

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA
ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA**

SAULO PUPO DE MORAIS

**AMOSTRAGEM DE POLUENTES PARTICULADOS EMITIDOS PELA QUEIMA
DE BIOMASSA EM CORRENTES CONFINADAS**

Itapeva - SP

2011

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA
ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA**

SAULO PUPO DE MORAIS

**AMOSTRAGEM DE POLUENTES PARTICULADOS EMITIDOS PELA QUEIMA
DE BIOMASSA EM CORRENTES CONFINADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidades
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus
Experimental de Itapeva como requisito para obtenção do grau
de Engenheiro Industrial Madeireiro.

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

Itapeva - SP

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Morais, Saulo Pupo de

M827a Amostragem de poluentes particulado emitidos pela queima de
biomassa em correntes confinadas / Saulo Pupo de Moraes – Itapeva, 2011
76 f.: il.

Trabalho de Graduação do Curso Engenharia Industrial Madeireira
apresentado ao Campus Experimental de Itapeva – UNESP, 2011
Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Maria Angélica Martins Costa
Banca examinadora: Prof^ª. MSc. Juliana Esteves Fernandes; Prof. Dr.
Natal Nerímio Regone
Inclui bibliografia

1. Controle de poluição - Indústria. 2. Poluentes. 3. Amostragem I.
Título. II. Itapeva - Curso de Engenharia Industrial Madeireira.

CDD 628.53

**AMOSTRAGEM DE POLUENTES PARTICULADOS EMITIDOS PELA QUEIMA
DE BIOMASSA EM CORRENTES CONFINADAS**

SAULO PUPO DE MORAIS

**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. José Cláudio Caraschi
Coordenador de Curso

BANCA EXAMINADORA:

PROF.^a DR.^a MARIA ANGELICA MARTINS COSTA
UNESP – CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

PROF. DR. NATAL NERÍMIO REGONE
UNESP – CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

PROF.^a MSc. JULIANA ESTEVES FERNANDES
UNESP – CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

“Ao Criador dos céus e da terra entrego a minha
vida”

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que guia os meus passos dia-a-dia e me faz perceber quão maravilhosa é a vida quando temos um coração grato e sincero.

Agradeço ao meu pai Leonil e minha mãe Rose que incondicionalmente me apóiam e me incentivam a sempre seguir o caminho da verdadeira alegria.

Agradeço a minha namorada Caren que sempre está comigo, e que sei que posso contar em cada minuto que precisar durante toda a minha vida.

A toda a minha família, que faz minha vida ser cada vez mais cheia de alegria e amor.

A minha orientadora, professora Maria Angélica que nunca mediu esforços para me ajudar e que sempre serei grato por todo conhecimento, amizade e confiança que me ofereceu durante esses anos.

Aos companheiros de pesquisa que sempre se dispuseram a colaborar para este trabalho.

A todos os meus amigos e companheiros que de uma forma ou de outra me ajudaram durante toda a graduação.

"O conhecimento é o processo de
acumular dados; a sabedoria reside na
sua simplificação." (Martin H. Fischer)

RESUMO

É nítida nos dias de hoje a busca cada vez mais acelerada por novos combustíveis que venham a substituir os que futuramente irão se esgotar em nossa sociedade, que são os combustíveis fósseis. Por esta razão, um combustível utilizado desde os primórdios da humanidade e muito estudado desde então, considerado gerador de energia limpa e renovável, pode ganhar cada dia mais espaço no setor de geração de energia, que é a biomassa. Neste estudo foram realizados dois experimentos com dois tipos diferentes de biomassa florestal, uma proveniente da floresta Amazônica e outra de pinus e eucalipto como resíduo proveniente da serraria da UNESP de Itapeva. No primeiro experimento, realizado no Laboratório de Combustão e Propulsão do INPE de Cachoeira Paulista foram realizados três testes em uma chaminé com um exaustor gerando uma ventilação forçada, onde a biomassa foi depositada e queimada sobre um suporte logo abaixo do exaustor. No segundo experimento foi realizada a análise da emissão de material particulado utilizando biomassa florestal (resíduo) proveniente da serraria do campus da experimental da UNESP de Itapeva na queima da mesma em um queimador para aquecimento de água para uma estufa de secagem de madeiras. Nestes experimentos foi utilizado um amostrador de partículas chamado DATARAM4 que é capaz de realizar tanto amostragem em ambientes abertos como no interior de dutos, que é o foco deste trabalho. Através deste equipamento foi possível verificar a concentração de material particulado em todas as queimas já citadas e compará-las com os níveis aceitáveis na legislação vigente, buscando sempre analisar os chamados particulado finos, que são aqueles que possuem diâmetros menores do que $2,5\ \mu\text{m}$. Através dos dados obtidos no equipamento também foi possível avaliar a distribuição diametral do material particulado em questão, e verificar em quais fases das queimas a concentração e os diâmetros das partículas são os mais críticos. Neste trabalho foi possível concluir que em todas as queimas realizadas as concentrações de material particulado estiveram acima da permitida pela legislação, bem como os diâmetros encontrados foram os que são mais prejudiciais à saúde humana.

Palavras-chave: Controle de poluição, Poluentes, Amostragem.

ABSTRACT

It is clear today the ever-accelerating search for new fuels that will eventually replace those that will survive in our society, which are fossil fuels. For this reason, a fuel used since the dawn of humanity and much studied since then, considered the generator of clean, renewable energy, can earn more and more space in the power generation sector, which is biomass. We performed two experiments with two different types of biomass, one from the Amazon rainforest and other pine and eucalyptus as waste from the sawmill UNESP Itapeva. In the first experiment, conducted at the Laboratory of Combustion and Propulsion INPE Cachoeira Paulista were conducted three tests in a chimney with a fan creating forced ventilation, where the biomass was burned and deposited on a support beneath the hood. In the second experiment was conducted to analyze the emission of particulate matter using biomass (waste) from the sawmill on the campus of UNESP experimental Itapeva the burning of it in a burner for heating water for a wood oven. In these experiments we used a particle called DATARAM4 sampler that is capable of sampling both outdoors and inside of pipelines, which is the focus of this work. With this equipment it was possible to measure the concentration of particulate matter in all the firings as above, and compare them to levels acceptable in the current law, always trying to analyze the so-called fine particles, which are those with diameters less than 2.5 μm . Using data obtained from the equipment was also possible to evaluate the diametral distribution of particulate matter in question, and verify which phases of the flares in the concentration and the diameters of the particles are the most critical. In this work we concluded that in all firings conducted concentrations of particulate matter were higher than that allowed by the law, and the diameters were found that are more harmful to human health.

Keywords: Pollution Control, Pollutants, Sampling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Principais tipos de biomassa usadas como combustíveis.....	20
Figura 2. Oferta de energia brasileira em 2004.	20
Figura 3. Exemplo das fases da combustão direta da biomassa.	23
Figura 4. Micrografia de Cenosferas de material particulado	25
Figura 5. Classificação diametral das partículas.	27
Figura 6. Eventos hipotéticos no sistema respiratório humano quando exposto a material particulado.	27
Figura 7. Exemplo de bocal de amostragem.	31
Figura 8. Analisador de Material Particulado DataRam4.	36
Figura 9. Software do DataRAM4.....	39
Figura 10. DATARAM acoplado com a sonda de amostragem.....	40
Figura 11. Boquilhas para amostragem.....	40
Figura 12. Gráfico para determinação da boquilha de amostragem.	41
Figura 13. (A) Estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. (B) Balança analítica.	42
Figura 14. Equipamento de combustão de biomassa e amostragem de PM e gases no LCP-INPE de Cachoeira Paulista.	44
Figura 15. (a) Desenho esquemático das posições dos orifícios de amostragem em um duto segundo as normas, (b) dimensões do duto utilizado durante as amostragens (mm).	45
Figura 16. Esquema da sonda e bocal de amostragem isocinética ($V_d=V_a$) no interior do duto.	46
Figura 17. Disposição geral dos componentes integrantes da câmara de secagem.	48
Figura 18. Reservatório de biomassa do queimador.....	49
Figura 19. Rosca fazendo o transporte da biomassa.....	50
Figura 20. Queimador de biomassa	50
Figura 21. Grelha fixa para combustão de biomassa	51
Figura 22. Chaminé para expelir os gases da combustão	51
Figura 23. Orifício feito na chaminé para análise de gases.....	52
Figura 24. Termo-anemômetro no interior da chaminé.	53
Figura 25. Boquilha instalada na sonda de amostragem.	53
Figura 26. Valores de distribuição de diâmetros de partículas amostrados com ambos DATARAM4 (INPE e UNESP) no teste 1.	57

Figura 27. Valores de distribuição de diâmetros de partículas amostrados com ambos DATARAM4 (INPE e UNESP) no teste 2.	58
Figura 28. Valores de distribuição de diâmetros de partículas amostrados com ambos DataRam 4 (INPE e UNESP) no teste 3 relacionados com as fases da combustão e os pontos de amostragem no interior do duto.	59
Figura 29. Valores de Concentração de partículas menores que 2.5 μm amostrados com ambos DataRam4 (INPE e UNESP) no teste 1.	60
Figura 30. Valores de Concentração de partículas menores que 2.5 μm amostrados com ambos DataRAM4 (INPE e UNESP) no teste 2.....	61
Figura 31. Valores de Concentração de partículas menores que 2.5 μm amostrados com ambos DataRam4 (INPE e UNESP) no teste 3.	61
Figura 32. Variação da concentração de material particulados menor que 2.5 μm em relação ao diâmetro para o teste 1 com o DATARAM Inpe.....	62
Figura 33. Variação da concentração de material particulados menor que 2.5 μm em relação ao diâmetro para o teste 1 com o DATARAM Unesp.....	63
Figura 34. Variação da concentração de material particulados menor que 2.5 μm em relação ao diâmetro para o teste 2 com o DATARAM Inpe.....	64
Figura 35. Teste 1 - Gráfico indicativo da concentração de material particulado pelo tempo.	65
Figura 36. Teste 1- Gráfico referente a variação do diâmetro das partículas com o tempo de amostragem.	66
Figura 37. Teste 1 - Gráfico referente a variação da concentração em relação ao diâmetro das partículas.	67
Figura 38. Teste 1 - Gráfico mostrando a variação da temperatura e umidade relativa do fluxo de ar.....	68
Figura 39. Teste 2 - Gráfico referente a concentração de material particulado variando com o tempo.....	69
Figura 40. Teste 2 - Gráfico referente a variação diâmetral das partículas em função do tempo.	70
Figura 41. Teste 2 - Gráfico referente a variação de temperatura e umidade relativa com o tempo.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais poluentes atmosféricos	26
Tabela 2. Localização dos pontos de amostragem no interior do duto.....	45
Tabela 3. Valores da umidade da biomassa florestal.....	55
Tabela 4. Valores da massa da biomassa antes e após a queima.....	56
Tabela 5. Tempo de duração das fases da chama.....	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	17
2.1 Objetivos Gerais.....	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Setor energético - Biomassa	19
3.2 Combustão direta da biomassa.....	21
3.3 Poluição do ar – Material particulado	24
3.3 Padrões de Qualidade do ar	28
3.4 Amostragem de material particulado em fontes estacionárias.....	29
3.5 Amostragem isocinética	30
3.6 Distribuição diametral de material particulado.....	31
3.7 Avaliação de equipamentos na determinação do diâmetro de MP	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1 Analisador do Material Particulado - Data Ram 4.....	36
4.2 Amostragem isocinética utilizando o DataRAM	39
4.3. Experimento 1 - Análise da emissão de material particulado a partir da queima de biomassa proveniente da Floresta Amazônica.....	41
4.3.1 Determinação do Teor de Umidade.....	41
4.3.2 Amostragem de material particulado utilizado biomassa Amazônica	42
4.4 Experimento 2 – Avaliação da emissão de material particulado na chaminé de um queimador industrial utilizando resíduo de serraria.....	47
4.4.1 Queimador de biomassa de uma câmara de secagem de madeira.....	47
4.4.2 Amostragem na chaminé do queimador	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1 Experimento 1 - Análise da emissão de material particulado a partir da queima de biomassa proveniente da Floresta Amazônica.....	55

5.1.1 Determinação do Teor de Umidade.....	55
5.1.2 Amostragem de material particulado.....	55
5.2. Experimento 2.....	64
6 CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

A biomassa é a capacidade energética de uma matéria, ou seja, de um elemento que contenha massa. Esta biomassa pode ter origem em resíduos urbanos, agrícolas e industriais, assim como de vegetais não-lenhosos e lenhosos, que é o caso da madeira.

Quando falamos da biomassa florestal, temos o seu uso desde os primórdios da humanidade com a utilização da lenha, não obstante tem crescido a sua utilização para geração de energia, principalmente em grandes empresas através da combustão de materiais como: lenha, bagaço de cana, resíduos florestais, agrícolas, etc. Isso se deve ao fato da biomassa possuir alta eficiência energética, proporcionar o reaproveitamento de resíduos e assim diminuir custos, dentre outras vantagens. O exemplo mais comum de biomassa como combustível é a madeira que pode ser transformada em lenha e carvão vegetal.

Muitas pessoas possuem o conceito de que a utilização da biomassa é uma fonte de energia limpa, pois as árvores consomem o CO₂ que é emitido pela sua queima, porém temos diversos estudos e normas ambientais referentes a emissão de poluentes na atmosfera, como o chamado material particulado, que são partículas em suspensão no ar, partículas essas que quanto mais “invisíveis” mais são prejudiciais a saúde humana, pois estas são inaladas pelo homem e se alojam em seu sistema respiratório.

Material particulado, fonte desta pesquisa, tem influencia direta no efeito estufa e na saúde humana. Segundo levantamento da American Lung Association (2011) citado por Arbex et al. (2004), mais de 800 novos estudos científicos relacionados aos efeitos do material particulado em suspensão no ar, proveniente da queima de combustíveis fósseis, sobre a saúde humana, foram publicados entre 1997 e 2001.

Os recursos mundiais de biomassa são abundantes, e existem várias técnicas para produzir energia de maneira economicamente eficiente, em vez das formas não-comerciais utilizadas nos países mais pobres. Em cenários futuros, segundo estudos recentes, haverá muitas vantagens em produzir energia proveniente da biomassa, principalmente quando as fontes de energia renovável se tornarem competitivas em relação aos combustíveis fósseis, o que se espera ser possível por volta de 2020. (INNOCENTE, 2011)

No Brasil, a biomassa como fonte de energia possui vantagens significativas, principalmente por diversificar a matriz energética brasileira; por contribuir para um desenvolvimento sustentável do país, podendo colaborar para a garantia de suprimento de

energia a comunidades isoladas, principalmente nas regiões Norte e Centro Oeste do país e pelas vantagens ambientais (GENOVESE et al., 2006) apud (INNOCENTE, 2011).

Segundo Timothy (2005) finas partículas conhecidas como particulados ou *particulate matter*, são emitidas pelos queimadores de biomassa e estas muito contribuem com a poluição atmosférica. Com a emissão destes particulados, também é emitido uma ampla faixa de componentes tóxicos orgânicos e inorgânicos na forma de gases. Portanto, as empresas devem tomar medidas que controlem as emissões destes poluentes, realizando o gerenciamento ambiental e controlando seus efluentes através, por exemplo, da instalação de equipamentos de despoluição.

Além disso, foi comprovado que as partículas de até 2,5 μm à 10 μm de diâmetros são inalados por seres humanos e foi constatado a permanência destes componentes por um longo período de tempo nos pulmões. Assim, projetos que combatem a excreção atmosférica destes componentes são fundamentais diretamente (saúde) e indiretamente (efeito estufa) para a sociedade.

2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Este trabalho teve como objetivos principais:

2.1 Objetivos Gerais

- Realizar a amostragem de material particulado emitido na queima de biomassa florestal proveniente da floresta Amazônica, realizada em um queimador com exaustão de ar do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) de Cachoeira Paulista – SP utilizando para isso dois aparelhos DATARAM4;
- Realizar a amostragem de material particulado emitido na queima de biomassa florestal (resíduo proveniente de uma serraria) realizada em um queimador de biomassa de uma estufa de secagem de madeira do Campus Experimental da UNESP de Itapeva, utilizando para isso um equipamento de amostragem denominado DATARAM4.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica, pesquisando na literatura artigos científicos que analisem assuntos correlatos à queima de biomassa para geração de energia, poluição do ar por particulados, justificando desta forma, a importância e relevância do tema escolhido para o presente trabalho;
- Realizar a quantificação de material particulado inalável emitido na queima de biomassa;
- Manusear e se familiarizar com o equipamento de amostragem DATARAM4, bem como a comparação dos resultados das amostragens obtidos nos dois experimentos;
- Demonstrar o funcionamento do equipamento DATARAM4 para amostragem em dutos de maneira isocinética;

- Demonstrar graficamente, através da concentração de material particulado e relacionar com a mesma, as fases da combustão direta da biomassa (fase de ignição, fase de chama e fase de incandescência).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica traz as citações encontradas na literatura a respeito do estudo e análise de poluentes atmosféricos emitidos a partir da queima de biomassa.

3.1 Setor energético - Biomassa

Mundialmente tem se tornado cada vez mais comum a busca por novas fontes de energia, bem como a melhor utilização dos recursos naturais devido a necessidade de reduzir o uso de derivados do petróleo e, conseqüentemente, a dependência energética mundial em relação aos países exportadores de petróleo e assim uma redução na emissão de gases que contribuem para o efeito estufa. A biomassa, que é um recurso energético proveniente de matéria orgânica animal ou vegetal, surge então como excelente opção para estas questões, por ser um recurso abundante e renovável.

No Brasil, se destacam dentre os principais tipos de biomassa que podem ser usados como combustíveis, as 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). Na Figura 1 seguem alguns exemplos dos principais tipos de biomassas utilizadas como combustível.

Segundo WEA (2000) apud Goldemberg (2009) a produção de energia no século XX foi predominantemente realizada por combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás) que representavam ainda no início do século XXI, cerca de 80% de toda a energia produzida no mundo (Figura 2).

Segundo Vidal (2005) no Brasil em 2005, 60% da energia era proveniente de fontes renováveis, enquanto que os demais países possuem uma média de 12%.

A possibilidade de se utilizar a biomassa como fonte de energia ganhou maior destaque em meados de 1973 com a crise mundial do petróleo, com isso surgiram vários programas nacionais visando obter maior eficiência nos sistemas de combustão e gaseificação da biomassa, conforme menciona Oliveira e Lobo (2002) apud Innocente (2011).

