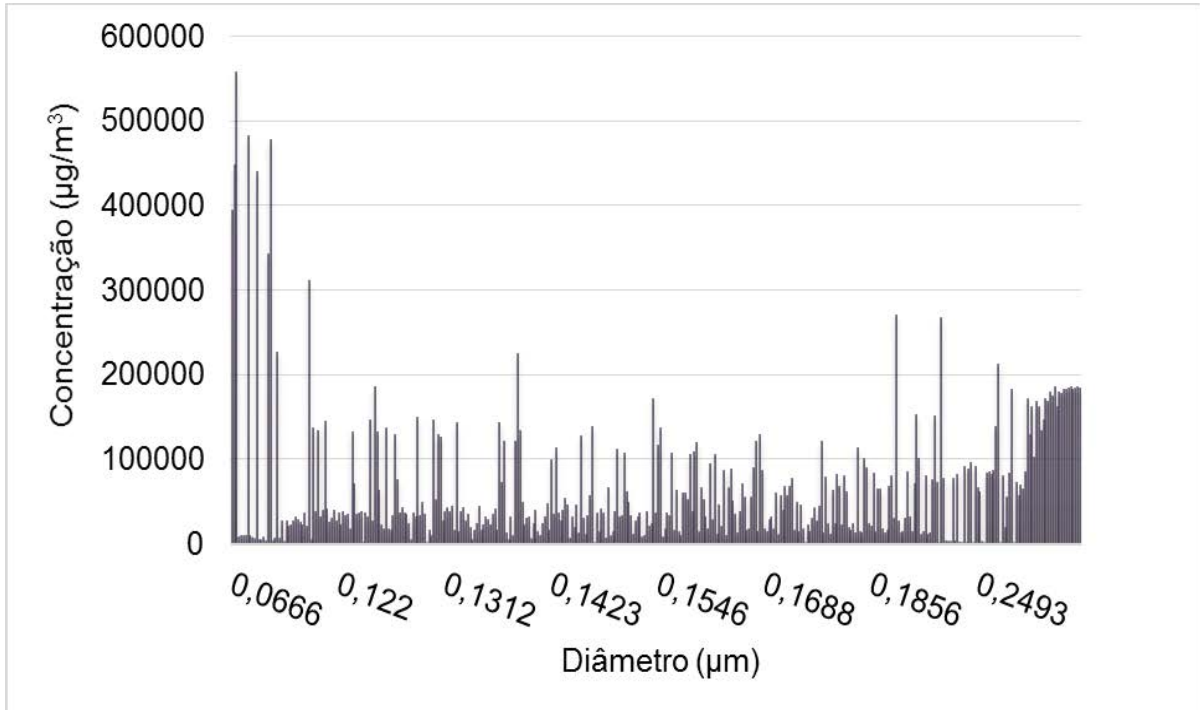


Figura 22: Concentração em função do diâmetro das partículas – combustível Cavaco de Eucalipto.

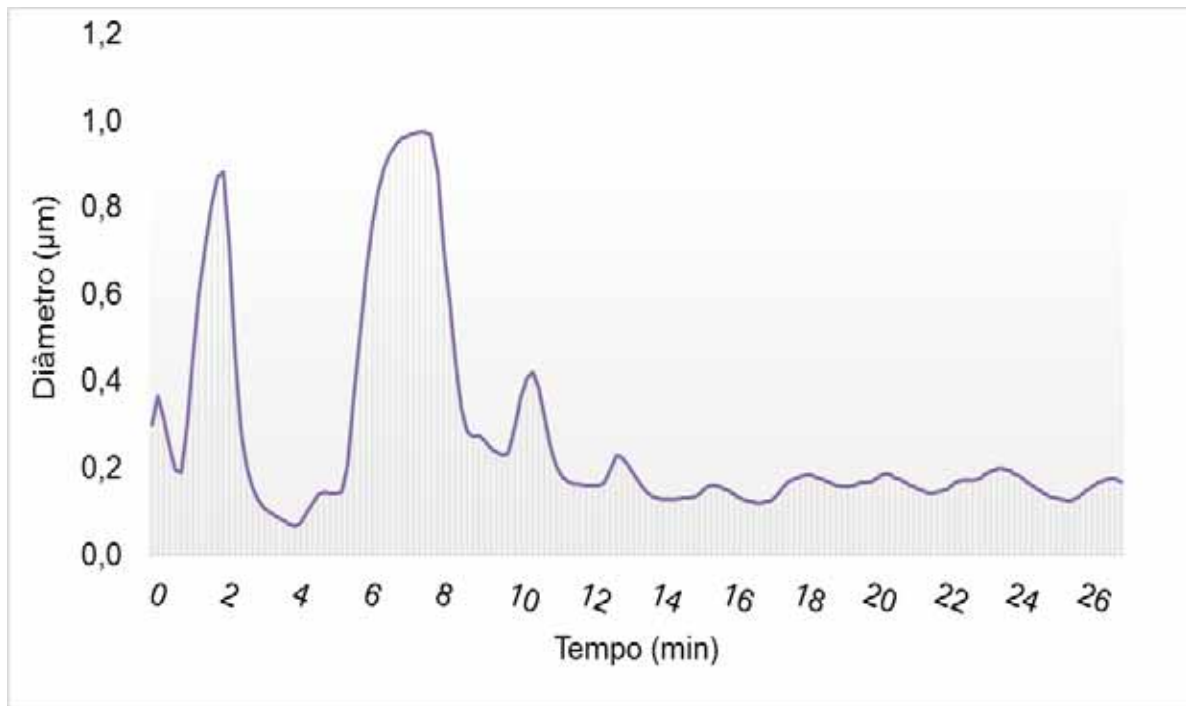


Figura 23: Diâmetro das partículas em função do tempo – combustível Eucalipto.

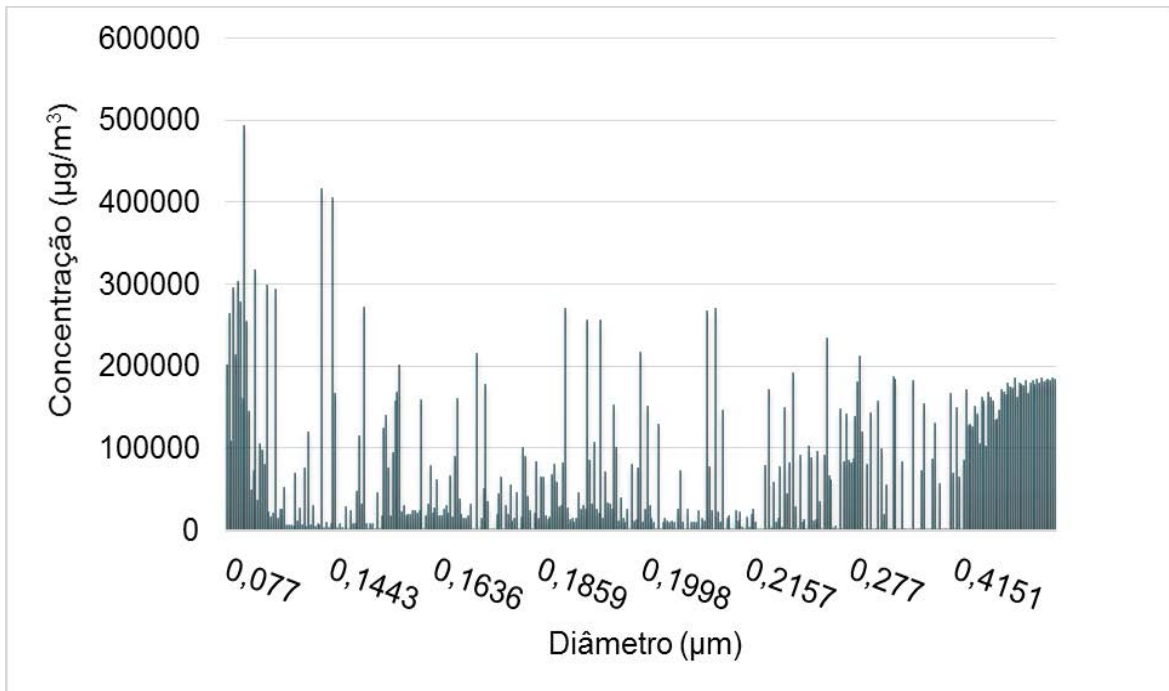


Figura 24: Concentração em função do diâmetro das partículas – combustível Cavaco de Pinus.

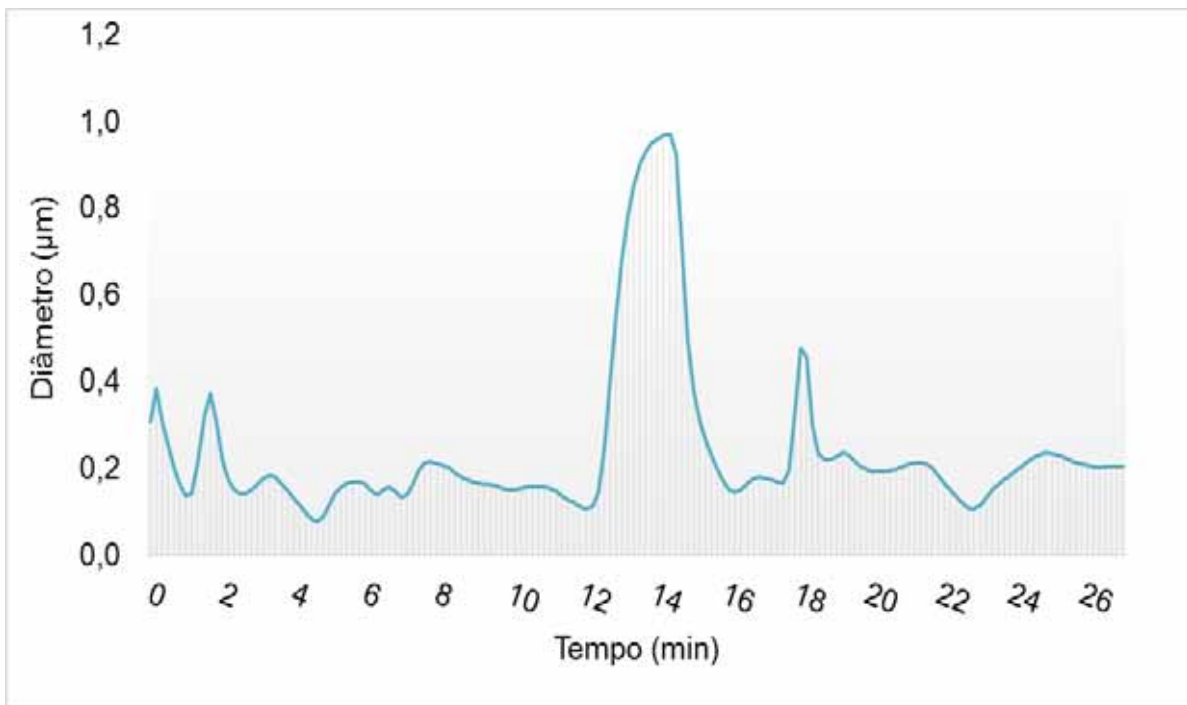


Figura 25: Diâmetro das partículas em função do tempo – combustível Pinus.