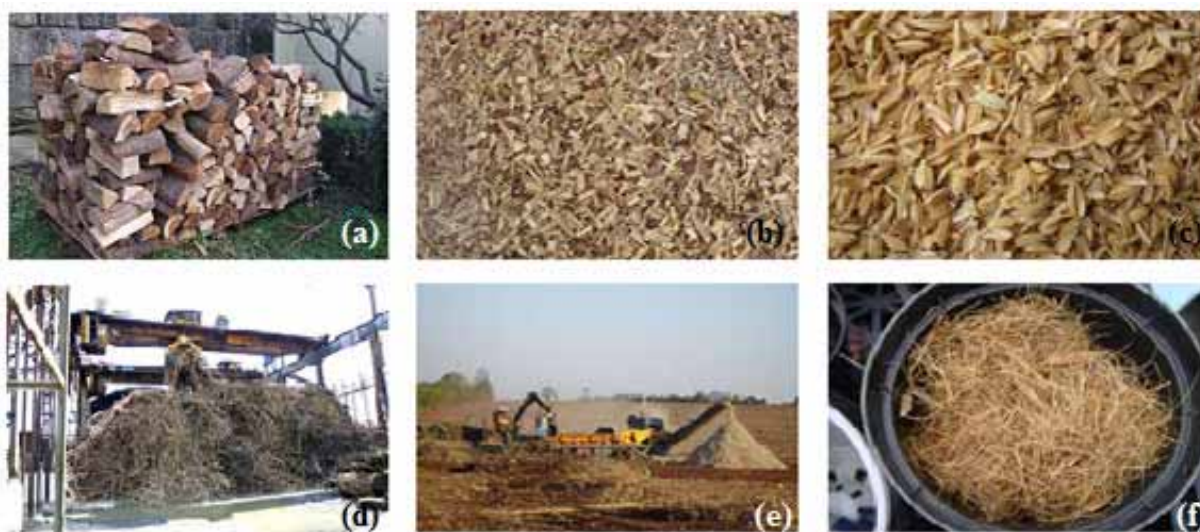


Figura 1. Principais tipos de biomassa usadas como combustíveis.

(a) Lenha; (b) Cavaco e pó-de-serra; (c) Casca de arroz; (d) Bagaço de cana-de-áçúcar; (e) Fibra de coco.

Fonte: <http://www.joinville.ifsc.edu.br/~edsonh/>

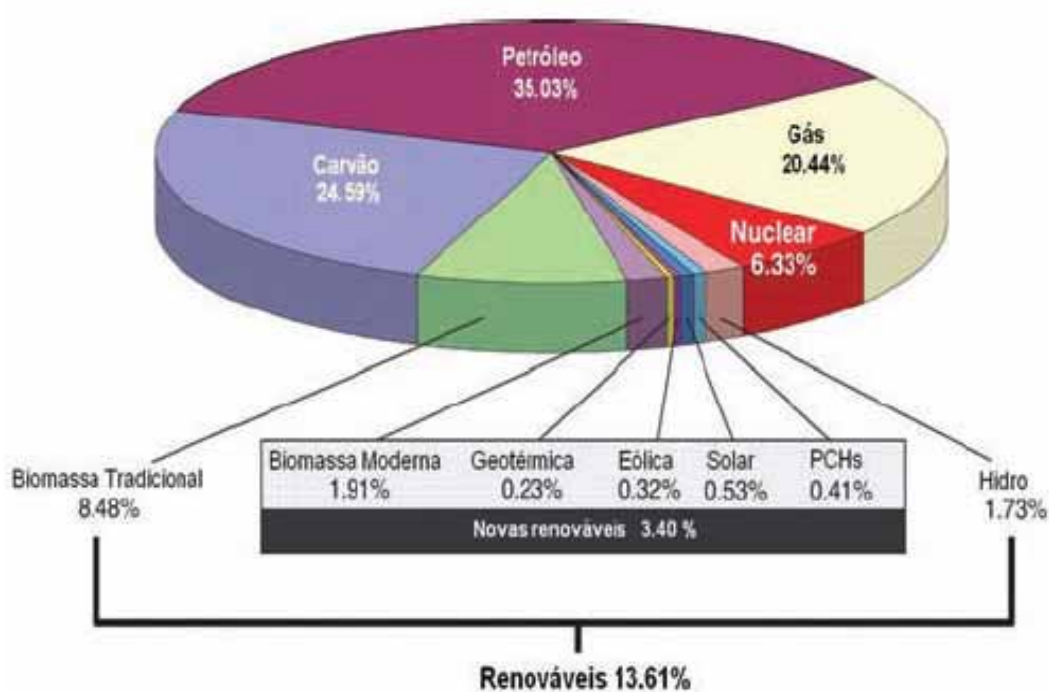


Figura 2. Oferta de energia brasileira em 2004.

Fonte: Goldemberg (2007)

Crises energéticas sempre trazem à tona a vulnerabilidade do sistema de geração concentrada em poucos combustíveis, tornando-se assim, as fontes alternativas, soluções que podem atender de forma satisfatória as comunidades (KAZAY; LEGEY, 2002) apud Innocente (2011). Conforme Goldemberg (2009) cita a Revolução Industrial que se iniciou com o uso das máquinas a vapor no fim do século XVIII, a importância do carvão, que era pequena, usado principalmente para aquecimento residencial, aumentou para 15% em 1850 e cresceu rapidamente para 50% no fim do século XIX. Sendo que as projeções para o futuro indicam que a importância da biomassa aumentará muito, chegando a representar no fim do século XXI de 10 a 20% de toda a energia usada pela humanidade.

De acordo com Kazay e Legey, (2002) apud Innocente (2011), dentre as várias fontes alternativas de energia, as mais importantes, por ordem de potencial estimado, no Brasil são:

1. Eólica (57 GW);
2. Solar fotovoltaica (14,3 GW);
3. Obtida a partir da biomassa (20 GW);
4. Pequenas centrais hidrelétricas ou PCHs (9,5 GW).

Cerca de 45,2% do total da Oferta Interna de Energia no Brasil tem origem de fontes renováveis (14% correspondem à geração hidráulica, 28% a biomassa e 3,2% a outras fontes renováveis), enquanto no mundo essa taxa é de 12,9% e nos países desenvolvidos, de apenas 6,2%. A lenha e o carvão vegetal participaram, em 2007, com 12% da OIE, valor este 35,6% inferior em relação a 1970. A Oferta Interna de Energia restante, 54,1%, resulta de fontes fósseis e outras não renováveis (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2008 apud INNOCENTE, 2011)

Diante dos avanços tecnológicos, conquistados tanto na área energética, a partir de biomassa, quanto na silvicultura brasileira (aumento de produtividade, melhoramento genético, redução de custos, etc.) é possível prever um cenário favorável ao desenvolvimento de plantações energéticas (florestas energéticas) como fonte de matéria-prima para geração elétrica (MULLER, 2005).

3.2 Combustão direta da biomassa

Segundo Grauer e Kawano (2008) a energia química da biomassa pode ser convertida em calor e daí em outras formas de energia:

- **Direta:** através da combustão na fase sólida, sempre foi a mais utilizada;
- **Indireta:** quando através da pirólise, são produzidos gases e/ou líquidos combustíveis.

Podemos definir a combustão direta como a transformação da energia química dos combustíveis, neste caso a biomassa, em calor, por meio das reações dos elementos constituintes com o oxigênio fornecido.

O valor de cada tipo de biomassa sofre influência das propriedades físicas e químicas das moléculas a partir do qual é feita. O homem tem explorado a energia armazenada nas ligações químicas da biomassa, por meio da queima desta como combustível e ao ingerir plantas para aproveitar o conteúdo nutricional do seu açúcar e amido. (McKENDRY, 2002).

Uma das formas de utilização da biomassa é por meio da queima direta que produz energia térmica e elétrica, sendo, portanto a biomassa uma fonte primária de energia. Outra forma é através do processamento da biomassa para produção de combustíveis, como a gaseificação, ou de processos biotecnológicos, como a fermentação (GENOVESE et al., 2006) apud INNOCENTE (2011).

Segundo Arbex et al. (2004) a combustão pode ser entendida como um processo químico pelo qual um material reage rapidamente com o oxigênio do ar produzindo luz e calor intenso e, no caso da biomassa, se faz em três estágios (Figura 3):

- **Ignition:** ignição;
- **Flaming:** combustão com chama;
- **Smoldering:** combustão com ausência de chama, também chamada de incandescência.

Diversos fatores podem influenciar a combustão direta da biomassa, afetando também a quantidade de material particulado emitido pelo combustível.

O teor de umidade é um fator importante que influencia diretamente o poder calorífico dos materiais. Na queima do combustível úmido, a água é evaporada, portanto parte da energia liberada na combustão é gasta para essa evaporação. Assim, quanto maior o teor de umidade, menor será a quantidade de energia proporcionada pelo combustível.

A composição química é, também, uma característica dos combustíveis que influencia o seu rendimento energético (INNOCENTE, 2011).



Figura 3. Exemplo das fases da combustão direta da biomassa.

(a) Ignition; (b) Flaming; (c) Smoldering.

Apesar das vantagens que a biomassa apresenta na geração de energia em relação à outras fontes existentes, e de sua crescente oferta no mercado como combustível alternativo, deve-se tomar alguns cuidados quanto a sua utilização, tendo em vista algumas implicações ambientais relacionadas, como a emissão de efluentes gasosos. Na queima da biomassa podem ser gerados e emitidos ao meio ambiente gases tóxicos como o Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarbonetos (HC), Óxidos de Nitrogênio (NO_x) e os particulados. O CO dependendo da quantidade combinada com a hemoglobina provoca dores de cabeça, desconforto, cansaço, e em ambiente fechado, pode levar inclusive à morte (Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM, 2009).

3.3 Poluição do ar – Material particulado

Mundialmente é reconhecida a poluição do ar como um dos maiores problemas à saúde da população. Isso pode ser dito também para baixos níveis de concentração, sendo muitas vezes um “vilão invisível”.

Poluente atmosférico pode ser entendido como qualquer forma de matéria que em sua concentração, intensidade, tempo ou qualquer outra propriedade que estejam acima dos níveis estabelecidos pela legislação ambiental, bem como trazer riscos à saúde humana, fauna, flora e bem-estar público (RESOLUÇÃO CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990).

A poluição atmosférica afeta a vida de milhões de pessoas em toda parte do mundo, mas especialmente aquelas que moram em grandes cidades industrializadas e com grande tráfego de veículos. Odores, fumaças, poeiras, e gases corrosivos prejudicam a saúde humana, o ambiente e bens materiais. Existe uma ampla suscetibilidade do indivíduo aos efeitos da poluição do ar. Adultos podem tolerar concentrações relativamente altas de substâncias danosas, enquanto idosos e crianças são muito mais sensíveis.

Dentro de um programa de Gestão Ambiental se avaliarmos uma matriz de impactos ambientais de um grupo selecionado de indústrias como: a petroquímica, metalúrgica, indústria alimentícia, indústria de papel e celulose, indústria de cimento, indústria extrativa mineral, entre outras, verificaremos que todas elas apresentam emissões de particulados. Lembrando que a poluição veicular também colabora com a emissão de material particulado para a atmosfera na forma de fuligem, afetando diretamente a saúde da população (LORA, 2002).

Por estas razões já citadas acima, se torna importantíssimo um monitoramento da qualidade do ar e também das emissões atmosféricas industriais.

Segundo dados retirados da CETESB os principais objetivos do monitoramento da qualidade do ar são:

- Fornecer dados para ativar ações de emergência durante períodos de estagnação atmosférica (falta de vento e chuva), quando os níveis de poluentes na atmosfera possam representar risco à saúde pública.
- Avaliar a qualidade do ar à luz de limites estabelecidos para proteger a saúde e o bem estar das pessoas.
- Acompanhar as tendências e mudanças na qualidade do ar devidas a alterações nas emissões dos poluentes.

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) material particulado é toda e qualquer substância, com exceção da água pura, que existe em suspensão na atmosfera, com dimensões microscópicas, porém são maiores que as moleculares. Os particulados incluem poeiras, fumos, nevoeiro, aspersão e cerração.

Material particulado é normalmente caracterizado como Cenosferas, partículas esféricas, geralmente ocas e incombustas (Figura 4).

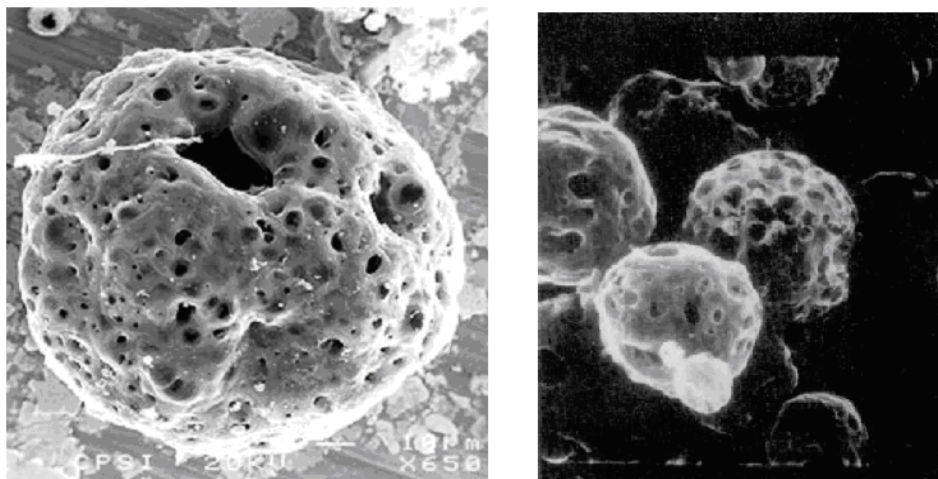


Figura 4. Micrografia de Cenosferas de material particulado

Fonte: ALMEIDA FILHO, 2008

A fração carbonácea das partículas atmosféricas é composta por carbono elementar, também designado de carbono negro ou grafítico, e por carbono orgânico. O primeiro é emitido diretamente para a atmosfera durante os processos de combustão. O segundo pode constituir as emissões primárias ou ser formado *in situ* por condensação de produtos de baixa volatilidade da foto-oxidação de hidrocarbonetos (ALVES, 2009).

Estima-se que a exposição ao material (PM), uma mistura de partículas líquidas e sólidas em suspensão no ar, classificadas de acordo com o seu diâmetro, causa 800.000 mortes em todo o mundo, das quais 35.000 ocorrem somente na América Latina. Crianças, idosos e portadores de doenças cardiorrespiratórias prévias, incluindo os asmáticos, compõem

a população mais suscetível aos efeitos da poluição atmosférica. (MASCARENHAS *et al.*, 2005)

Conforme Arbex *et al.* (2004) cita em seu trabalho, vemos na Tabela 1 os principais poluentes gerados quando se realiza a combustão direta da biomassa.

Tabela 1. Principais poluentes atmosféricos

Compostos	Exemplos
Partículas	Partículas Inaláveis – PM ₁₀ Partículas Respiráveis Partículas finas – PM _{2,5}
Aldeídos	Acroleína Formaldeído
Ácidos Inorgânicos	Monóxido de Carbono (CO) Dióxido de Nitrogênio (NO ₂) Ozônio
Hidrocarbonetos	Benzeno
PAHs	Benzopireno (BaP)

Dentre esses elementos, o material particulado decorrente da combustão de biomassa, seja em ambientes internos, seja em ambientes abertos, é o poluente que apresenta maior toxicidade e que tem sido mais estudado.

Em todo o planeta, a queima de biomassa representa a maior fonte de produção de PM e gases tóxicos como, por exemplo, monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e ozônio. (MASCARENHAS *et al.*, 2005)

Com o fenômeno das queimadas ocorre intensa produção de poluentes atmosféricos, entre os quais o material particulado com diâmetro igual ou menor de 2,5 µm, também chamado de particulado fino, e o material particulado grosso com partículas menores que 10,0 µm (PM₁₀) e considerado mais danoso à saúde humana, essa classificação pode ser vista na Figura 5. Os particulados presentes na atmosfera classificam-se em: finos (diâmetro menor que 2,5 µm) e grossos (diâmetro maior que 2,5 µm).

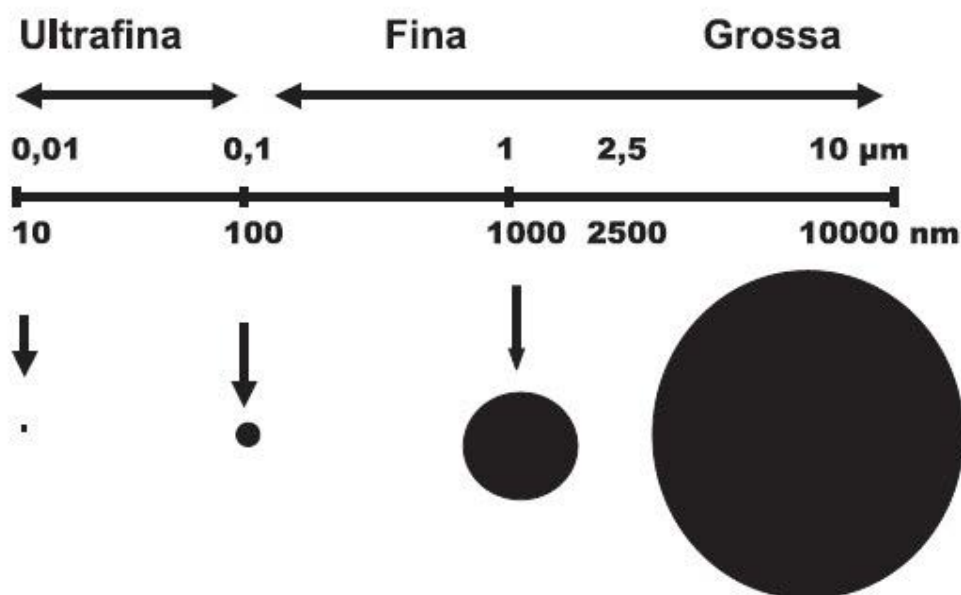


Figura 5. Classificação diametral das partículas.

Fonte: Donadson, 2001

Estudos mais recentes destacam o importante papel das partículas de menor tamanho (PM_{2.5}) como fatores de risco para doenças respiratórias (LEON, 2003), (WELLENIUS, 2005) apud (SILVA et al., 2010). Na ilustração da Figura 6, pode-se visualizar os eventos hipotéticos após a exposição a partículas ultrafinas quando comparado com a exposição a partículas finas.

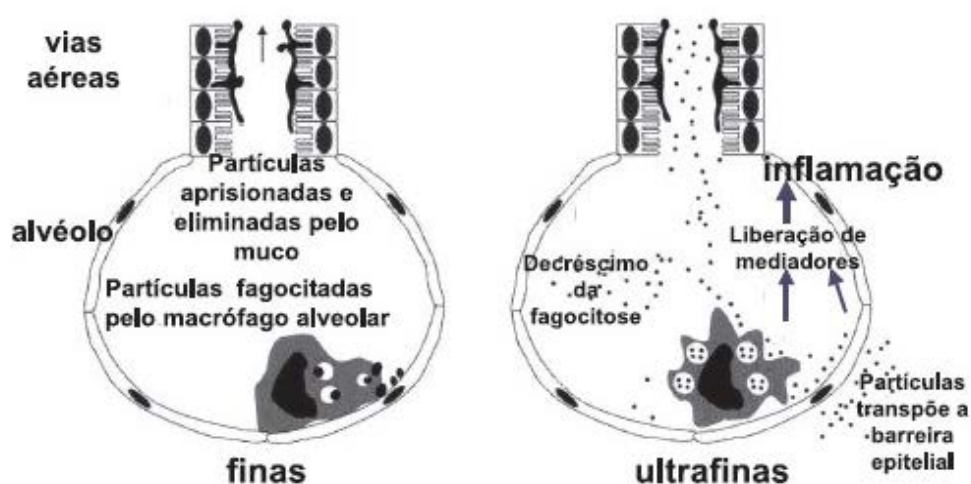


Figura 6. Eventos hipotéticos no sistema respiratório humano quando exposto a material particulado.

Fonte: Donadson, 2001

A fumaça decorrente da queima de biomassa em ambientes abertos produz efeitos adversos indiretos sobre a saúde, como a redução da fotossíntese, o que provoca diminuição das culturas agrícolas, ou o bloqueio dos raios ultravioletas A e B, o que provoca um aumento de microorganismos patogênicos no ar e na água, além do aumento de larvas de mosquitos transmissores de doenças (ARBEX *et al.*, 2004).