Podemos notar que as faixas de diâmetros encontradas ficaram abaixo de 1 μm , sendo que na maioria dos casos, as maiores concentrações se deram para os menores diâmetros. Sendo que para cana de açúcar a maior concentração no teste 1 foi para o diâmetro de 0,0946 μm , para o teste 2, 0,1058 μm , para o arroz de 0,1391

μm , casca de café para o diâmetro de $0,078 \mu\text{m}$, cavaco de eucalipto $0,0750 \mu\text{m}$, e para pinus, a maior concentração foi para o diâmetro de $0,1127 \mu\text{m}$.

De acordo com Costa et al. (2012), os diâmetros emitidos durante a fase de chama foram de $0,06$ a $0,25 \mu\text{m}$ e na fase de incandescência de $0,10$ a $0,80 \mu\text{m}$, ou seja, ou seja, diâmetros menores na fase de chama e maiores na incandescência, comportamento este observado nos testes com cana – teste1, casca de café e pinus.

Kura(2010) relatou que as maiores concentrações encontradas foram para diâmetros de aproximadamente $0,2 \mu\text{m}$, já neste trabalho observamos que as concentrações mais elevadas deram-se para diâmetros de $0,1 \mu\text{m}$ em média.

Observa-se que a distribuição de tamanho ficou muito abaixo de $2,5 \mu\text{m}$ para todos os testes realizados, sendo que nesta faixa de diâmetro este poluente é extremamente danoso à saúde humana e ao clima. Para os processos industriais a coleta deste poluente particulado é complexa e exige equipamentos com alta eficiência de coleta.

Para a avaliação dos gases emitidos, utilizamos o Eurotron (Ecoline 4000) acoplado à chaminé durante a queima dos combustíveis citados. Nas Figuras 26 e 27 são apresentadas as variações da concentração de gás carbônico (CO_2) durante a queima de cana de açúcar – teste 1 e arroz, respectivamente, onde observa-se que a faixa encontrada foi de 0 a $2,5\%$, sendo que a emissão de CO_2 tem comportamento semelhante a emissão de material particulado, com maiores concentrações na fase de chama e queda na fase de incandescência. Essas emissões também sofrem o efeito da alimentação incostante apresentando picos e vales.

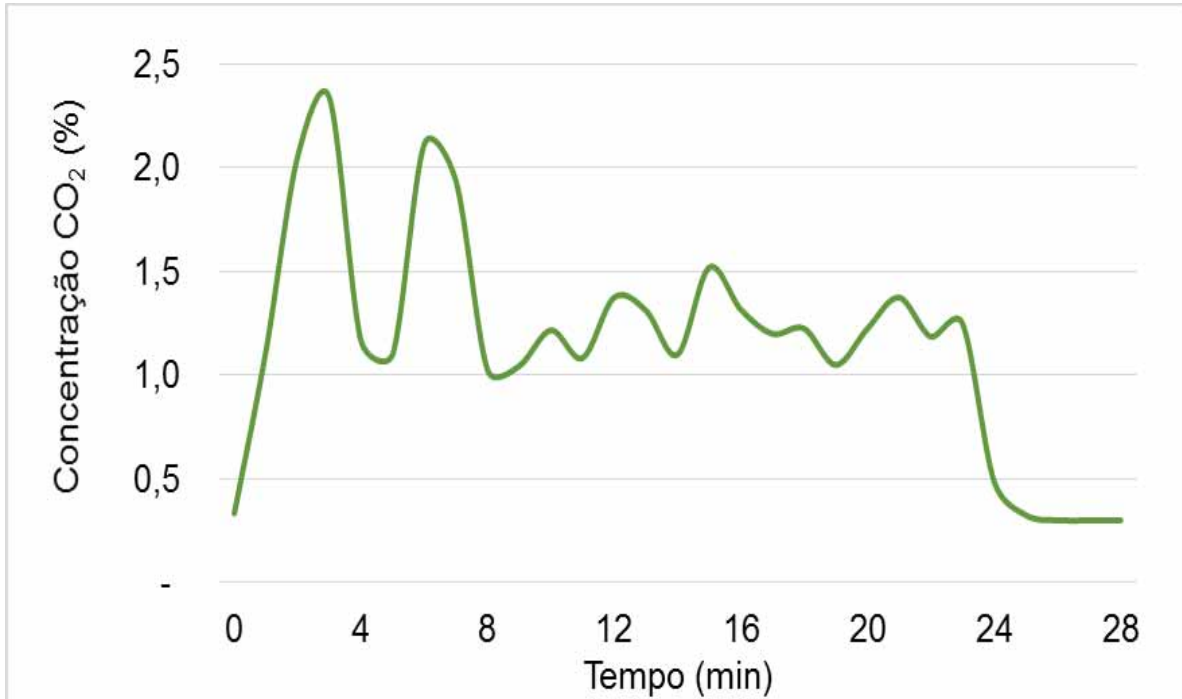


Figura 26: Concentração de CO₂ em função do tempo - combustível Cana de Açúcar.

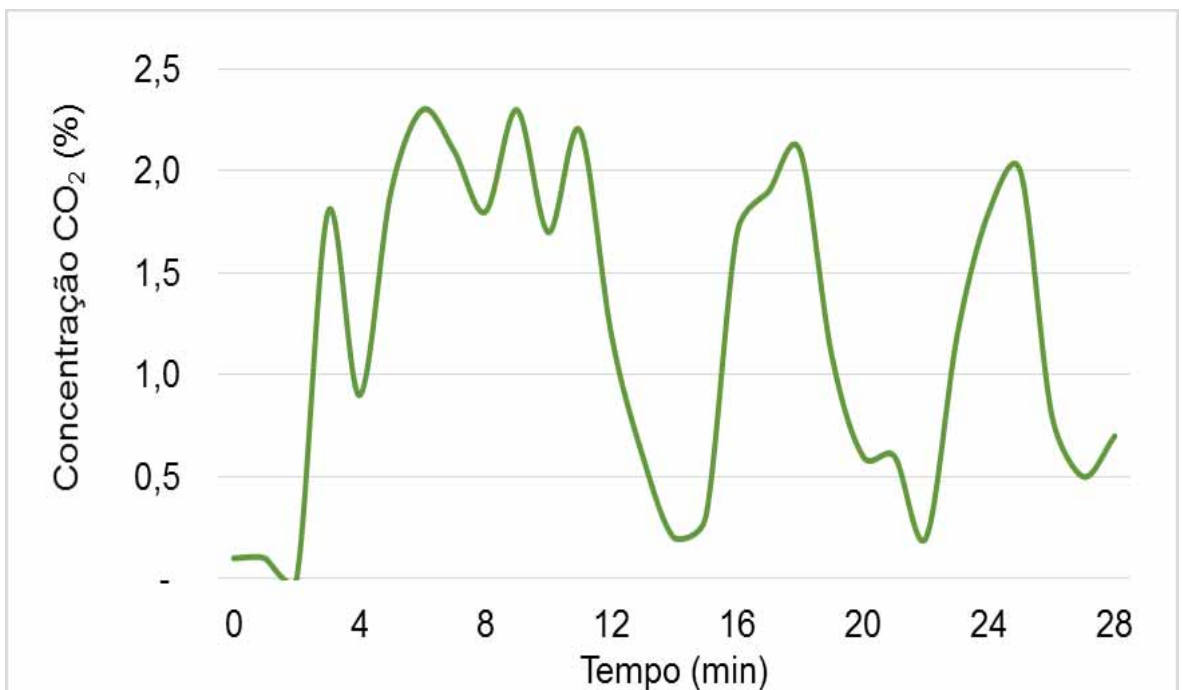


Figura 27: Concentração de CO₂ em função do tempo - combustível Casca de Arroz.

As Figuras 28 a 32 representam a variação da concentração de CO, NO e NO_x em partes por milhão (ppm) em função do tempo de amostragem para os diversos combustíveis.

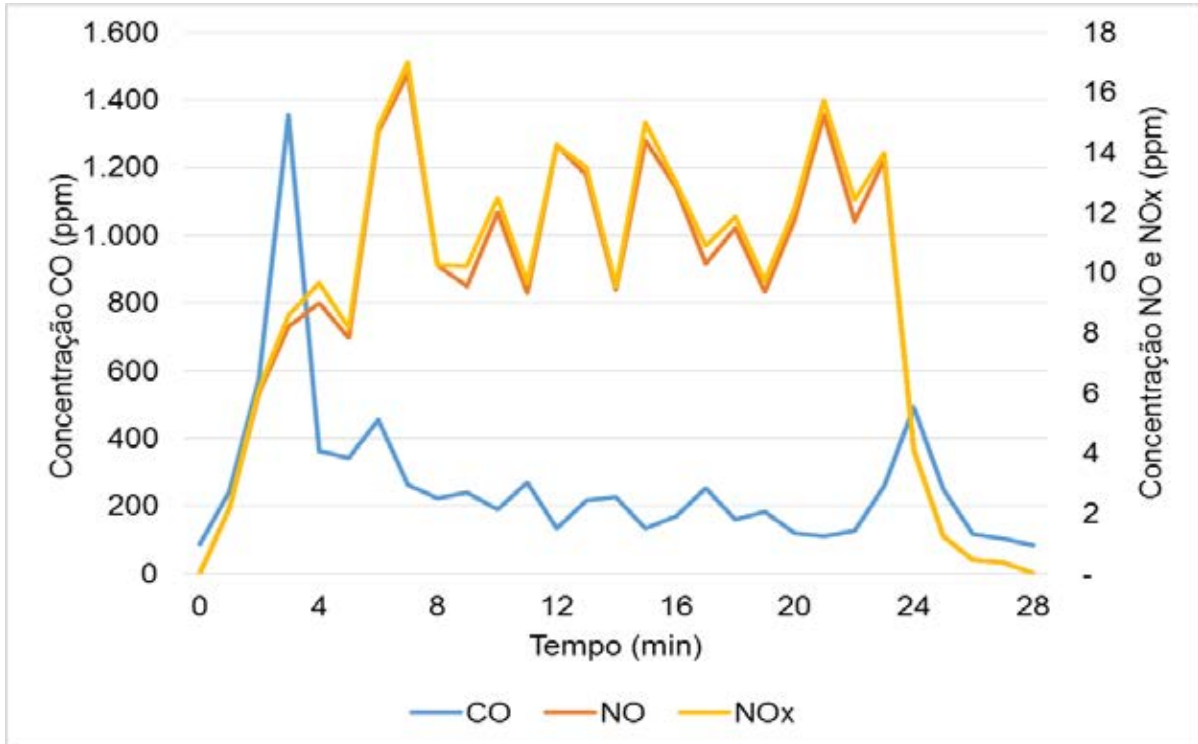


Figura 28: Concentração de CO, NO e NOx em função do tempo - combustível Cana de Açúcar - teste 1.