Os poluentes particulados apresentam um agravante, pois servem de veículo para a entrada no organismo de outros poluentes adsorvidos na sua superfície. Partículas de poeira, material particulado gerado na exaustão de máquinas movidas à queima de combustíveis fósseis e, também, os aerossóis formados durante a queima de biomassa funcionam como absorventes da radiação solar incidente e como suporte adsorvente para compostos químicos, como por exemplo, gotículas de vapor de água condensado, ou mesmo como catalisadores, podendo levar o SO₂ disperso na atmosfera a sulfato.

A deposição dos particulados em diferentes partes do sistema respiratório depende de suas dimensões. Considerando a relação entre o diâmetro das partículas e sua precipitação no alvéolo pulmonar sabe-se, segundo Kikuo (1997), que as partículas grandes são depositadas na região nasal por impactação nos cabelos do nariz e nos desvios nas passagens nasais. Partículas pequenas passam através da região nasal e são depositadas na traquéia bronquial e regiões pulmonares. Partículas maiores que 10 µm são geralmente adsorvidas pela cavidade nasal e garganta, enquanto que 90 % das partículas maiores que 5 µm precipitam nas partes superiores das vias respiratórias. Partículas de tamanho entre 1 e 5 µm precipitam na traquéia e brônquios. Partículas finas menores que 1µm alcançam os brônquios e os alvéolos.

3.3 Padrões de Qualidade do ar

Segundo a CETESB (2002), os padrões de qualidade do ar definem legalmente o limite máximo para a concentração de um poluente na atmosfera, que garanta a proteção da saúde e o bem-estar das pessoas.

Os padrões nacionais foram estabelecidos pelo IBAMA - Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e aprovados pelo CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente.

A resolução número 3 do CONAMA de 1990 diferencia os materiais particulados em duas classes, como segue abaixo:

- Particulados primários são aqueles produzidos como um resultado direto de emissões de processos químicos e físicos.
- Particulados secundários são resultantes de reações químicas em emissões gasosas que produzem materiais particulados líquidos ou sólidos.

3.4 Amostragem de material particulado em fontes estacionárias

Segundo H. Tsuji *et. al.* (2001) a influência do material particulado em nosso meio vem sendo estudada em muitas pesquisas científicas e em diferentes países. As partículas finas recebem uma atenção maior devido ao seu baixo peso, e por isso podem ficar suspensas no ar por mais tempo que as partículas grossas. Grande parte do material particulado é gerado pela queima de combustíveis fósseis que atualmente são indispensáveis para a atividade humana. É necessário desenvolver uma técnica representativa para a coleta e amostragem de partículas finas em dutos de exaustão industrial, facilitando a investigação do material particulado suspenso no ar ambiente.

As técnicas de amostragem de poluentes particulados na atmosfera, como amostragem de partículas dispersas em correntes gasosas em dutos, envolvem a extração de um volume de gás transportando partículas. O volume de gás é aspirado por um sistema de amostragem, que consiste de bocais e sondas sendo levado a um coletor ou sensor para quantificação das partículas.

Tratando-se de amostragem em dutos (como em chaminés industriais), as técnicas utilizadas são mais elaboradas e exige uma maior representatividade dos dados obtidos. Num processo de amostragem em dutos existem dificuldades na representatividade da amostra, na localização da amostragem ao longo do duto e nas medições dos pontos específicos de amostragem. Na amostragem de sistemas confinados (alta concentração e alta taxa de emissão) as variações locais da concentração no duto são muito importantes no cálculo da taxa de emissão.

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

- Amostragem do ar ambiente para monitoração da qualidade do ar;

- Amostragem na fonte, por exemplo, a emissão em uma chaminé industrial.

No primeiro grupo busca-se a determinação da concentração do ar público, ou monitoração ambiental, geralmente para verificar se as concentrações dos poluentes encontram-se dentro de padrões. No segundo grupo objetiva-se a determinação de taxas de emissão de uma fonte poluidora. No caso de processos que envolvem, por exemplo, combustão, a taxa de emissão de partículas na atmosfera pode ser feita com medidas em loco em chaminés, determinando a concentração das partículas no gás efluente e vazão do mesmo.

3.5 Amostragem isocinética

Para se realizar amostragens no interior de dutos se requer que a amostragem seja feita de maneira isocinética, ou seja, a retirada de amostras da chaminé tem que ser realizada na mesma velocidade do interior do duto, para que assim a quantidade amostrada seja coerente com a concentração no interior da chaminé.

Santen (1987) cita que a amostragem de partículas dispersas em um gás quando requerida, deve ser efetuada isocineticamente. Assim, o bocal conectado a sonda de amostragem, deve ter sua vazão de amostragem ajustada tal que a velocidade de amostragem seja a mesma da velocidade local do fluxo. Se a velocidade do gás no bocal de amostragem é a mesma da velocidade na chaminé ou duto onde a amostragem é efetuada, a condição de amostragem é isocinética e as medidas de concentração serão representativas. As concentrações medidas serão as mesmas que as concentrações reais.

Para a realização de amostragens no interior de dutos sondas de amostragem são necessárias e consistem de um pequeno tubo metálico, em forma de L. Na extremidade da sonda que entra em contato com o fluxo de gás com partículas, conecta-se um bocal de amostragem (Figura 7), projetado para certa vazão de gás no duto. Com esse bocal 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 é conectada a um canal, ou duto que arrasta as partículas amostradas para um equipamento coletor ou até o sensor do monitor, onde este efetua a contagem de partículas. Sondas são posicionadas perpendicularmente no interior do duto, movendo-se nas linhas de corrente.

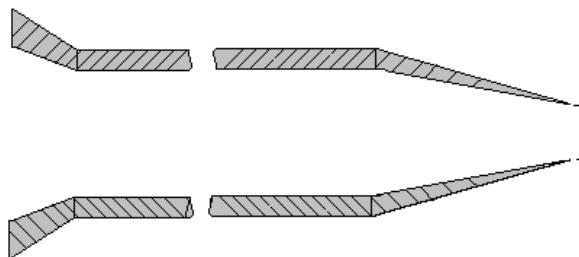


Figura 7. Exemplo de bocal de amostragem.

3.6 Distribuição diametral de material particulado

Segundo Hosseini *et al* (2010) consideráveis estudos foram desenvolvidos para caracterizar os poluentes associados à combustão de biomassa de um modo geral. Dentre esses incluem o material particulado (PM) também liberado em grande quantidade para a atmosfera. As partículas afetam a radiação dependendo da distribuição de seu tamanho, da morfologia e da composição química. Estudos evidenciam o papel da distribuição de tamanho das partículas e seu efeito adverso a saúde humana e a deposição das partículas.

A distribuição de tamanho de partículas e a taxa de emissão de material particulado provenientes da combustão da biomassa florestal são parâmetros considerados importantes, pois afetam a qualidade do ar, causam efeitos a saúde e ao clima. Nas últimas décadas muitos estudiosos desenvolveram seus trabalhos sobre a queima de biomassa florestal e os aerossóis, na maioria destes estudos os resultados se referem a partículas de 2,5 a 10 μm . Em termos de distribuição de tamanho, amostragem ambiental e avaliação de equipamentos, podemos citar: Lonati, G., *et.al.*, 2011, Man Ting Cheng, *et.al.* 2010, S.Y.Ryu, *et.al.*, 2007, Donateo, A., *et.al.*, 2006, Li Li, Wu, Wang, *et.al.*, 2010 e Bhabesh Chakrabarti, *et.al.*, 2002 (os dois últimos avaliaram modelos diferentes de amostradores DataRam).

Para Li Li, Wu Wang *et.al* (2010) partículas especialmente finas com diâmetro aerodinâmico menor que 2.5 μm são o foco central das propriedades físicas e químicas da atmosfera. Esses aerossóis podem afetar adversamente a visibilidade, absorção da radiação solar, a influência no clima global e logicamente a saúde humana.

Em relação aos estudos de queima de biomassa em escala de laboratório, Hosseini, *et.al.*, 2010, avaliaram a distribuição de tamanho de partículas provenientes da queima de biomassa em laboratório, utilizando equipamentos de resposta rápida. Citaram que partículas finas e a distribuição de tamanho afetam a radiação. A distribuição de tamanho difere de acordo com a fase da combustão da biomassa (ignition/flaming/smoldering), condição do combustível (vivo, morto e umidade), configuração (densidade) e os tipos (folhas e galhos).

A distribuição das partículas vem sendo estudada por alguns autores, para Hays, *et.al.*, 2002, *apud* Hosseini, *et.al.*, 2010, os valores de diâmetro médio geométrico apresentados foram de 0.1 a 0.2 μm . Para Hosseini, *et.al.*, 2010, a distribuição de partículas medida por um contador de partículas óptico, durante a queimada de savana foi de 0.2 a 0.3 μm e outras acima de 2 μm . Chakrabaty *et.al* (2006) *apud* Hosseini, *et.al* (2010), mediram em escala de laboratório com um CMD (Count Median Diameter) a distribuição de partículas provenientes da combustão de diferentes tipos de combustível de biomassa e verificaram que o diâmetro equivalente de área projetada variou de 30 a 200nm para biomassa úmida (20% de umidade em base seca) e seca (5-10% de umidade em base seca), respectivamente, a maior moda de diâmetro variou de 40 a 45nm. Os experimentos de Hosseini, *et.al.*, 2010, foram realizados no USDA (Forest Service's Fire Science Laboratory) em Missoula, a velocidade do ar na chaminé variou entre 1.5 a 3.0 m/s. A amostragem do PM foi realizada isocineticamente, a amostra foi diluída usando um mini túnel de diluição na razão de 1:13.5. O aerossol diluído foi direcionado a um impactador PM_{10} , então analisado por Fast Mobility Particle Size (FMPS-model3091, TSI), Diâmetro aerodinâmico das partículas (APS-model3321, TSI) e um "Condensation Particle Counter" (CPC-model3775, TSI). Seus resultados mostraram que as distribuições de tamanho de partículas medidas com o FMPS, para alguns combustíveis apresentaram uma distribuição bimodal com a menor moda de concentração em torno de 10nm e as maiores modas variando entre 29 e 52nm. Ressaltaram que no trabalho de Chakrabaty *et.al.*, 2006, utilizando o mesmo combustível e analisando com o CMD, a distribuição de tamanho das partículas foram de 30 a 70nm para combustíveis secos e para combustíveis úmidos os valores foram maiores 120 a 140nm. De acordo com o trabalho de Hays, *et.al.*, 2002, discutido por Hosseini, *et. al*, 2010 a distribuição de partículas obtidas com a queima de biomassa na agricultura, com queima aberta, conduzida ao confinamento com diluição, os valores da distribuição de partículas foram em torno de 100nm. Os resultados apresentados pelo uso do FMPS em relação às fases de queima mostraram que os diâmetros médios variam de 25 a 80nm (flaming), 30 a 50 nm e em curva

bimodal de 10nm e 50 nm (smoldering). As distribuições de partículas medida pelo APS o diâmetro médio mássico foi de 0,5 μm ou 500nm. Partículas maiores que 100nm (0,1 μm) em diâmetro foram reportados por diversos estudos prévios feitos em campo, entretanto partículas menores foram reportadas em medidas de laboratório, isto pode ser atribuído devido a diluição e o efeito da coagulação e condensação. Em relação as medidas realizadas com o APS os autores verificaram que os diâmetros maiores das partículas foram emitidas na fase de flaming em torno de 0,5 μm (500nm) e após esta fase o diâmetro decresceu. Em relação a concentração de partículas, observou um máximo durante a fase de flaming, uma diminuição até um ponto de mínimo e novamente uma elevação a um valor constante na fase de smoldering. Notaram que a emissão de partículas ultrafinas ($D_p < 100\text{nm}$) reduz significativamente com o progresso da combustão. Por outro lado altas concentrações de partículas entre 0,5 e 1 μm persistem nas fases flaming a smoldering e passa a ter um distribuição de diâmetro constante depois de 400 s na fase smoldering.

Hosseini *et.al* (2010) concluíram em relação à evolução da distribuição de tamanho de partículas, que é extremamente difícil identificar esta evolução durante a queima da biomassa, devido ao grande número de variáveis na composição do combustível, a umidade, o arranjo do leito de combustível e a natureza turbulenta da combustão. Seus resultados, obtidos com o FMPS e o APS, mostraram essa evolução a partir de uma fase de ignição extinta, sendo que a maior concentração de partículas foi durante a fase de flaming (confirmado pelos dados de CO e CO₂) e decresce para o menor valor de concentração num tempo de aproximadamente 200 segundos de queima já na fase de smoldering. Nesta fase a concentração apresenta um leve aumento e permanece constante num platô.

Hays *et.al.*, (2002) avaliaram a composição de PM proveniente da queima de seis tipos de biomassa foliar e determinaram também a distribuição de tamanho de partículas na pluma de fumaça. Os combustíveis foram selecionados e coletados e no dia da queima a umidade do combustível foi determinada por análise gravimétrica, além da densidade, composição e características do fluxo de ar. A combustão aberta da biomassa foi simulada no interior de paredes de alumínio com 28 m³, como uma câmara de fogo, com um leito que continha uma balança eletrônica. A massa de combustível consumido foi monitorada pelo uso remoto da balança. Foram utilizados de 1 a 5 kg de combustível na caixa de fogo, a uma distancia de 33 cm acima desta caixa, o fluxo gasoso era confinado e direcionado a um duto circular de 19 cm de diâmetro por meio de soprador de ar. O flange para o posicionamento da sonda de amostragem foi fixada a uma distancia de 74 cm fora da zona de fogo. As amostragens foram configuradas para coletar a fase gasosa e a fase gás-partícula, com o

intuito de medir a distribuição de partículas emitidas pela combustão. A coleta de PM foi realizada por um ciclone operando com amostragens de $PM_{<2.5}$. Através de um TSI (model 3081) determinaram a distribuição de tamanho de partículas em intervalos de 60s. Este sistema foi capaz de determinar diâmetros de partículas no intervalo de 10 a 1000nm. Seus resultados mostraram que o diâmetro médio das partículas foi em torno de 100nm, e em relação às fases da combustão verificaram que ocorreu uma diferença na distribuição de tamanho de acordo com o tipo de biomassa, entretanto para todos os tipos os menores diâmetros foram identificados na fase de smoldering, na fase de flaming identificaram diâmetros intermediários e os maiores diâmetros obtidos foram na fase de ignição, os mesmos resultados obtido por Hosseini *et.al* (2010).

3.7 Avaliação de equipamentos na determinação do diâmetro de PM

Especificamente em relação à avaliação de equipamentos na determinação de tamanho de partículas citamos o trabalho de Bhabesh *et.al.*, (2002) e de Donateo *et.al* (2006) que avaliaram o DataRam $PM_{2.5}$ pessoal/portátil e o Detector óptico Mie pDR-1200, respectivamente. No trabalho de Bhabesh *et.al* (2002) avaliaram a performance de DataRam Personal (Mie pDR-1200) na previsão de concentração mássica em tempo real e o efeito da umidade e do tamanho da partícula na resposta do pDR. Este equipamento é um nefelômetro, precedido de um ciclone com diâmetro de corte de $2.5\mu m$ a uma vazão de amostragem de 4 L/min, designado especialmente para amostragem de particulados. Foram testados três pDR idênticos posicionados dentro de um trailer de instrumentação localizado próximo à University of Southern California na cidade de Los Angeles. O aerossol ambiental disperso acima do telhado do trailer era succionado por tubos de aço inox e levado até as três linhas de amostragem, para cada um dos pDR. Antes das amostragens os três pDR foram calibrados e operaram com o ciclone separador de partículas $2.5\mu m$ com a mesma vazão de 4 L/min. Estes amostradores contínuos, pDR, foram comparados com outros amostradores como o Beta Attenuation Monitor (BAM, model 1020), o qual foi considerado como referência para o estudo de Hays. Seus resultados mostraram que a precisão dos monitores pDR para amostragem da concentração mássica de $PM_{2.5}$ ambiental foi muito alta. Em relação ao efeito da umidade, em ambos os equipamentos avaliados, pDRs e o BAM, observou-se um aumento do tamanho da partícula com o aumento da umidade para valores acima de 60%. Verificaram

também que os valores obtidos de concentração para $PM_{2.5}$ para ambos os tipos de equipamentos, pDRs e o BAM, apresentaram uma alta correlação.

No trabalho de Donateo, A., *et.al.*, (2006), avaliaram as medidas em tempo real de concentração de $PM_{2.5}$ em fluxo vertical turbulento usando detector óptico. Eles verificaram que altos valores de umidade relativa afetam a distribuição de tamanho do aerossol, pois o PM absorve o vapor d'água modificando a dimensão, a densidade e propriedades ópticas e este processo modifica os coeficientes de absorção e refração das partículas no detector. Compararam às medidas obtidas com o detector óptico com medidores gravimétricos, os resultados apresentaram uma boa correlação. Concluíram que para valores de umidade relativa maiores que 70% deve-se utilizar fatores de correlação para a concentração de $PM_{2.5}$.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram realizados experimentos utilizando o aparelho de amostragem de material particulado DATARAM4. O primeiro experimento consistiu em testes realizados com biomassa da floresta Amazônica, onde foram efetuados amostragens de concentração de material particulado e distribuição de tamanho de partículas confinadas em dutos no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do INPE de Cachoeira Paulista – SP. O segundo consistiu na análise da emissão de material particulado na queima de maravalha (resíduo de serraria – pinus e eucalipto) em um queimador de uma estufa de secagem de madeiras localizado no laboratório de Fenômenos de Transporte do Campus Experimental da UNESP de Itapeva.

4.1 Analisador do Material Particulado - Data Ram 4

O DATARAM (Figura 8) é um instrumento tecnologicamente avançado destinado a medir a concentração de material particulado em suspensão no ambiente (líquido ou sólido) ou no interior de dutos, bem como o tamanho médio de partícula, temperatura e umidade do ar.



Figura 8. Analisador de Material Particulado DataRam4.

Este equipamento foi utilizado nos testes de amostragem de partículas emitidas em tempo real de queima, confinadas em duto em experimentos de laboratório. O DATARAM é um nefelômetro de duplo comprimento de onda, que incorpora duas fontes de iluminação com pico de 660 nm e outro a 800 nm, funcionando alternativamente com pulso de 27 segundos de frequência. O sistema trabalha com amostragem de ar ativa, sendo que os dois feixes de luz são emitidos de forma simétrica e em mesmo ângulo. A realização da leitura do diâmetro das partículas acontece através de uma relação diretamente proporcional à quantidade de luz emitida pelo sistema e refletida para um dispersor comum, do receptor direto dos sinais emitidos. Essa diferença entre os sinais refletidos e não refletidos gera o diâmetro aerodinâmico médio sobre a distribuição de partículas dispersas na região sensível do DATARAM. O equipamento pode coletar uma população de partículas com diâmetros variando de 40 nm à 4000 nm, ou seja, de 0,04 μm à 4 μm . Com este equipamento podemos amostrar as partículas dispersas no ambiente (Entrada de Amostragem Omnidirecional para amostragens em ambientes externos) e as partículas dispersas em corrente confinadas em dutos (Sonda de amostragem Isocinética). Caso a concentração ou a temperatura exceda as condições operacionais do equipamento podemos utilizar o periférico chamado de Diluidor, o qual permite a injeção de ar limpo e refrigerado na corrente de ar a ser amostrado. Também podemos utilizar o Aquecedor de Fluxo (hot) para eliminar a umidade (recomenda-se o uso para valores acima de 60%) que pode vir a interferir no tamanho das partículas, esta interferência foi descrita no trabalho de Bhabesh C., *et.al.*, (2002), com o uso deste aquecedor de fluxo nos testes de amostragem eliminamos a interferência da umidade no diâmetro das partículas. Em todos os testes realizados com DATARAM4 com umidade acima de 50% o sistema de aquecimento foi utilizado. Teoricamente, quanto maior a umidade do ambiente, maior é a probabilidade da formação de uma camada, ou película, de água sobre uma partícula, fazendo com que haja uma pequena refração de luz incidente sobre ela e, assim, um erro na obtenção do seu diâmetro aerodinâmico verdadeiro. Para corrigir esta diferença, o DATARAM faz uma correção no *fator de sinal de dispersão*, para umidades maiores que 50% que é onde a umidade começa a influenciar o diâmetro da partícula.

A concentração, por sua vez, é calculada pelo volume de amostras coletadas considerando uma densidade de 2,6 g/cm³, padrão do equipamento e valor próximo do particulado amostrado neste trabalho. O sistema de detecção de partículas fornece o diâmetro médio mássico de partícula para o aerossol amostrado, numa faixa de 0 a 400 mg/m³.

O DATARAM4 abrange uma ampla faixa de medição de concentração variando de $0,0001 \text{ mg/m}^3$ a 400 mg/m^3 , uma extensão de 4.000 mil vezes, o que corresponde à limpeza do ar até para os níveis de partículas extremamente elevados.

As seguintes informações podem ser visualizadas através do equipamento:

- Diâmetro médio das partículas;
- Coeficiente de dispersão;
- Coeficiente de Ångström;
- Data e hora das medições;
- Concentração média;
- Tempo total de amostragem;
- Temperatura ambiente;
- Umidade Relativa;
- Parâmetros operacionais;
- Telas de informações de diagnóstico, dentre outros.

Durante a amostragem os dados são armazenados na memória interna do equipamento, sendo posteriormente transferidos para o computador para uma posterior análise. Esse procedimento é realizado através de um pacote de software personalizado que é fornecido com o DATARAM4.

Através deste software também é possível configurar o equipamento para uma análise, selecionando as unidades de medida, horário de início automático, vazão de coleta, dentre outras variáveis, como mostra a Figura 9.

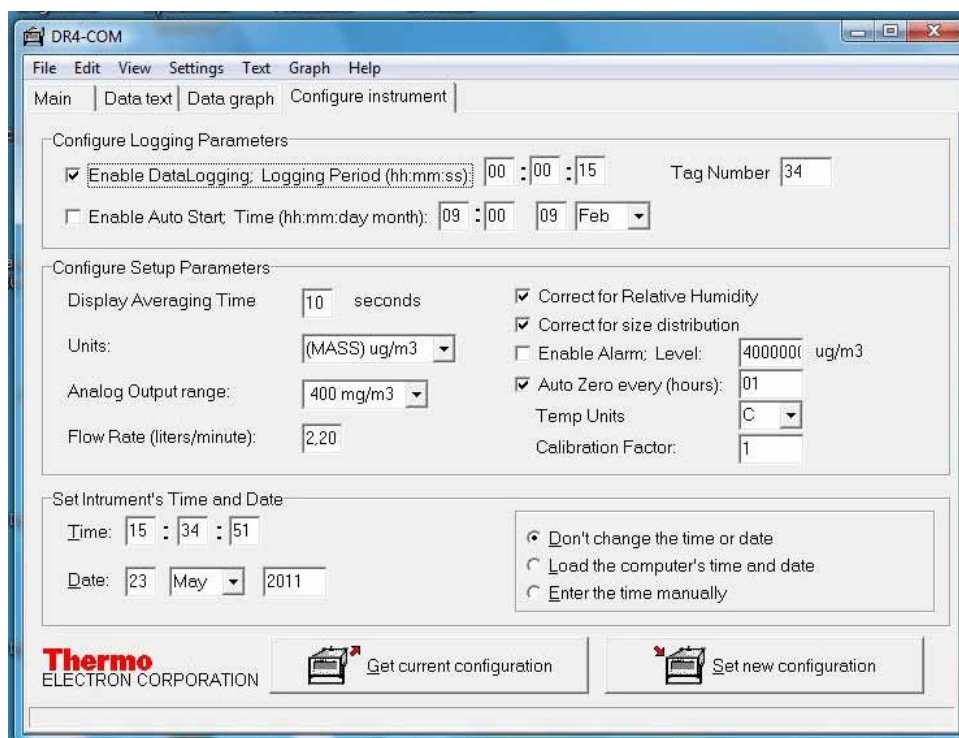


Figura 9. Software do DataRAM4.

4.2 Amostragem isocinética utilizando o DataRAM

Para a amostragem do material particulado utilizou-se do DATARAM e com uma sonda que fazia parte do próprio amostrador, como mostra a Figura 10. Na ponta da sonda deve ser acoplada uma boquilha de amostragem, com o equipamento estavam disponíveis quatro boquilhas de diferentes diâmetros (Figura 11), que variam conforme a velocidade da corrente gasosa. Para utilizarmos a boquilha correta de acordo com as velocidades desejadas do experimento utilizamos o gráfico mostrado na Figura 12, fornecido pelo fabricante do amostrado. Com o gráfico verificamos a boquilha e também qual a vazão de amostragem devia ser configurada no equipamento, garantindo assim que a amostragem fosse isocinética, ou seja, o equipamento succiona o gás da corrente gasosa na mesma velocidade em que o gás flui dentro do simulador de chaminé industrial.



Figura 10. DATARAM acoplado com a sonda de amostragem.



Figura 11. Boquilhas para amostragem.

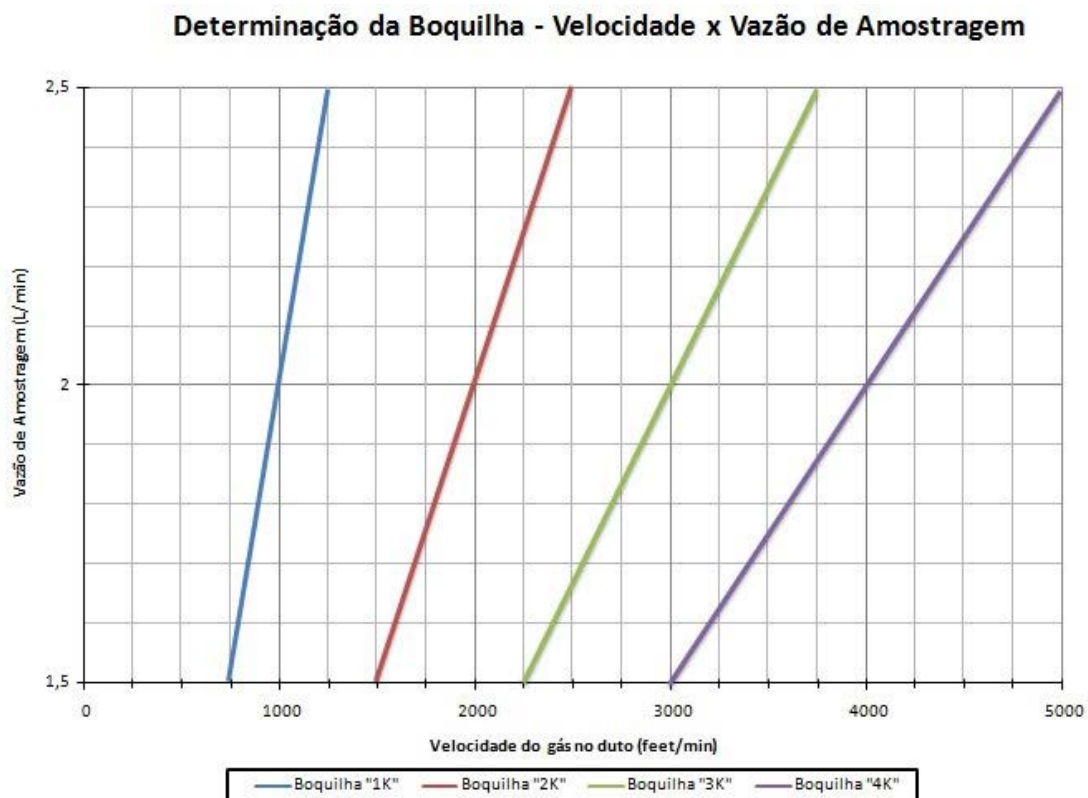


Figura 12. Gráfico para determinação da boquilha de amostragem.

Após este procedimento as boquilhas foram instaladas na sonda, bem como foi realizada a configuração do DATARAM para o início da amostragem. As principais variáveis alteradas foram: vazão de amostragem, tempo de armazenamento de dados e liberação da memória para guardar os dados.

4.3. Experimento 1 - Análise da emissão de material particulado a partir da queima de biomassa proveniente da Floresta Amazônica

4.3.1 Determinação do Teor de Umidade

O combustível utilizado no queimador foi biomassa proveniente da floresta amazônica. Para a determinação do teor de umidade do combustível utilizado neste experimento foi utilizado o método gravimétrico.

Inicialmente, foram pesados, em uma balança analítica (Figura 13A), certa quantidade da amostra do combustível úmido, onde então essa amostra foi levada, através de um cadinho, até uma estufa a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 13B), até que a amostra atingisse peso constante. Após esse procedimento a amostra seca foi pesada na balança analítica. Com os valores obtidos pode-se determinar o teor de umidade da amostra, através da Equação 1.

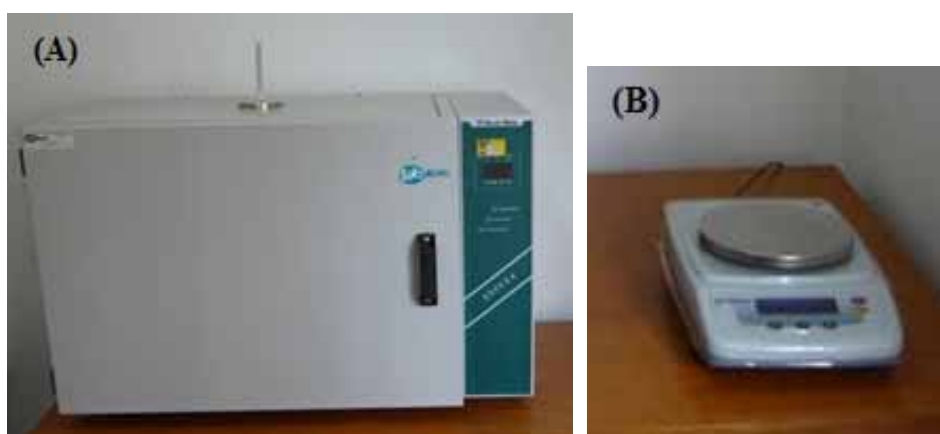


Figura 13. (A) Estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. (B) Balança analítica.

$$\text{TU (\%)} = \frac{m_{\text{úmida}} - m_{\text{seca}}}{m_{\text{úmida}}}$$

Equação 1

4.3.2 Amostragem de material particulado utilizado biomassa Amazônica

A amostragem de particulados emitidos pela queima de biomassa florestal da Amazônia foi realizada em testes de laboratório, em um equipamento no Laboratório de Combustão e Propulsão LCP-INPE de Cachoeira Paulista, mostrado na Figura 14.

Para amostragem do material particulado utilizou-se o DATARAM4, descrito anteriormente, seguindo as orientações para uma amostragem isocinética no interior de dutos, seguindo as normas vigentes e indicadas para essa amostragem. Neste trabalho foram realizadas amostras representativas do fluxo gasoso, utilizando-se do sistema de amostragem múltiplo. Para amostragem de material particulado no interior de dutos, ou seja, em correntes

confinadas, exigem-se procedimentos de amostragem essencialmente representativa destas partículas, devido à variação das propriedades do fluxo no duto, como velocidade e temperatura. As partículas finas e ultrafinas seguem as linhas de corrente do fluxo gasoso e facilmente podem desviar-se dos coletores, deste modo as amostragens devem ocorrer de forma isocinética, seguindo uma normatização.

As normas exigidas à adequação do duto e amostragem para a obtenção de dados de distribuição granulométrica e concentração de partículas em dutos são: BS 3405 (1983), CETESB, L9. 217, L9. 217, L9. 222, L9. 223, L9. 255, ressaltando-se o uso das normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) MB 3355, MB-3081, MB-3080, NBR 10701, NBR 12020, NBR 10702, NBR 10700; Essas normas foram devidamente seguidas nos testes de amostragem realizados neste trabalho.

A Figura 15a apresenta as especificações segundo a norma CETESB L9.221 (1990), para a determinação do local dos orifícios nos quais foram inseridas as sondas de amostragem. Foram construídos dois orifícios flangeados de 100 mm (4 polegadas) de diâmetro, perpendiculares entre si.

A distância vertical destes orifícios foi estabelecida considerando-se o diâmetro interno D para o duto, a distância $2D$ da parte superior ao flange e $8D$ do flange à coifa. Já na Figura 15b podemos observar o duto no qual foram realizadas as amostragens, com diâmetro interno de 270 mm e externo de 300 mm, de aço Inox, com comprimento de quatro metros. Os orifícios de inserção das sondas foram fixados a 2600 mm após a coifa, 600 mm antes do exaustor e 600 mm da saída do duto, valores estabelecidos de acordo com as normas descritas anteriormente.

A quantidade de pontos no interior do duto, de acordo com CETESB, L9. 217, nos quais foram posicionadas as sondas de amostragem é mostrado na Tabela 2. A distância entre os pontos foi calculada em função do diâmetro do duto.



Figura 14. Equipamento de combustão de biomassa e amostragem de PM e gases no LCP-INPE de Cachoeira Paulista.

Observando-se a Figura 14, tem-se na parte inferior uma bandeja de 1 m² de área e uma balança com precisão de 0,001 kg e espessura de leito de 5 à 15 cm, na qual quantificou-se a biomassa a ser queimada. Aproximadamente 3200 mm da saída da coifa, encontrava-se instalado o exaustor que gerava fluxo de ar vertical por convecção forçada. Os valores das vazões foram de 600 m³/h à 1050 m³/h no interior do duto, atingindo, assim, velocidades de, aproximadamente, 3 m/s à 5 m/s. A pressão no interior duto era, aproximadamente, 95,5 kPa.

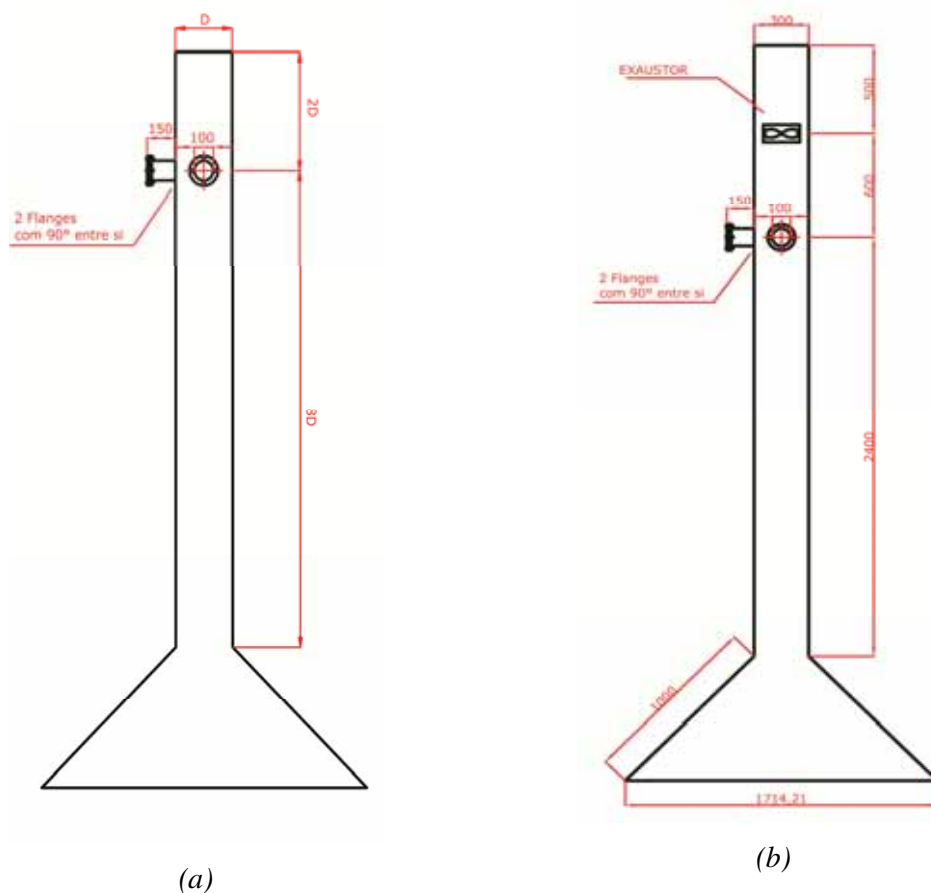
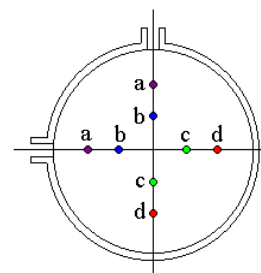


Figura 15. (a) Desenho esquemático das posições dos orifícios de amostragem em um duto segundo as normas, (b) dimensões do duto utilizado durante as amostragens (mm).

Tabela 2. Localização dos pontos de amostragem no interior do duto.

Pontos de Amostragem BS 3405 (1983)	Distância da parede	Distância Final (cm) $D_{i \text{ duto}} = 27 \text{ cm}$
a	0,065 D	1,76
b	0,250 D	6,75
Centro	Centro	13,50 (centro)
c	0,750 D	20,25
d	0,935 D	25,25



A velocidade e pressão no duto eram monitoradas continuamente. Para uma amostragem isocinética, manteve-se a velocidade de sucção da amostra igual à velocidade do gás no interior do duto. Somente nestas condições teríamos uma amostragem representativa,

além de manterem-se distâncias mínimas estabelecidas para obter um perfil de velocidade definido no interior do duto. Com o valor prévio da velocidade determinou-se a boquilha (nozzle), a qual era acoplada a sonda, (Sonda de Amostragem Isocinética e Boquilha são equipamentos periféricos do DATARAM4), adequada para manter a amostragem isocinética, paralelamente selecionava-se e programava-se a vazão de amostragem no DATARAM4, vazão esta que assim como a boquilha de amostragem é determinada através do gráfico mostrado na Figura 12.

A Figura 16 ilustra a sonda inserida no interior do duto para a amostragem.

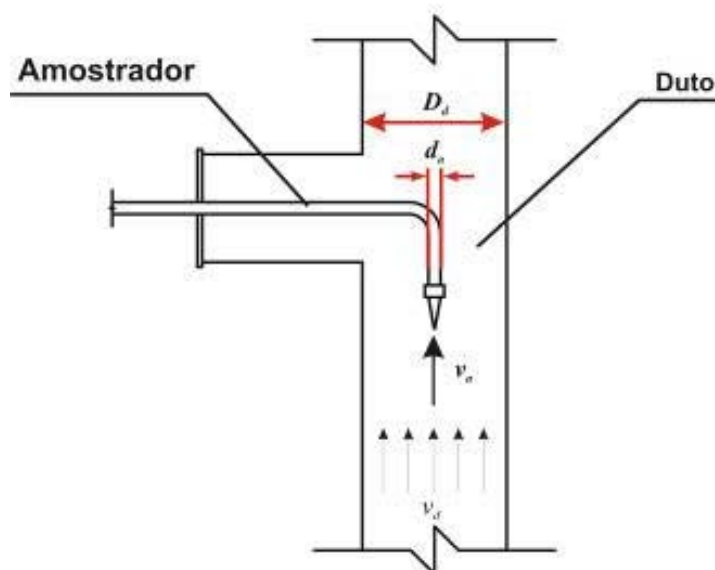


Figura 16. Esquema da sonda e bocal de amostragem isocinética ($V_d=V_a$) no interior do duto.