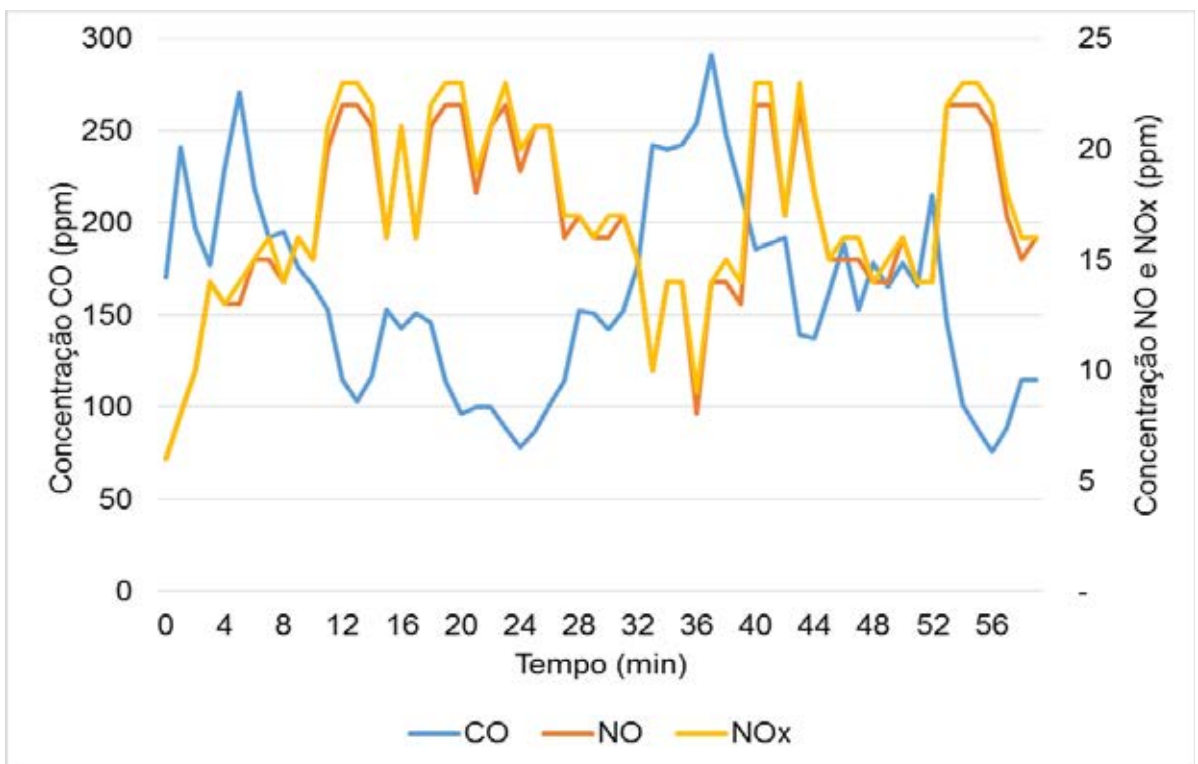


Figura 29: Concentração de CO, NO e NOx em função do tempo - combustível Cana de Açúcar - teste 2.

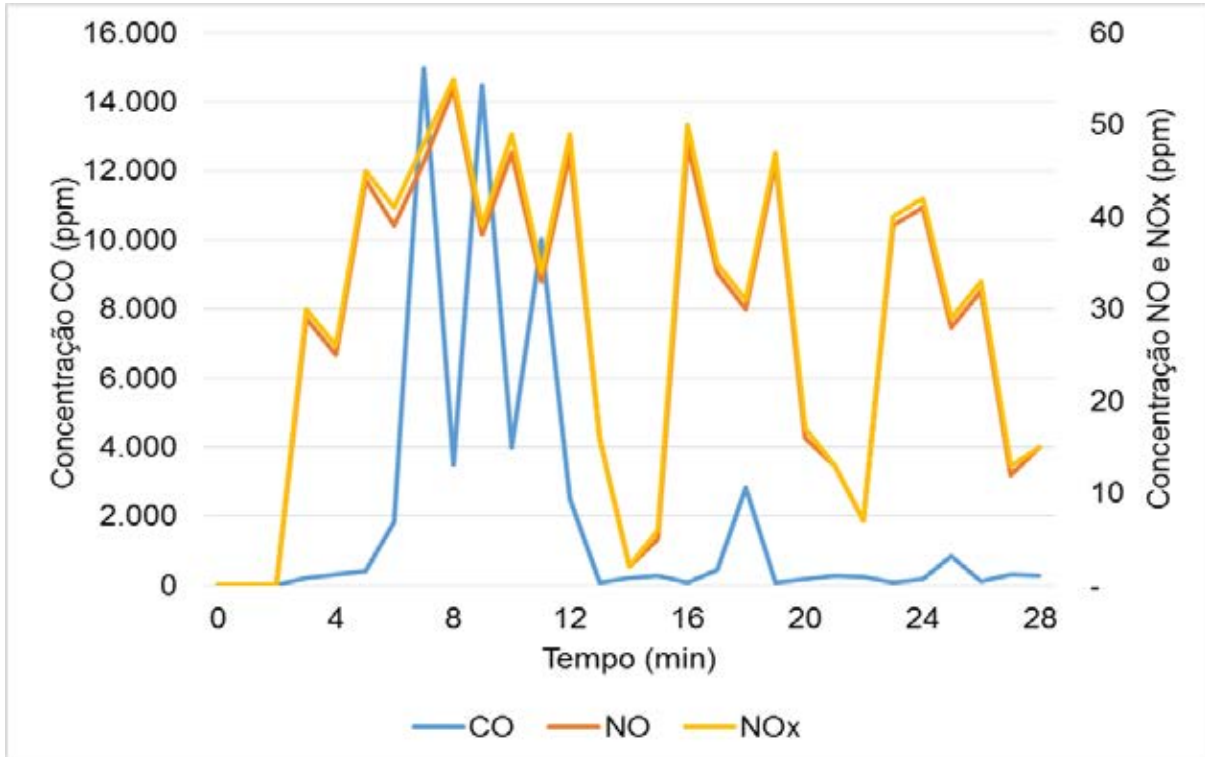


Figura 30: Concentração de CO, NO e NOx em função do tempo - combustível Casca de Arroz.