Foram analisadas três fases durante a queima de biomassa de Floresta Amazônica: Fase de Ignição, Fase de chama e Fase de Incandescência. O tempo pode variar dependendo da amostra a ser queimada. Nos testes experimentais com o DATARAM4, os tempos das fases variaram em torno de 1 minuto e 30 segundos para a Fase de Ignição e 15 minutos para Fase de Chama. A Fase de Incandescência não tem um tempo específico, pois uma amostra pode ficar muitas horas emitindo fumaça.

A velocidade do ar no interior do duto variou entre 3,0 e 5,0 m/s, apresentando fluxo gasoso ao longo do diâmetro do duto nos pontos de amostragem. Durante os testes

fixou-se a velocidade do fluxo de 4,2 m/s, equivalente a 826,8 ft/min, para esta velocidade (V_d) utilizou-se a boquilha “1K”, a qual foi acoplada na sonda isocinética do DATARAM4. Posteriormente fixou-se o valor de vazão de amostragem do equipamento de amostragem de 1,66 L/min, conforme o gráfico mostrado na Figura 12. Assim, para a realização da coleta isocinética no interior do duto, o DATARAM4 foi programado/calibrado para coletar amostras em uma vazão de 1,66 L/min, mantendo a amostragem isocinética ao longo dos testes.

O objetivo desta parte experimental foi determinar a distribuição de tamanho das partículas e a concentração ao longo do duto, para apresentarmos resultados representativos de concentração e de tamanho de partículas dispersas no interior do duto.

4.4 Experimento 2 – Avaliação da emissão de material particulado na chaminé de um queimador industrial utilizando resíduo de serraria

Este experimento visa analisar a emissão de material particulado na queima de biomassa (resíduo de serraria) em um queimador de biomassa para aquecimento da água de uma estufa de secagem de madeiras, utilizando para isso o DATARAM4. Este experimento foi realizado duas vezes, com o intuito de se obter uma confirmação dos dados obtidos nos testes.

4.4.1 Queimador de biomassa de uma câmara de secagem de madeira

Foi realizado o monitoramento da emissão de material particulado em uma estufa para secagem de madeira alimentada por biomassa como mostra a Figura 17, onde também pode ser visualizado o local de amostragem.

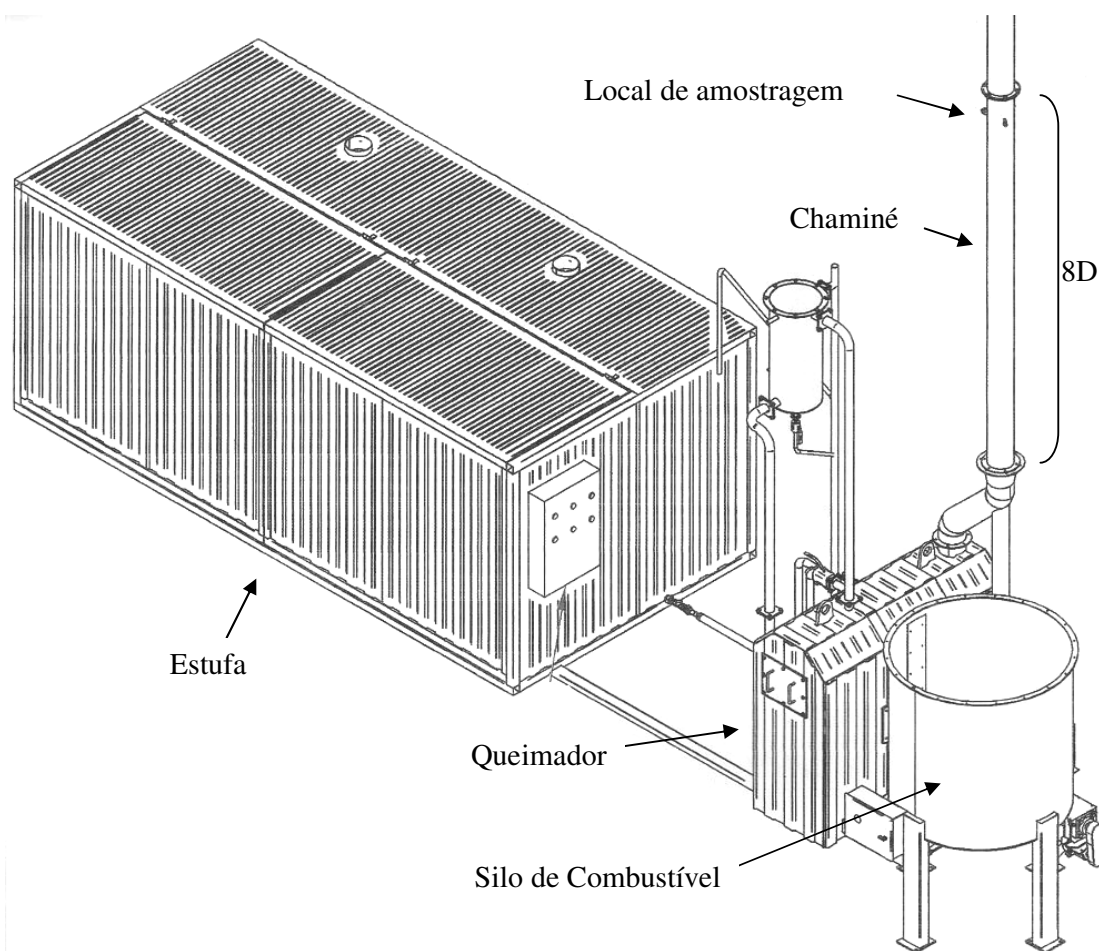


Figura 17. Disposição geral dos componentes integrantes da câmara de secagem.

Primeiramente colocou-se os resíduos de madeiras diversas provenientes de aplainamento no reservatório do queimador de biomassa (Figura 18), após, com a rosca transportadora (Figura 19) a mesma foi levada até o queimador (Figura 20) onde se deu início a combustão. A rosca transportadora possui a função de realizar a alimentação constante de combustível no queimador.

A carbonização da biomassa nesse queimador acontece em uma grelha fixa (Figura 21) onde a biomassa é depositada em sua parte superior. Caso fosse impossibilitada a alimentação de combustível através da rosca, também era possível a alimentação através de uma porta do queimador. A rosca transportadora trabalhou em velocidade máxima.

Os gases provenientes da combustão da biomassa seguiram pela chaminé do queimador (Figura 22) e foram amostrados em um ponto localizado a oito vezes o diâmetro interno da chaminé da última singularidade da tubulação, seguindo as normas de amostragem.



Figura 18. Reservatório de biomassa do queimador



Figura 19. Rosca fazendo o transporte da biomassa



Figura 20. Queimador de biomassa



Figura 21. Grelha fixa para combustão de biomassa



Figura 22. Chaminé para expelir os gases da combustão

A uma distância de oito vezes o diâmetro da última curva do duto foi realizado um orifícios para análise dos gases de combustão (Figura 23).



Figura 23. Orifício feito na chaminé para análise de gases

4.4.2 Amostragem na chaminé do queimador

Inicialmente para a utilização da maravalha foi necessário realizar o peneiramento deste combustível, pois estava misturado com pó-de-serra, devido a se tratar de resíduos da indústria madeireira, sendo assim o pó-de-serra poderia causar o travamento da rosca alimentadora do queimador.

Após a preparação do combustível, foi realizada a alimentação do silo de armazenamento de combustível.

Com a alimentação de combustível realizada, foi ligado o exaustor da chaminé, antes da queima ser iniciada, e o mesmo foi ajustado para trabalhar em velocidade máxima. Então, a velocidade do escoamento de ar foi medida na chaminé utilizando-se do termo-anemômetro, que foi introduzido em um orifício realizado na chaminé (Figura 24).

Em alguns momentos da queima foi necessário realizar a alimentação de combustível através da porta do queimador. Isso ocorreu devido ao travamento da rosca alimentadora.



Figura 24. Termo-anemômetro no interior da chaminé.

Através do valor aferido da velocidade puderam-se determinar alguns dados de referência do equipamento de amostragem (boquilha e vazão de amostragem), para que assim a amostragem realizada no processo em questão pudesse ocorrer de maneira isocinética. Com a utilização do gráfico da Figura 12, disponibilizado pelo fabricante do amostrador, determinou-se a boquilha a ser usada na sonda e também a vazão em que o equipamento deveria trabalhar para realizar a amostragem do material particulado.

Com a boquilha selecionada, a mesma foi instalada na sonda de amostragem (Figura 25).



Figura 25. Boquilha instalada na sonda de amostragem.

Então se passou para a configuração do equipamento de acordo com as características do processo, as variáveis de vazão de amostragem, tempo de armazenagem de dados, unidades de medida e habilitação da memória para armazenar os dados foram alteradas no equipamento.

Durante todo o período de amostragem a temperatura do gás no equipamento, bem como o teor de umidade foi monitorada para que estivesse em níveis ideais para o experimento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são descritos e discutidos os resultados obtidos no presente trabalho, avaliando cada uma das variáveis mencionadas que contribuiu de certa forma para a amostragem de material particulado e também para a emissão de poluentes atmosféricos na queima de biomassa.

5.1 Experimento 1 - Análise da emissão de material particulado a partir da queima de biomassa proveniente da Floresta Amazônica

5.1.1 Determinação do Teor de Umidade

Foram determinadas as umidades das amostras da biomassa florestal, uma pequena amostra foi retirada e levada a estufa a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ até peso constate. Os valores são mostrados na Tabela 3. Os valores da umidade U% se referem à umidade relativa em base seca da amostra de madeira.

Tabela 3. Valores da umidade da biomassa florestal.

Massa inicial (g)	Massa final (g) (base seca)	Umidade (%)
25,842	23,433	10,28
26,462	24,388	8,50
30,181	27,330	10,43

5.1.2 Amostragem de material particulado

A biomassa total utilizada para cada teste de queima e amostragem foi quantificada, os valores são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores da massa da biomassa antes e após a queima.

Massa total inicial da biomassa (Mi)kg	Massa restante de biomassa (Mf) kg	Massa de biomassa queimada (m) kg
Teste1 = 1,885	0,185	1,700
Teste 2 = 2,061	0,175	1,886
Teste3 = 2,025	0,155	1,870

Os dois equipamentos DATARAM4 foram utilizados simultaneamente neste experimento e posicionados um em cada orifício de amostragem, ambos coletando partículas perpendicularmente e em tempo real de queima. Foram programados para coletarem amostras a cada cinco segundos e obtiveram resultados semelhantes em todos os experimentos realizados, indicando a confiabilidade dos resultados. Em testes preliminares foram utilizados trocadores de calor com gelo, para garantir a temperatura do fluxo amostrado menor que 60°C, nos testes posteriores verificou-se que somente a mangueira de taygon de 1 m de comprimento já resfriava o gás o suficiente. Durante os testes de queima da biomassa as temperaturas médias do gás amostrado, após passar pela mangueira, foram de 29,1, 30,5 e 35,8 °C e com Umidades Relativas médias de 55, 46 e 37%. O tempo total de amostragem foi de 31min35s, 31 min e 31 min37s, respectivamente para os testes 1,2 e 3. Na Tabela 5 nota-se o tempo relativo para cada fase de queima.

Tabela 5. Tempo de duração das fases da chama.

Tempo de duração	Fase de ignição	Fase de chama	Fase de incandescência
Teste 1	1min30s	15 min	15min05s
Teste2	1 min	15 min	15 min
Teste3	1min39s	14min58s	15 min

A seguir são demonstrados os resultados obtidos durante amostragem de material particulado proveniente da Floresta Amazônica, sendo que os três primeiros mostram a distribuição do diâmetro aerodinâmico das partículas (em μm) em função da coleta de dados, em um intervalo de cinco segundos para cada dado coletado. Os outros gráficos estão em função da concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A Figura 26 apresenta os dados coletados em função do diâmetro aerodinâmico da população das partículas pelos dois DATARAMs (modelos D876-Inpe e D877-Unesp). Na fase de incandescência foram coletadas as partículas com maiores diâmetros, chegando a uma média de diâmetro de $0,5 \mu\text{m}$.

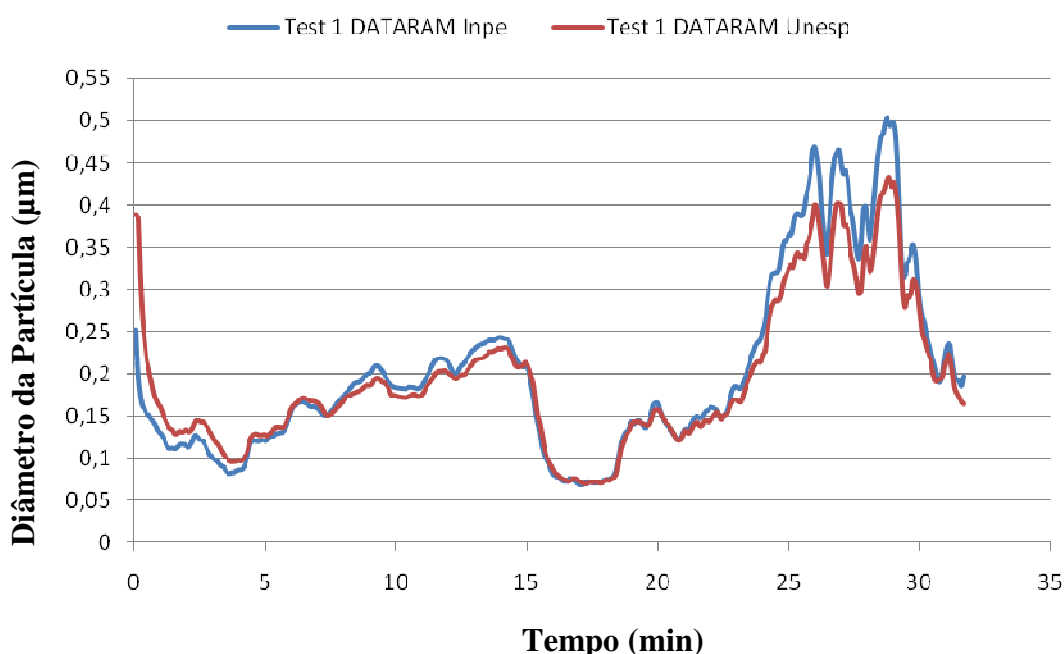


Figura 26. Valores de distribuição de diâmetros de partículas amostrados com ambos DATARAM4 (INPE e UNESP) no teste 1.

Enquanto que as partículas com diâmetros menores apareceram na região de transição entre a fase de chama e incandescência. Os valores médios foram de $0,15 \mu\text{m}$ para a fase de chama e de $0,30 \mu\text{m}$ de diâmetros aerodinâmicos médios para fase de incandescência.

Observando a distribuição de diâmetro das partículas amostradas verificamos que os valores médios apresentados assemelham-se com os valores obtidos por Hays, *et.al.*, 2002 e 2005 apud Hosseini, *et.al.*, 2010, variando em torno de $0,1$ a $0,2 \mu\text{m}$. Para Hays, *et.al.*, 2005 e Hosseini, *et.al.*, 2010, utilizando um APS o diâmetro médio mássico apresentado foi em torno

de 0,5 μm , até maiores foram obtidos na fase flaming. Se observarmos nossos resultados verificamos que somente no teste 2 obteve-se este diâmetro no início desta fase.

Para os testes 1 e 3 os valores médios para a fase chama foram de 0,1 e 0,3 μm , respectivamente. Em relação à umidade do fluxo gasoso, verificamos que para os três testes a umidade relativa média estava abaixo de 55%, sendo 55%, 50% e 40% para os testes 1, 2 e 3, cabe lembrar que em todos os testes foram utilizados o aquecedor de fluxo, para eliminar os efeitos de coagulação e condensação do vapor de água nas partículas. Para a fase de flaming os valores de umidade eram maiores e decresciam para a fase de smoldering.

Segundo Chakrabarty, *et.al.*, 2006 apud Hosseini, *et.al.*, 2010, para biomassa com valores de umidade relativa entre 5 a 10%, o diâmetro médio variava de 0,03 a 0,2 μm , valores semelhantes aos médios obtidos neste trabalho, testes 2 e 3, ou seja, Figura 27 e Figura 28, cujos valores de umidade em base seca da biomassa ficaram entre de 8 a 10%.

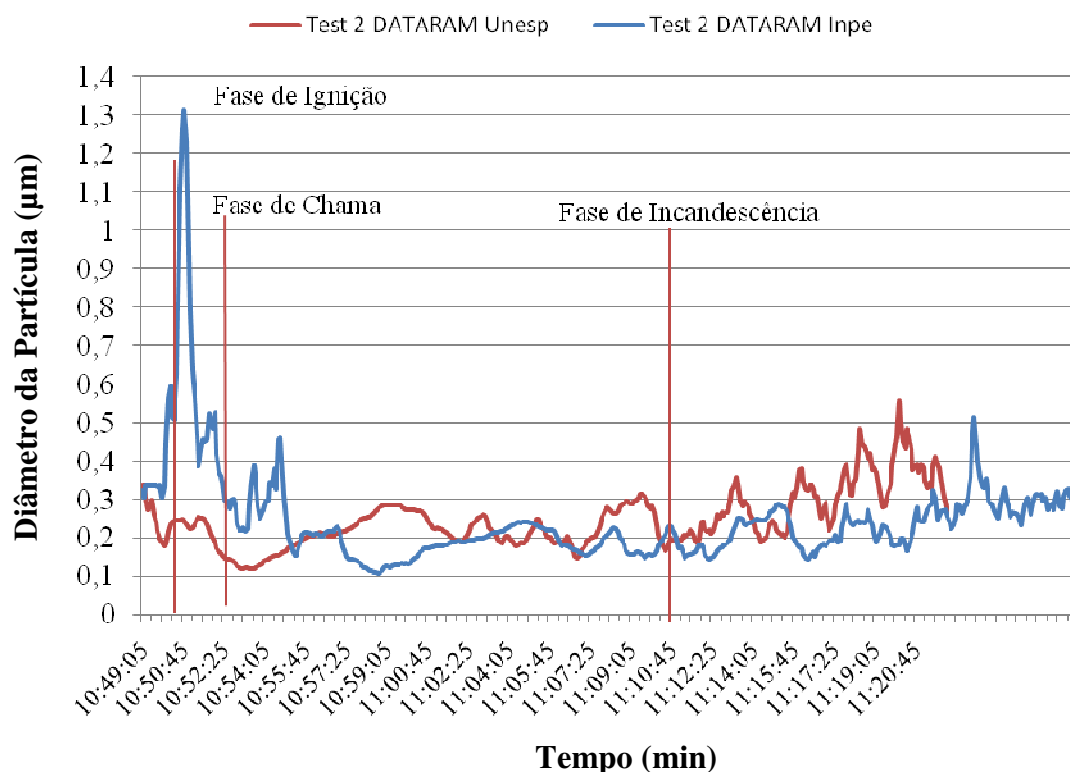


Figura 27. Valores de distribuição de diâmetros de partículas amostrados com ambos DATARAM4 (INPE e UNESP) no teste 2.