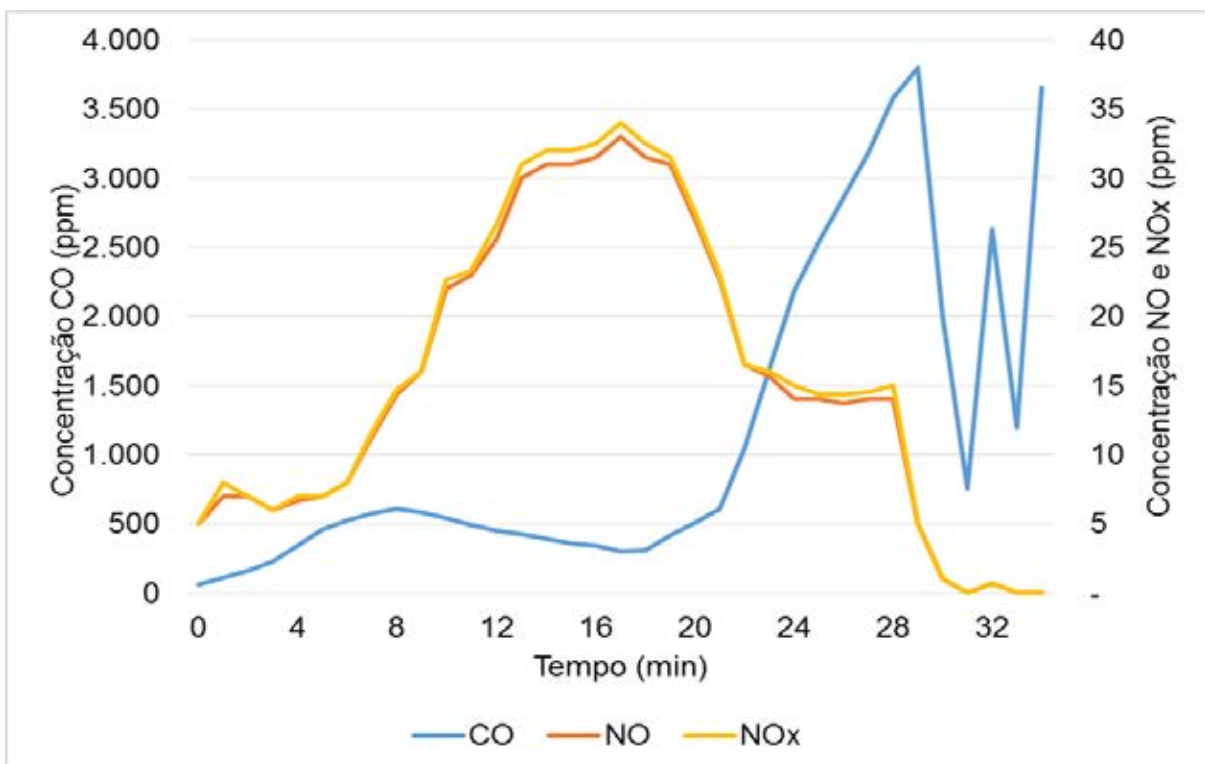


Figura 31: Concentração de CO, NO e NOx em função do tempo - combustível Casca de Café.

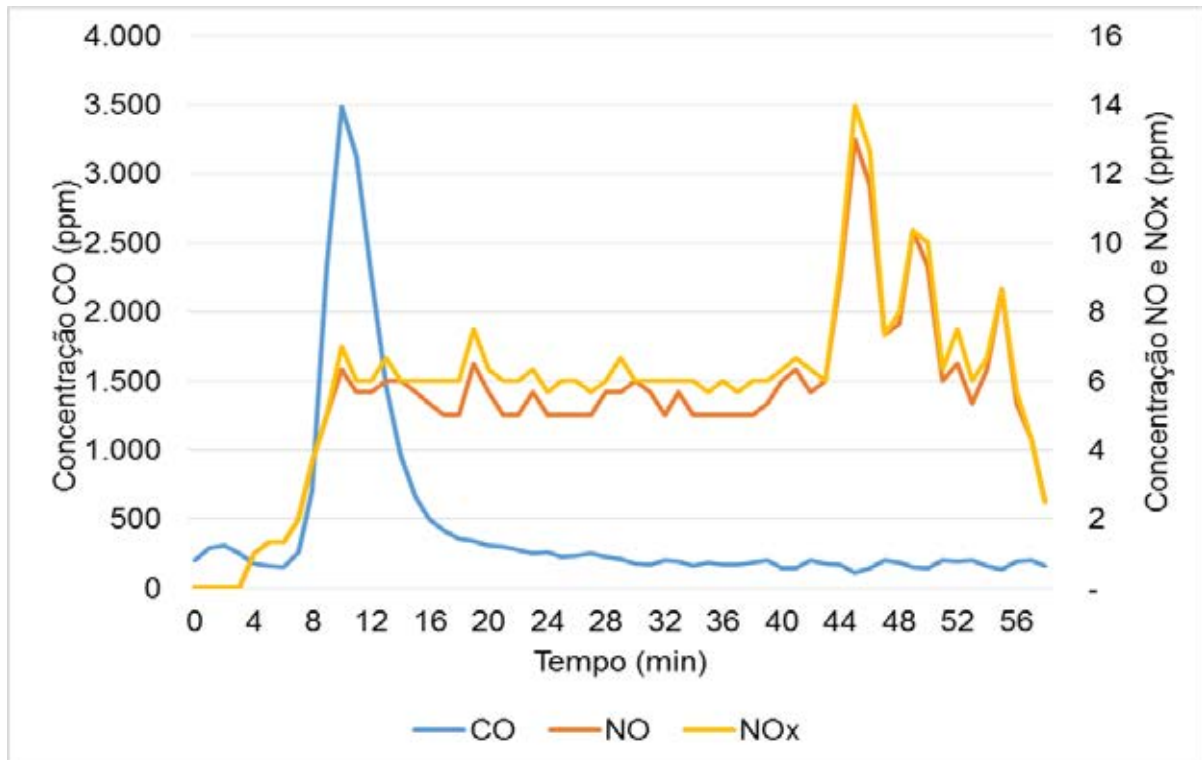


Figura 32: Concentração de CO, NO e NOx em função do tempo - combustível Cavaco de Eucalipto.