Em todos os testes nota-se um crescimento do diâmetro das partículas na fase de smoldering em torno de 0,3 μm , além da presença de curvas bimodais nesta fase, o mesmo

relatado por Hosseini, *et.al.*,2010, entretanto os valores de diâmetros deste trabalho foram maiores do que os apresentados por este autor.

Em relação à representatividade dos dados obtidos para determinação da distribuição de tamanho pelos dois DATARAMs, verificamos que as medidas foram muito próximas.

A Figura 29 mostra os pontos de amostragem no interior do duto, nota-se que para cada fase de combustão cinco pontos foram amostrados no interior do duto simultaneamente por cada um dos DATARAMs, evidenciando uma amostragem representativa do material particulado disperso na corrente gasosa confinada e o cumprimento as normas para tal. Este procedimento foi repetido em todos os testes pelos dois equipamentos.

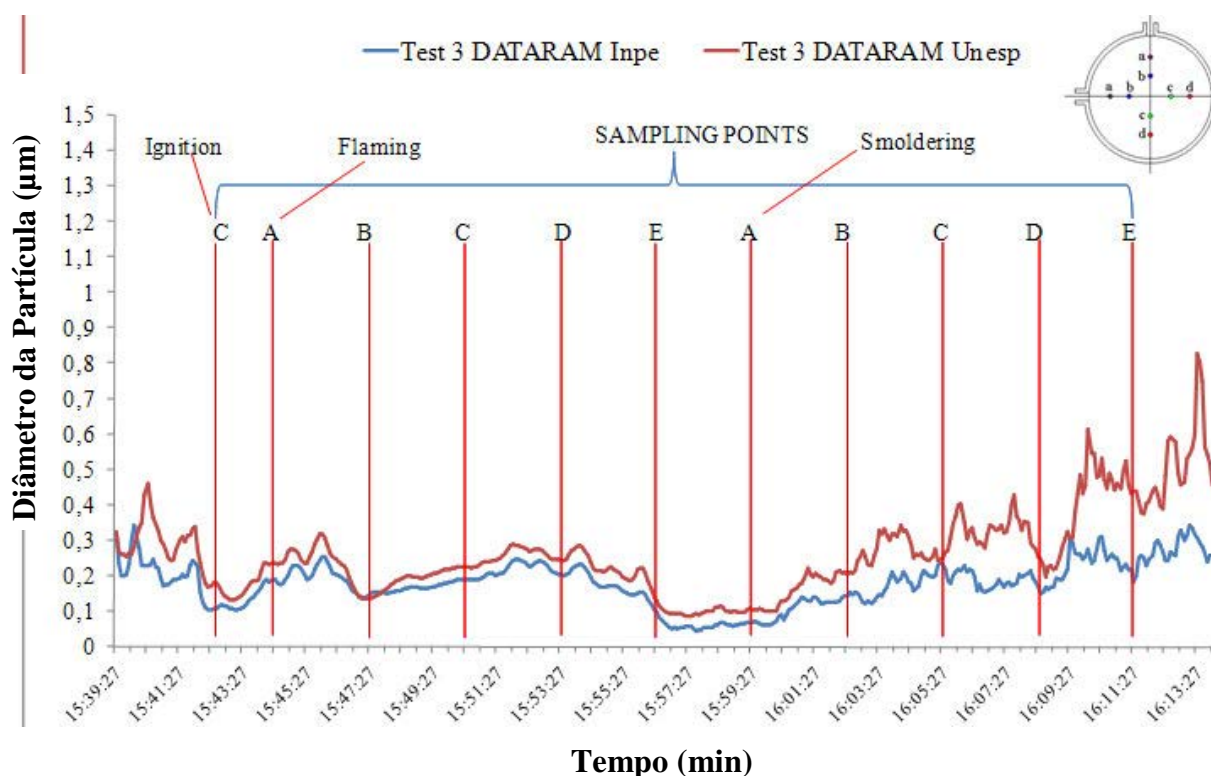


Figura 28. Valores de distribuição de diâmetros de partículas amostrados com ambos DataRam 4 (INPE e UNESP) no teste 3 relacionados com as fases da combustão e os pontos de amostragem no interior do duto.

As Figuras 29, 30 e 31 mostram os valores da concentração de material particulado menor que $2.5\mu\text{m}$ emitidos durante a queima da biomassa. Verificou-se que para os testes 1 a 3 a concentração apresentou curvas bimodais na interface entre as fases de

ignição e chama. A Figura 29 mostra picos de concentração na interface entre as fases de flaming e smoldering.

Hosseini *et.al.*,2010 mostraram que a concentração de partículas alcança um máximo durante a fase de flaming e diminui ao longo do processo da combustão, apresentando menores valores para a fase de smoldering e curva bimodal, o mesmo apresentado nos nossos resultados. Pode-se verificar também uma alta representatividade entre os resultados obtidos para medidas de concentração pelos dois DATARAMs utilizados. Os maiores valores de concentração ficaram em torno de $350000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na fase de flaming e o maior valor para a fase de smoldering foi de $100000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para estes diâmetros de partículas, em média de $0.2 \mu\text{m}$, a emissão destas concentrações são consideravelmente altos e bastante nocivos a saúde.

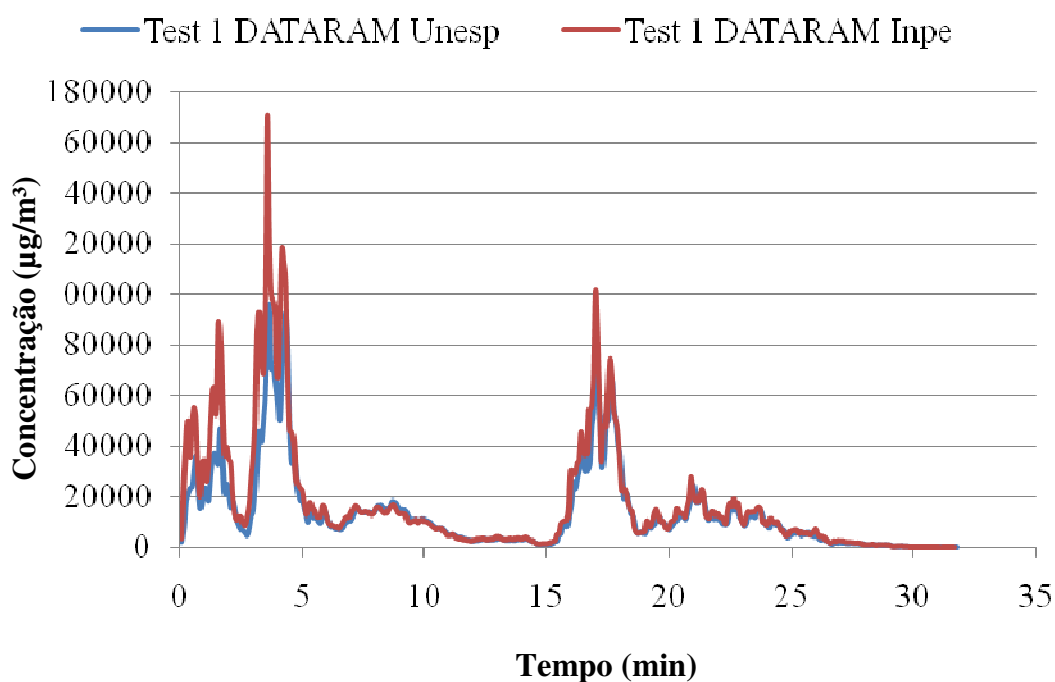


Figura 29. Valores de Concentração de partículas menores que $2.5 \mu\text{m}$ amostrados com ambos DataRam4 (INPE e UNESP) no teste 1.

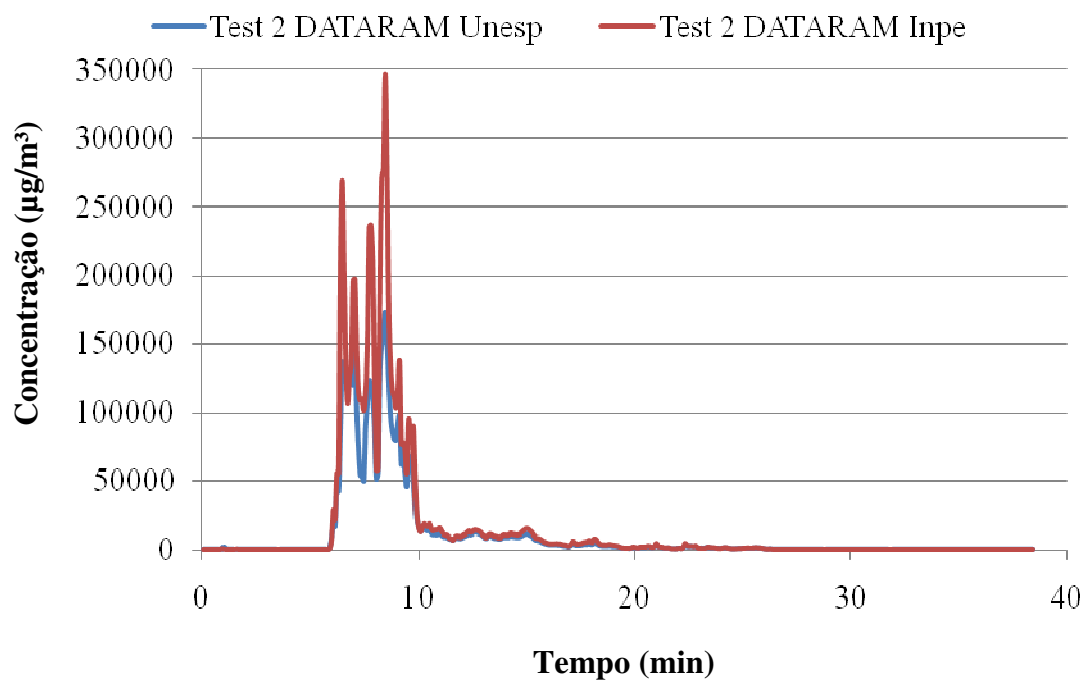


Figura 30. Valores de Concentração de partículas menores que $2.5 \mu\text{m}$ amostrados com ambos DataRAM4 (INPE e UNESP) no teste 2.

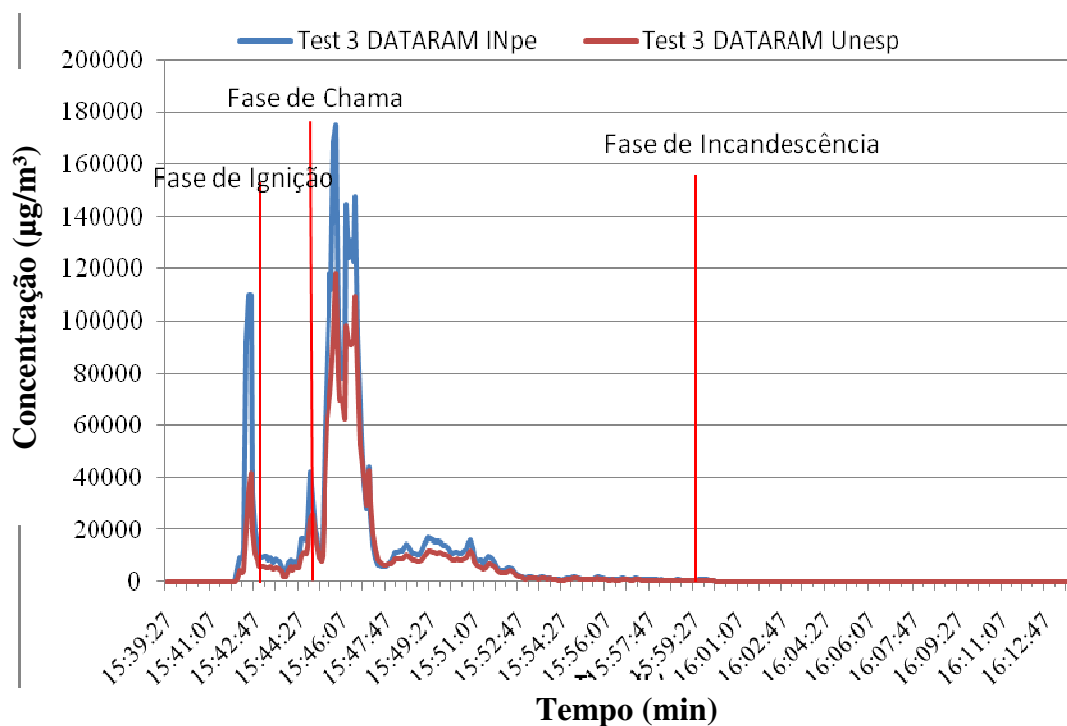


Figura 31. Valores de Concentração de partículas menores que $2.5 \mu\text{m}$ amostrados com ambos DataRam4 (INPE e UNESP) no teste 3.

As Figuras 32 a 34 mostram a relação entre a concentração das partículas emitidas com o diâmetro amostrado. A Figura 32 refere-se às amostragens do teste1 com o DATARAM4 Inpe, observa-se que a queima da biomassa apresentou alta concentração de partículas ultra finas, menores que $0,1\mu\text{m}$, o menor valor amostrado foi de $0,068\mu\text{m}$ (68nm) com concentração de $100000\mu\text{g}/\text{m}^3$. Com o DATARAM Unesp o menor valor foi de $0,0691\mu\text{m}$ (69nm) com concentração de $48634,4\mu\text{g}/\text{m}^3$, estes menores diâmetros foram amostrados na fase de smoldering. Os resultados de Hosseini, *et.al.*,2010, com queima de diferentes tipos de biomassa em laboratório usando o FMPS variaram de 29 a 52 nm ($0,029$ a $0,052\mu\text{m}$), valores satisfatoriamente próximo aos obtidos neste trabalho. Em relação à fase da combustão os autores citaram que na fase de smoldering obtiveram valores entre 10 e 50 nm ($0,010$ e $0,050\mu\text{m}$), na fase de flaming diâmetros entre 25 e 80 nm ($0,025$ e $0,08\mu\text{m}$).

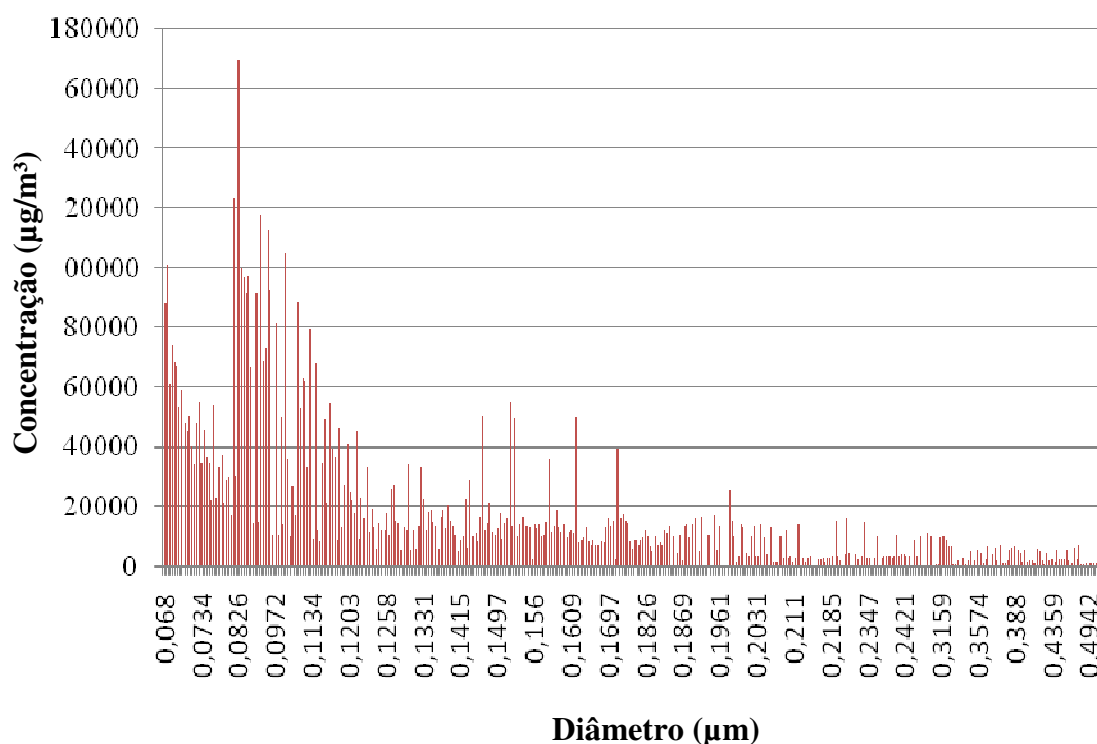


Figura 32. Variação da concentração de material particulados menor que $2,5\mu\text{m}$ em relação ao diâmetro para o teste 1 com o DATARAM Inpe.

A Figura 33 mostra medidas de diâmetros médios próximo a 70 nm na fase de smoldering e valores entre 80 e 90 nm para a fase de flaming, com ambos DATARAMs. As

maiores concentrações foram para os menores diâmetros entre 0.0691 a 0.0986 μm (69 e 98nm). Já com os resultados obtidos por Chakrabarty, *et.al.*, 2006 em seus experimentos usando o CMD para combustíveis secos foram de 30 a 70 nm, valores próximos dos resultados deste trabalho.

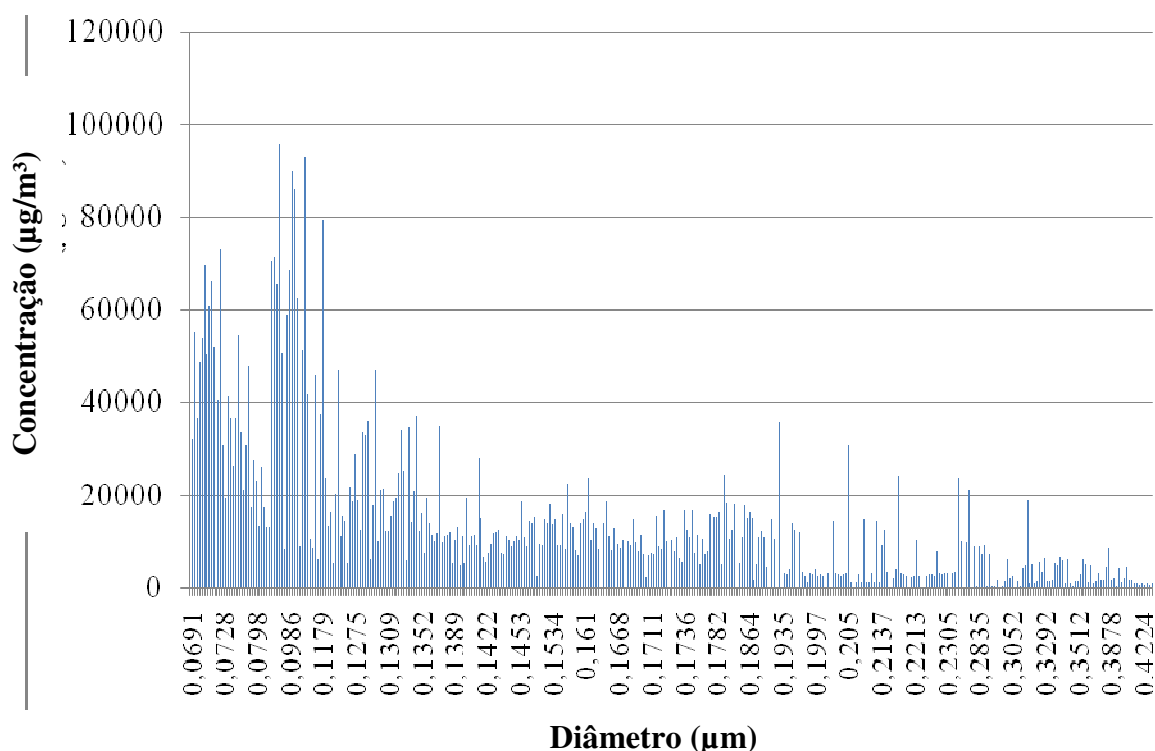


Figura 33. Variação da concentração de material particulados menor que 2.5µm em relação ao diâmetro para o teste 1 com o DATARAM Unesp.