De acordo com as figuras anteriores, o combustível que apresentou maior liberação de CO foi a casca de arroz, com valor máximo de 15.000ppm, sendo que o mesmo aconteceu para NOx, com 76ppm de concentração.

Nos testes 1 e 2 com cana de açúcar obtivemos os seguintes valores de concentração respectivamente: 1.356,4 e 291ppm de CO, e 17 e 23ppm de NOx. Para a casca de café os valores foram de 3.800ppm para CO e 34ppm para NOx. No teste com Eucalipto obtivemos 3.489,7ppm de CO e 14ppm de NOx.

De acordo com Adreae e Merlet (2001), a emissão de NOx é predominante durante a fase de chama, sendo que esta colocação pode ser verificada nos testes realizados porém, não havendo uma diferença muito significativa, uma vez que os resultados não apresentaram grandes variações, exceto quanto a casca de café, que apresentou comportamento semelhante ao relatado pelos autores.

Nos experimento de Soares Neto et al.(2009), foram constatadas concentrações mais elevadas de CO₂ na fase de chama.

A casca de café também foi o combustível que apresentou um comportamento mais semelhante ao relatado na literatura para emissão de CO.

Portanto, através dos dados obtidos durante a queima de diversos tipos de biomassa, verifica-se que as indústrias que utilizam o resíduo lignocelulósico como

combustível devem controlar os níveis de emissões produzidos e principalmente aos diâmetros das partículas emitidas em seus processos industriais, utilizando equipamentos específicos e eficientes, tanto para o controle de partículas como de gases.

Não existem normas específicas no Brasil que estabeleçam limites de emissão para material particulado com diâmetro inferior a $2,5\mu\text{m}$, que são as mais prejudiciais à saúde humana.

6. CONCLUSÃO

Especificamente em relação aos testes experimentais realizados podemos concluir que:

- As concentrações atingiram cerca de $800.000\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor significativo já que foram amostradas somente partículas ultrafinas;
- As maiores concentrações se deram para os menores diâmetros, por exemplo, para a cana de açúcar a máxima concentração foi de $794.041,8\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o diâmetro de $0,0986\mu\text{m}$;
- As concentrações de CO_2 ficaram na faixa de 0 à 2,5% e as de CO alcançaram até 14000ppm.
- A casca de café foi o combustível que apresentou comportamento mais semelhante aos relatados na literatura para emissões de poluentes gasosos;
- Nota-se a necessidade de amostragem destes poluentes principalmente em indústrias que utilizam a biomassa como combustível para que possam ser implantados equipamentos de controle de emissão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREAE, M.O., MERLET, P. **Emissions of trace gases and aerosols from biomass burning**. Global Biogeochemical Cycles, n. 15, p. 955 – 966, 2001.

ANEEL (Brasil). Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Biomassa**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)>. Acesso em: 08 out. 2013.

ARBEX, M. A. et al. **Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde**. Jornal Brasileiro de Pneumologia, 30(2), Mar/Abr, 2004.

BERNDES, G.; HOOGWIK, M.; VAN DEN BROEK, R. **The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies**. Biomass and Bioenergy, Oxford, v. 25, p. 1-28, 2003.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. (Org.). **Balanco Energético Nacional 2008: Relatório Síntese ano base 2007**. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2008.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2013.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. (Org.). **Balanco Energético Nacional 2013: Relatório Síntese ano base 2012**. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2013_Web.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2013.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. (Org.). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2011-2021**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2012/Relatxrio_PDE2021_ConsultaPxblica.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2013.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Ficha de Informações toxicológicas: SO₂, CO, O₃, HC, NO_x**. Disponível em:

<<http://www.cetesb.sp.gov.br/tecnologia-ambiental/laboratorios/109-informacoes-toxicologicas>>. Acesso em: 03 nov. 2013.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **L9. 217:** Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação de Material Particulado com o Sistema Filtrante no interior do Duto ou Chaminé, 1989.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **L9. 221:** Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação dos pontos de amostragem: procedimento, 1990.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Poluentes.** Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/Informa??es-B?sicas/21-Poluentes>>. Acesso em: 17 out. 2013.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo.** Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/qualidade-do-ar/31-publicacoes-e-relatorios>>. Acesso em: 26 set. 2013.

CHAKRABARTY, R.K., MOOSMULLER, H., GARRO, M.A., ARNOTT, W.P. WALTER, J., SUSSOTR, R.A., BABBIT, R.E., WOLD, C.E., LINCON, E.N. and HAO, W.M.: **Emissions from the laboratory combustion of wildland fuels:particle morphology and size.** J. Geophys. Res.Atmospheric, 111,doi:10.1029/2005JD00665, (2006).

CHUNGSANGUNSIT, T. **Environmental Profile of Power Generation from Rice Husk in Thailand.** 2004. Disponível em: <<http://www.thaiscience.info/Article%20for%20ThaiScience/Article/3/Ts-3%20environmental%20profile%20of%20power%20generation%20from%20rice%20husk%20in%20thailand.pdf>> Acesso em 22 set. 2013.

CONAB (Brasil). Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos.** Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_11_08_12_28_38_boletim_portugues_novembro_2013_-_ok.pdf>. Acesso em: 22 set. 2013.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA 03/90:** Controle da Poluição do ar – PRONAR, 1990.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº315.**

Disponível em: <

http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/resolucao_Conama_315_02_proconvepdf.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2013.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº436.**

Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=660>>.

Acesso em: 15 abr. 2012.

COSTA, M. A. M.; CARVALHO, J. A.; SOARES NETO, T. G. 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, jul 2012.

COSTA, M. A. M. **Amostragem de partículas dispersas em correntes gasosas confinadas.** PPG-EQ/UEM, Maringá-PR, 138p. (dissertação de mestrado), 1998.

FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente. Minas Gerais, 2009. **Apresentação política de proteção, conservação e melhoria da qualidade ambiental.** Disponível em: <<http://www.feam.br/index.php>>. Acesso em: 02 ago 2013.

FERNANDES, J. E. et al. (2011), **Estudo da emissão de particulados provenientes da queima de diferentes tipos de biomassa.** In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 35. Anais, Enemp, Vassouras-RJ.

FOLETTTO, E. L. et al. **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz.** Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422005000600021>. Acesso em: 18 set. 2013.

GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVÃO, L. C. R. **Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo**, In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 2006, Campinas. Disponível em: <<http://paginas.agr.unicamp.br/energia/agre2006/pdf/54.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2011

HAYS, M. D., C. D. GERON, K. J. LINNA, N. D. SMITH and J. J. SCHAUER, (2002), **Speciation of gas-phase and fine particle emissions from burning of foliar fuels**. *Environmental Science and Technology*, 36, 2281-2294

HILSDORF, J. W. et al. **Química tecnológica**. São Paulo: Cengage Learning, 2004. 339 p.

HOSSEINI, S.; LI, Q.; COCKER, D. et al. Particle size distributions from laboratory-scale biomass fires using fast response instruments. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 16, p. 8065-8076, 30 ago 2010.

JACOMINO, V. M. F. et al. **Avaliação da qualidade do ar em um pólo produtor de ferro-gusa**. *Eng Sanit Ambient*, Vol. 14, nº 4, p. 511-520, Out/Dez, 2009.

KIM OANH, N.T., Ly, B.T., TIPAYAROM, D., MANANDHAR, B.R., PRAPAT, P., SIMPSON, C.D., LIU, L.-J., 2011. **Characterization of particulate matter emission from open burning of rice straw**. *Atmospheric Environment* 45, 493e502.

KURA, L. T. **Determinação de Índices que Quantificam o Material Particulado Inalável Emitido pela Queima da Biomassa na Amazônia Brasileira**. 2010. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

LEME, R. M. **Estimativa das emissões de poluentes atmosféricos e uso de água na produção de eletricidade com biomassa de cana-de-açúcar**. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) -Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

LISBOA, H. M.; SCHIRMER, W. N. **Poluição Atmosférica: Metodologia de Controle de Poluição Atmosférica**. Disponível em: <<http://www.lcqar.ufsc.br/adm/aula/Cap 7 MetControle PATM.pdf>>. Acesso em: 03 set. 2013.

LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência. 2002. p. 364.

LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. 2ª Ed. Brasília, ANEEL, 2000. 218p.

MAZZER, C.; CAVALCANTI, O. A. **Introdução à Gestão Ambiental de Resíduos**. Disponível em: <<http://www.cff.org.br/sistemas/geral/revista/pdf/77/i04-aintroducao.pdf>>. Acesso em: 07 jul. 2013.

MIRANDA, A. T. de. **Poluição atmosférica: Causas, consequências e responsabilidades**. Disponível em: <<http://educacao.uol.com.br/disciplinas/geografia/poluicao-atmosferica-causas-consequencias-e-responsabilidades.htm>>. Acesso em: 20 out. 2013.

MÜLLER, F. B. **Biomassa**. Disponível em: <<http://www.institutocarbonobrasil.org.br/biocombustiveis/biomassa>>. Acesso em: 05 nov. 2013.

NEMMAR, A. et al. **Passage of inhaled particles in to the blood circulation in humans**. Circulation 105, p. 411-414, 2002.

NETO, T. G.S.; CARVALHO, J. A.; VERAS, C. A. G. et al. **Biomass consumption and CO₂, CO and main hydrocarbon gas emissions in an Amazonian forest clearing fire**. Atmospheric Environment, v. 43, n. 2, p. 438-446, jan 2009.

OBERDÖRSTER, G. **Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nano materials:** elements of a screening strategy. *Particle and Fibre Toxicology* 2, p. 1-35. 2005.

PAOLIELLO, J. M. M. **Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira.** 2006. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2006.

PORTAL DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Tecnologias: Biomassa sólida.**

Disponível em:

<http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=3&ID_area=2&ID_sub_area=2>. Acesso em: 05 nov. 2013.

SANTIAGO, E. **Nevoeiro fotoquímico.** Disponível em:

<<http://www.infoescola.com/meio-ambiente/nevoeiro-fotoquimico-smog/>>. Acesso em: 23 out. 2013.

SILVA, A. M. C. da et al. Material particulado (PM_{2.5}) de queima de biomassa e doenças respiratórias no sul da Amazônia brasileira. **Rev Bras Epidemiol**, Cuiabá, n. p.337-351, 2010.

SILVA, C. R. A. et al. **A biomassa como alternativa energética para o Brasil.** *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, São Paulo, n. 12, p. 25-36, 2004.

SILVA, O. H. da et al. **Potencial Energético da Biomassa da Casca de Arroz no Brasil.** Disponível em:

<<http://www.cm.utfpr.edu.br/ocs/index.php/siaut/IIISIAUT/paper/view/164>>. Acesso em: 12 out. 2013.

SOARES NETO, T. G. et al. **Emission Factors for CO₂, CO and Main Hydrocarbon Gases, and Biomass.** Disponível em:

<<http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei20/session2/tneto.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2013.

TIMOTHY B.J.; SEEN, A. **Effect of airflow setting on the organic composition of woodheater emissions**. Environmental Science and Technology. v.39, p. 3601, 2005.

VALE, A. T. do. Energia: Casca do café também é fonte de energia. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=casca-cafe-fonte-energia-biomassa>>. Acesso em: 17 jul. 2013.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. Disponível em: <http://projetos.unioeste.br/pos/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Ana_C_Vieira.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2013.

WIECHETECK, M. Ministério do Meio Ambiente. **Aproveitamento De Resíduos e Subprodutos: Sumário Executivo, revisão 00**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033501.pdf>. Acesso em: 25 set. 2013.