Para Hosseini, *et.al.*,2010 a emissão de partículas menores que 0,1 μm reduz significativamente com o progresso do processo de combustão, o que verificamos nas Figuras 32 e 33.

A Figura 34 mostra a relação da concentração com o diâmetro para o teste 2 com o DATARAM Inpe. Os resultados mostram o mesmo comportamento do teste 1, para ambos equipamentos utilizados, maiores concentrações de partículas com diâmetro médio de 0.1 μm e seguida de uma diminuição da concentração para partículas maiores próximas a 0.2 μm . Os resultados referentes ao teste 3 mostram os maiores valores de concentração 170000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para maiores de diâmetros 0.189 e 0.250 μm .

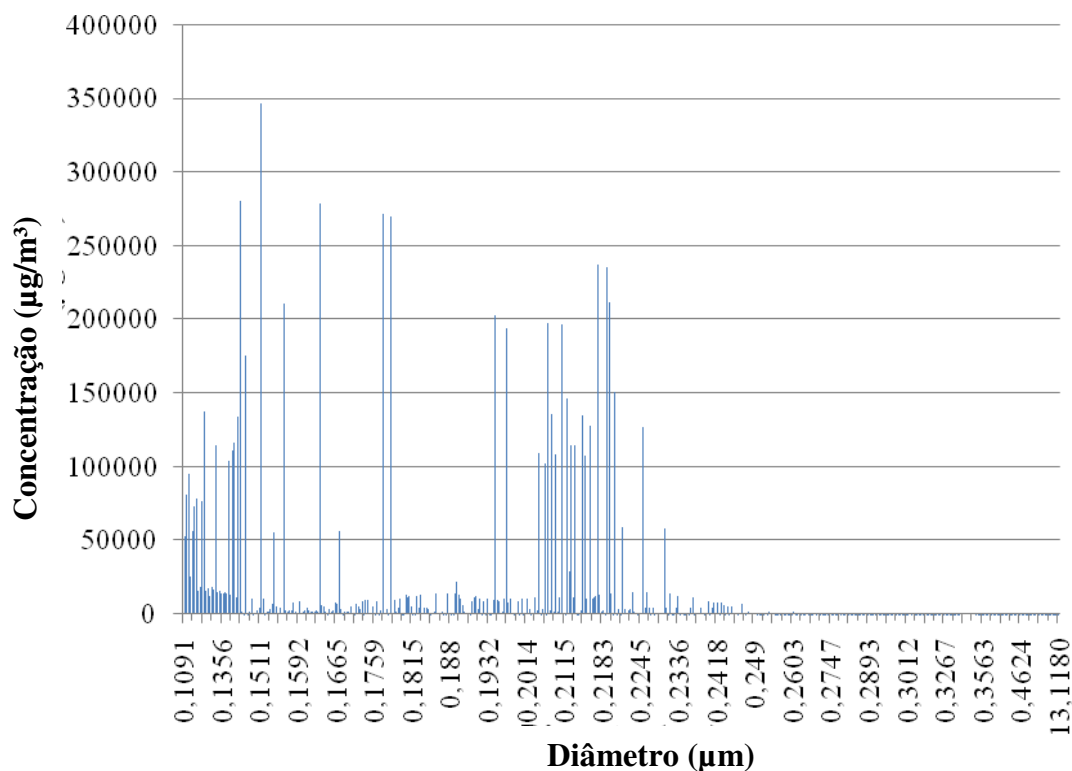


Figura 34. Variação da concentração de material particulados menor que 2.5µm em relação ao diâmetro para o teste 2 com o DATARAM Inpe.

A queima de biomassa amazônica em escala de laboratório evidenciou a emissão de partículas ultrafinas, menores que 0.1 µm, com valores médios entre 0.05 a 0.5 µm. As maiores concentrações de material particulado abaixo de 2.5 µm medidas relacionaram-se com os menores diâmetros. Essa faixa de diâmetro emitido pela queima é bastante nociva a saúde, além de efeitos adversos ao clima.

5.2. Experimento 2

Neste experimento pôde-se verificar a concentração de material particulado emitido pela queima de biomassa florestal proveniente da serraria do Campus da Unesp de Itapeva. Este experimento foi realizado em duplicata a fim de se obter dados precisos e

relevantes para nosso estudo. O primeiro teste foi realizado num período de 60 minutos e o segundo durante um tempo de queima de 44 minutos.

Através da Figura 35 podemos visualizar a concentração de material particulado presente no interior do duto quando foi realizada a primeira queima. A combustão foi analisada durante uma hora, aproximadamente, sendo que a fase de smoldering (incandescência) pode ter durado muito mais tempo, pois durante uma queima o material continua emitindo fumaça durante longos períodos, porém a parte mais significativa desta amostragem, ou seja, a parte em que se emitiu a maior quantidade de fumaça, pode ser analisada durante o período de amostragem.

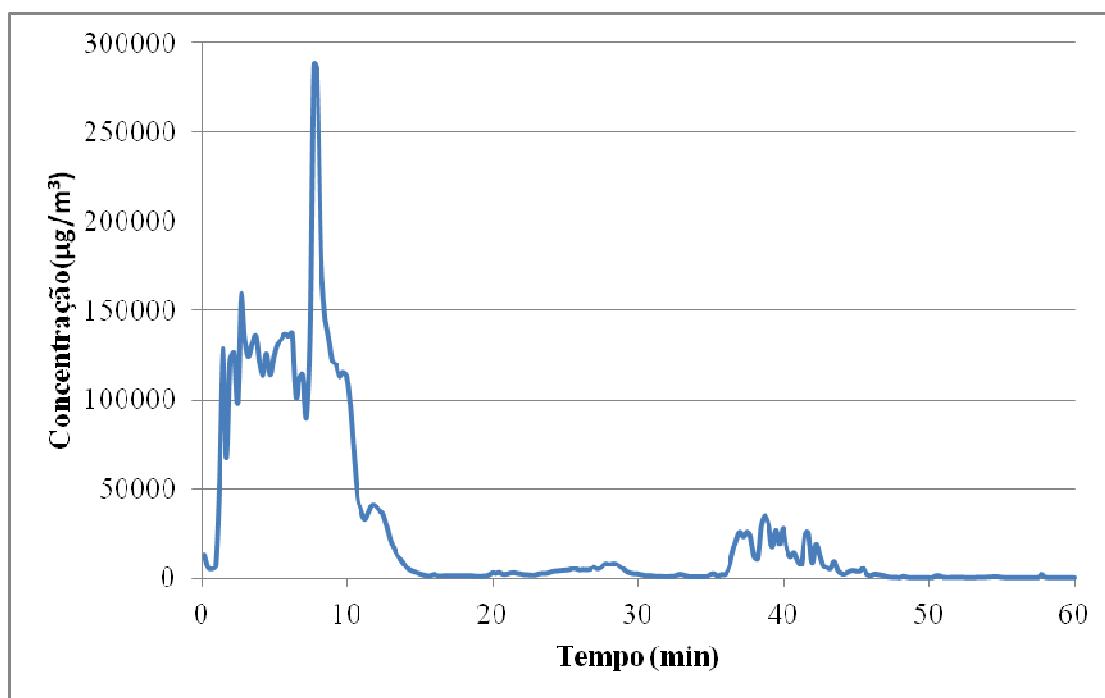


Figura 35. Teste 1 - Gráfico indicativo da concentração de material particulado pelo tempo.

Pode-se analisar claramente que as maiores concentrações foram encontradas nos 10 primeiros minutos de amostragem, ou seja, durante toda a fase de ignição e durante o início da fase de chama. Verificou-se também que, após os quinze minutos iniciais da queima a concentração se estabilizou em um valor considerado baixo, isso se deu devido a rápida combustão do material em questão, e também devido a alimentação de combustível ter sido interrompida, para podermos analisar todas as fases da queima direta da biomassa. Porém,

para esse tipo de emissão temos um limite, segundo a legislação, de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em uma média de vinte e quatro horas, portanto, se analisarmos ponto a ponto, temos que as medidas estão muito acima do estipulado pela legislação. Se verificarmos a concentração média emitida durante o período de amostragem, temos um valor de $25487,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$, um valor abaixo dos picos das medições, porém ainda muito acima de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em uma média de vinte e quatro horas. O limite de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ é estipulado pela resolução do CONAMA, já citada neste trabalho, para partículas com diâmetros menores do que $10 \mu\text{m}$, que são as analisadas neste estudo.

Na Figura 36, podemos analisar o gráfico referente a variação dos diâmetros das partículas em função do tempo de amostragem. Estudos têm mostrado ano a ano, que os particulados com diâmetros menores que $2,5 \mu\text{m}$, são os mais prejudiciais a saúde humana, e são justamente esses os analisados neste estudo. Este experimento nos mostrou que a variação diametral na queima de biomassa variou de $0,028 \mu\text{m}$ até $1,097 \mu\text{m}$, onde podemos ver que todas as partículas estão na faixa dos particulados finos, ou seja, $\text{PM}_{2,5}$.

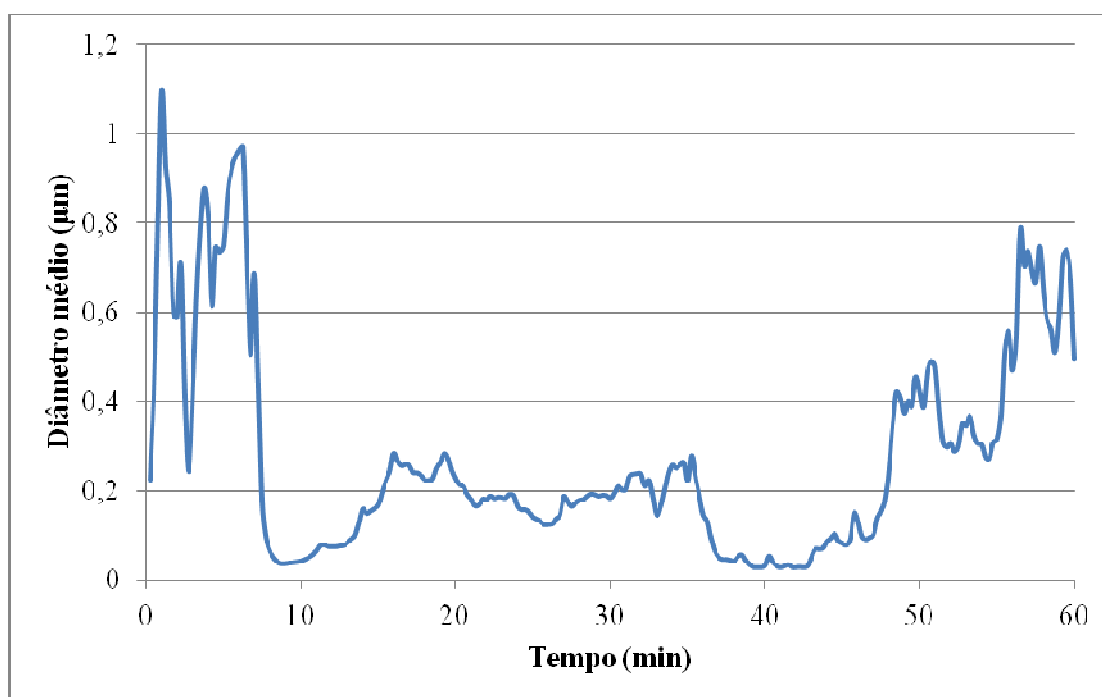


Figura 36. Teste 1- Gráfico referente a variação do diâmetro das partículas com o tempo de amostragem.

Através da Figura 37 podemos também verificar a influência da concentração na variação diametral das partículas, mostrando que quanto maior a concentração de material particulado maior será a variação nos diâmetros, bem como que os menores diâmetros são verificados nas fases de chama (flaming) e de incandescência (smoldering).

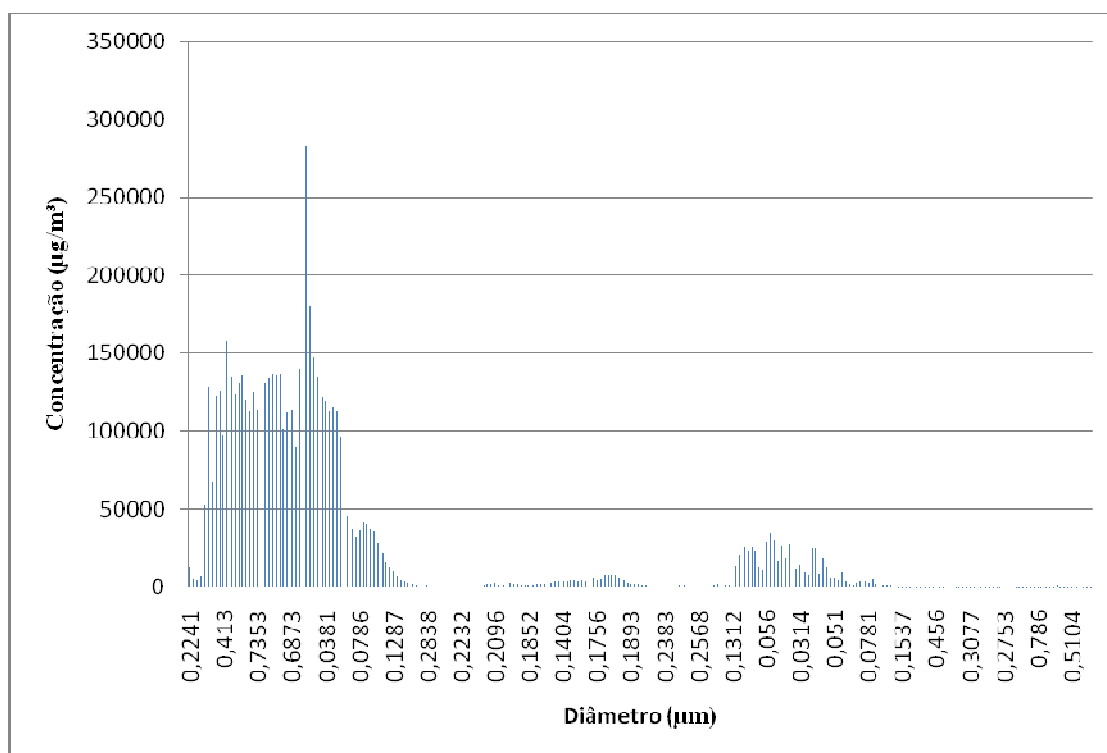


Figura 37. Teste 1 - Gráfico referente a variação da concentração em relação ao diâmetro das partículas.

Os resultados encontrados para esse primeiro teste se comparados ao Experimento 1 utilizando biomassa proveniente da Floresta Amazônica, nos mostram que os resultados obtidos nas amostragem foram bastante próximos, como por exemplo a média dos diâmetros, onde os particulados amostrados representam sempre os particulados finos, os mais prejudiciais à saúde.

Na Figura 38 podemos visualizar a análise da variação da umidade relativa do fluxo de ar contendo material particulado, bem como a temperatura que o material particulado chegou até o equipamento DATARAM4. A umidade relativa do material particulado apresentou uma média de 82,32%, uma umidade alta, que em experimentos futuros proporcionará o uso de um acessório do DATARAM4 para diminuição da umidade. A temperatura média do fluxo de ar obteve média de 30,64 °C, o que representa uma grande

perda de carga ao longo da tubulação, pois a temperatura no interior da tubulação chegou a 250°C. A umidade relativa do fluxo diminuiu conforme a temperatura do fluxo gasoso aumentou.

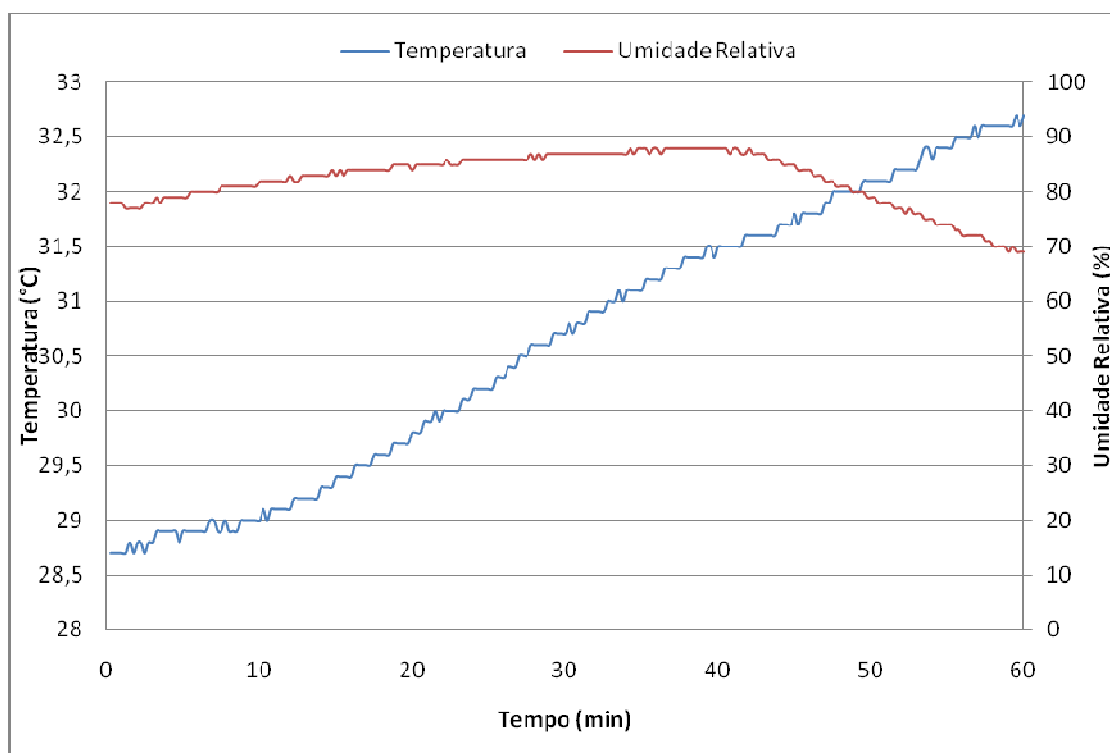


Figura 38. Teste 1 - Gráfico mostrando a variação da temperatura e umidade relativa do fluxo de ar.

Na Figura 39 podemos verificar os dados da réplica realizada na queima de biomassa em relação a concentração de material particulado em função do tempo de amostragem, que na réplica, ocorreu durante um período menor, que foi de 45 minutos. A média da concentração na réplica foi de 14296,27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que foi menor que a do primeiro experimento porém ainda assim muito maior que o limite permitido pela legislação vigente, que é de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. É importante resaltar que a diferença nas médias ocorreu devido a uma menor duração da fase de chama neste segundo experimento, fase está em que se verifica a maior quantidade de material particulado na classes dos finos, ou seja, aqueles menores do que 2,5 μm .

Os valores obtidos nesta amostragem somente confirmam os obtidos no primeiro teste, pois os valores encontrados se aproximam entre si, mostrando então a relação entre a biomassa amazônica e a maravalha, que é um resíduo proveniente de uma serraria.

Na Figura 40 podemos verificar a distribuição diametral das partículas em relação ao tempo de amostragem. A faixa de distribuição do diâmetro das partículas variou de 0,0692 μm até 0,9281 μm , com uma média de 0,4451 μm . Neste experimento houve uma grande influência na distribuição diametral das partículas pois foi necessário alimentar o queimador através de sua porta e não através da rosca transportadora, devido ao seu travamento. Com isso as chamas no interior do queimador aumentavam, o que proporcionalmente, geraram uma maior variação no diâmetro das partículas.

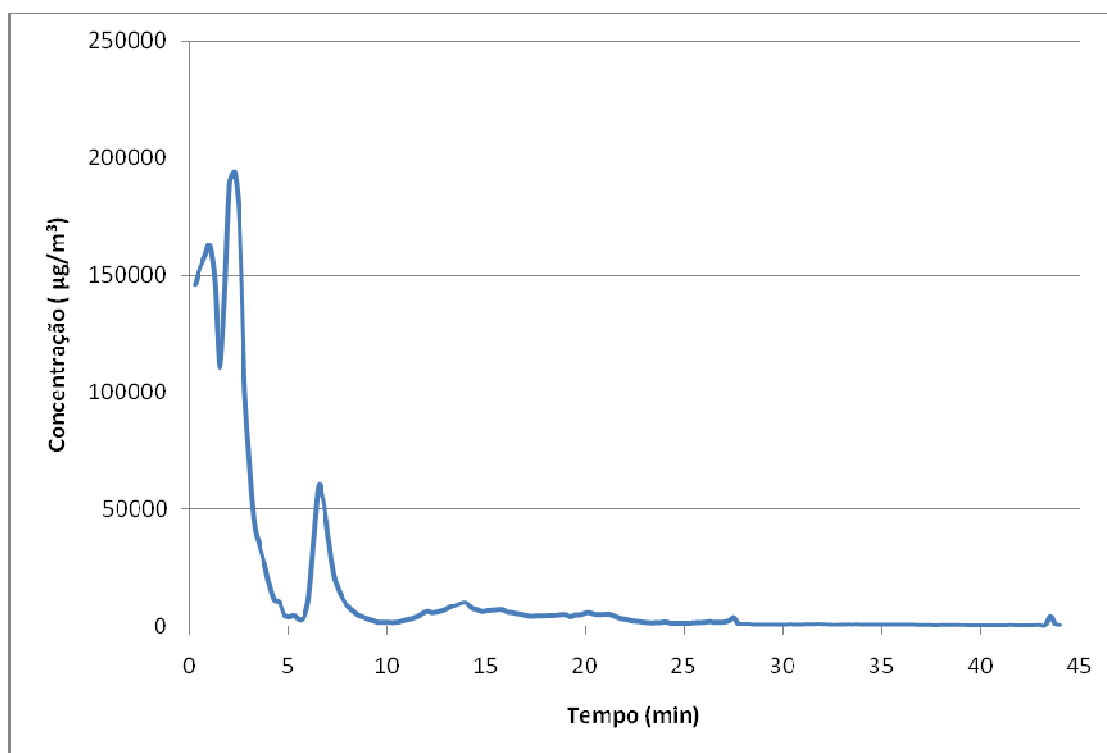


Figura 39. Teste 2 - Gráfico referente a concentração de material particulado variando com o tempo.

Na Figura 41 podemos visualizar a variação da umidade relativa do fluxo gasoso que chegou até o equipamento como a temperatura em que ele se encontrava. A temperatura teve uma média de 34,01 $^{\circ}\text{C}$, e a umidade relativa apresentou um valor médio de 77,36%. Verificou-se também, como o primeiro teste que a umidade relativa diminui conforme a temperatura do fluxo aumentou.

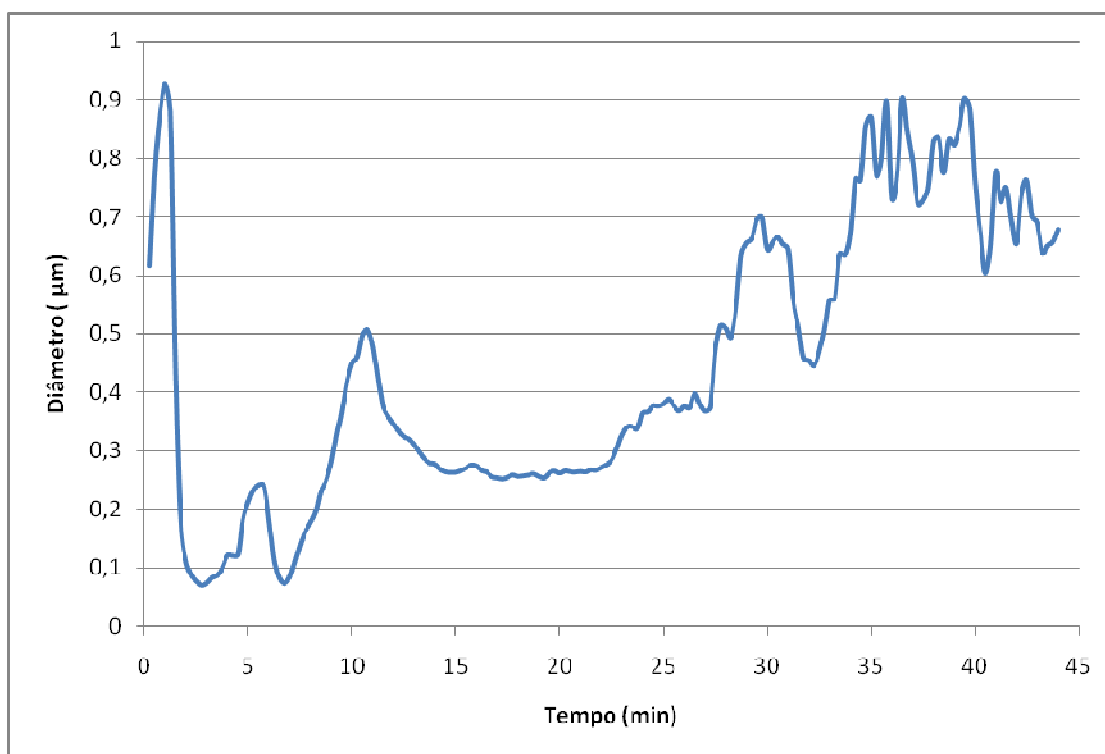


Figura 40. Teste 2 - Gráfico referente a variação diâmetral das partículas em função do tempo.

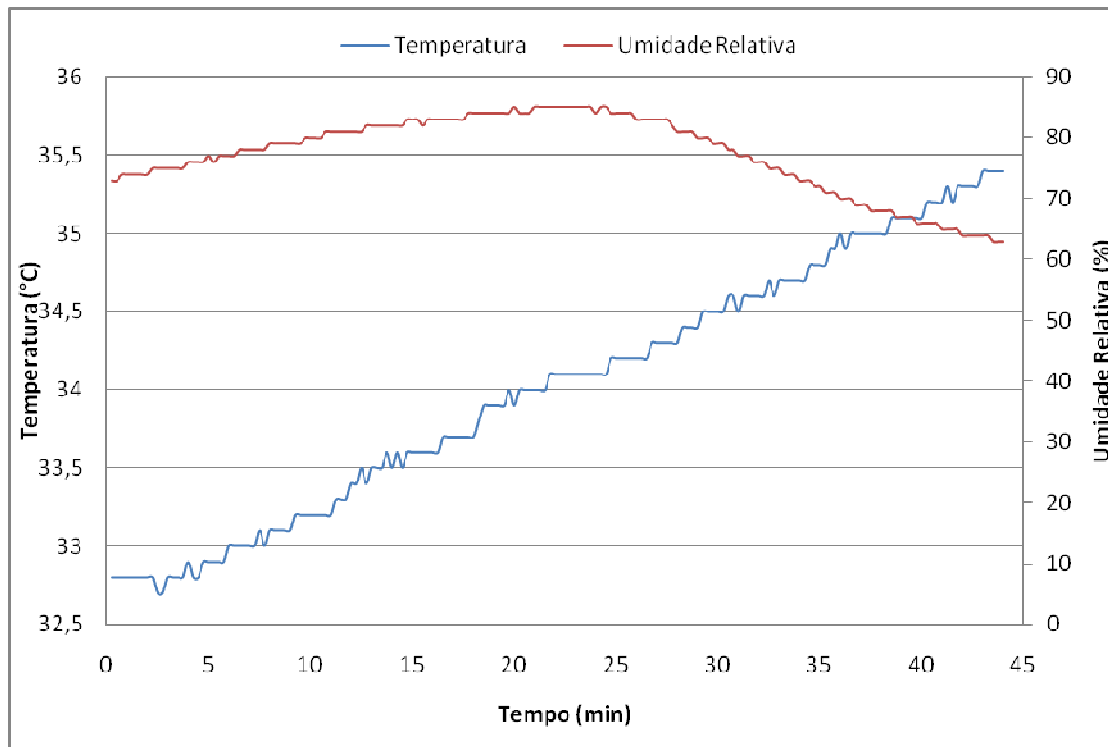


Figura 41. Teste 2 - Gráfico referente a variação de temperatura e umidade relativa com o tempo.

6 CONCLUSÃO

Obtiveram-se as seguintes conclusões com o trabalho realizado:

- Foi possível realizar a amostragem da biomassa proveniente da floresta Amazônica quanto à proveniente da serraria da UNESP de maneira eficaz, possibilitando a análise de dados;
- Foi possível também verificar e aplicar as considerações a respeito de emissão de material particulado e também do modo de amostragem de material particulado presente na legislação ambiental vigente no país;
- Através deste trabalho se pôde verificar que o equipamento DATARAM4 se mostrou extremamente eficaz e útil para a amostragem de material particulado no interior de dutos;
- Com o equipamento DATARAM4 é possível monitorar a emissão de particulados muito finos;
- Na queima de biomassa Amazônica emite-se grande quantidade de material particulado fino, sendo extremamente prejudicial à saúde humana;
- A queima de biomassa amazônica em escala de laboratório evidenciou a emissão de partículas ultrafinas, menores que $0,1\ \mu\text{m}$, com valores médios entre $0,05$ a $0,5\ \mu\text{m}$;
- As maiores concentrações de material particulado abaixo de $2,5\ \mu\text{m}$ medidas relacionaram-se com os menores diâmetros de partícula para a biomassa Amazônica. Essa faixa de diâmetro emitido pela queima é bastante nociva a saúde, além de efeitos adversos ao clima;
- Para ambos os tipos de biomassa pode notar que a maior emissão de material particulado se dá no fim da fase de ignição e início da fase de chama;
- Há uma grande perda de carga durante a amostragem de material particulado, isso é verificado pela grande diminuição de temperatura verificada;
- A umidade relativa do fluxo gasoso varia de acordo com a temperatura encontrado no fluxo de ar;

- No experimento realizado na UNESP verificou-se que se faz necessário o uso de um equipamento que diminua a umidade relativa do fluxo gasoso para não causar danos ao equipamento;
- A concentração média encontrada em todos os testes realizados, tanto para biomassa Amazônica quanto a de pinus e eucalipto excedem os níveis de emissão permitidos pela resolução do CONAMA;
- Todas as faixas de diâmetro verificadas nos testes realizados estão dentro do faixa chamada “particulados finos” que são os que possuem diâmetros menores do que 2,5 μm ;
- Os maiores valores de concentração ficaram em torno de 350000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ na fase de flaming e o maior valor para a fase de smoldering foi de 100000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;
- Para os testes realizados no INPE, em relação à umidade do fluxo gasoso, verificamos que para os três testes a umidade relativa média estava abaixo de 55%, sendo 55%, 50% e 40%. Cabe lembrar que em todos os testes foram utilizados o aquecedor de fluxo, para eliminar os efeitos de coagulação e condensação do vapor de água nas partículas.
- Em todos os testes notam-se um crescimento do diâmetro das partículas na fase de smoldering em torno de 0,3 μm , além da presença de curvas bimodais nesta fase, o mesmo relatado por S.Hosseini, *et.al.*,2010, entretanto nossos valores de diâmetros foram maiores do que os apresentados por este autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. MB 3355. **Efluentes Gasosos em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação de Material Particulado**, 1990.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. MB-3081. **Efluentes Gasosos em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação da umidade**, 1989.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. MB-3080. **Efluentes Gasosos em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação da Velocidade e Vazão**, 1989.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10701. **Determinação de Pontos de Amostragem em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias**, 1989.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12020. **Efluentes Gasosos em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Calibração dos equipamentos utilizados em amostragem - Método de Ensaio**, 1992.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10702. **Efluentes Gasosos em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação da Massa Molecular Base Seca**, 1989.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10700. **Planejamento de Amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias**, 1989.

ALMEIDA FILHO, F. de. **Monitoramento e controle de emissão de material particulado em uma fonte estacionária**. 2008. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2008.

ALVES, Célia. Aerossóis atmosféricos: Perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. **Química Nova**, São Paulo, p.582-587, 17 mar. 2009.

AMERICAN LUNG ASSOCIATION. **Selected key studies on particulate matter and health**. Disponível em: <<http://www.lungusa.org>>. Acesso em: 02 maio 2011.

ANTONIO DONATEO, DANIELE CONTINI, FRANCO BELOSI, **Real time measurements of PM_{2.5} concentrations and vertical turbulent fluxes using an optical detector**, Atmospheric Environment 40, 1346–1360, (2006)

ARBEX, M. A.; CANÇADO, J. E. D., PEREIRA, L. A. A., BRAGA, A. L. F., SALDIVA, P. H. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, p. 158-173. 2004.

BHABESH CHAKRABARTIA, PHILIP M. FINEA, RALPH DELFINOB, CONSTANTINOS SIOUTAS, **Performance evaluation of the active-flow personal DataRAM PM_{2.5} mass monitor (Thermo Anderson pDR-1200) designed for continuous personal exposure measurements**, Atmospheric Environment 38, 3329–3340, (2004).

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Índice e Padrões de Qualidade**. São Paulo, 2002.

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

CETESB, L9. 221: **Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação dos Pontos de Amostragem**, 1990.

CETESB, L9. 222: **Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação da velocidade e vazão dos gases**, 1992.

CETESB, L9. 223: **Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação da massa molecular seca e do excesso de ar do fluxo gasoso**, 1992.

CETESB, L9. 255: **Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação de Material Particulado**, 1995.

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).

CONAMA, (1990), Coletânea de Legislação Ambiental. **Resolução CONAMA Nº 003**, 28 de Junho.

De Leon SF, Thurston GD, Ito K. **Contribution of Respiratory Disease to Nonrespiratory Mortality Associations with Air Pollution**. *Am J Resp Crit C Med* 2003; 17: 1117-23.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco energético nacional 2008: ano base 2007**. Brasília, 2008. 244 p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2008.pdf>. Acesso em: 02 mai de 2011.

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 maio. 2011.

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: 02 maio 2011.

GOLDEMBERG, José. Biomassa e Energia. **Química Nova**, São Paulo, p.582-587, 17 mar. 2009.

GRAUER, A.; KAWANO, M.; A posição do Brasil frente ao novo ambiente mundial. **Remade**, 01 jan. 2008. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/>>. Acesso em: 02 maio 2011.

H A Y S, M., C H R I S T O P H E R , D., G E R O N, K A R A J. L I N N A, and N. D E A N S M I T H, **Speciation of Gas-Phase and Fine Particle Emissions from Burning of Foliar Fuels**, VOL. 36, NO. 11, Environmental Science & Technology, (2002).

H.TSUJI, H. MAKINO, H. YOSHIDA, (2001), **Classification and collection of fine particle by means of backward sampling**, Powder Technology, 118 45-52.

HOSSEINE, S.; LI, Q.; COCKER, D.; WEISE, D.; MILLER, A.; SHRIVASTAVA, M.; MILLER, J. W.; MAHALINGAM, S.; PRINCEVAC, M.; JUNG, H. **Particle size distributions from laboratory-scale biomass fires using fast response instruments**. Atmospheric Chemistry Physics, 10, 8065–8076, (2010).

INNOCENTE, Andréia Franco. **COGERAÇÃO A PARTIR DA BIOMASSA RESIDUAL DE CANA-DE-AÇÚCAR - ESTUDO DE CASO**. 2011. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Unesp, Botucatu, 2011.

KAZAY, H. F.; LEGEY, L. F. L. Fontes alternativas de energia: o que o Brasil tem feito?. **Revista Brasil Sempre**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 10, p. 2-9, 2002.

LI LI, WU WANG, JIALIANG FENG, DONGPING ZHANG, HUAJIAN LI, ZEPING GU, BANGJIN WANG, GUOYING SHENG, JIAMO FU, **Composition, source, mass closure of PM_{2.5} aerosols for four forests in eastern China**, Journal of Environmental Sciences 2010, 22(3) 405–412, (2010).

LONATI, G., STEFANO CERNUSCHI, MICHELE GIUGLIANO: **The duration of PM₁₀ concentration in a large metropolitan area**. Atmospheric Environment 45, 137 – 146, (2011).

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.

MAN-TING CHENG, CHUEN-LIANG HORNG, YI-RU SU, LI-KAI LIN, YU-CHI LIN, CHARLES C.-K. CHOU, **Particulate matter characteristics during agricultural waste burning in Taichung City**, Taiwan. Journal of Hazardous Materials 165 (2009) 187–192, (2009).

MASCARENHAS, Márcio Dênis Medeiros et al. Poluição atmosférica devida à queima de biomassa florestal e atendimentos de emergência por doença respiratória em Rio Branco, Brasil. **Jornal Brasil Pneumol.**, Rio Branco, p. 42-46. Set. 2005.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 83, p. 37-46, 2002.

MULLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba**. 2005. 94 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

NEVERS, N, (1995), **Air pollution Control Engineering** – McGraw-Hill New York 506p.

OLIVEIRA, J. M. C.; LOBO, P. C. **Avaliação do potencial energético de resíduos de biomassa amazônica**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, **Anais...** Campinas. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0119.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2011.

RYU,S.Y.,KWON,B.G., KIM, Y.J., KIM H.H., CHUN, K.J.: **Characteristics of biomass aerosol and its impact on regional air quality in the summer of 2003 at Gwangju**, Korea. *Atmospheric Research*, 84, 362 -373, (2007).

SANTEN, A. V. E GANNON, E.J., **“In-Duct Measurement of Particulates”**– *Filtration and Separation*, 24/5: 328-336, (1987).

SILVA, Ageo Mário Cândido da et al. Material particulado (PM2.5) de queima de biomassa e doenças respiratórias no sul da Amazônia brasileira. **Rev Bras Epidemiol**, Cuiabá, n. , p.337-351, 2010.

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

VIDAL, José Walter Bautista. A posição do Brasil frente ao novo ambiente mundial. **Remade**, 01 abr. 2005. Disponível em: <<http://www.remade.com.br>>. Acesso em: 02 maio 2011.

Wellenius GA, Bateson TF, Mittleman MA, Schwartz J. **Contribution of Respiratory Disease to Nonrespiratory Mortality Associations with Air Pollution**. 2005; 161:1030–36

World Energy Assessment - WEA 2000; **Energy and the challenge of sustainability**. **United Nations Development Programme**, United Nations Development of Economic and Social Affairs and World Energy Council.