

ELISEU ESMANHOTO

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA COM
ANÁLISE QUANTITATIVA DE MATERIAL PARTICULADO EM DUTOS E
CHAMINÉS DE FONTES ESTACIONÁRIAS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE. Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Franke Portella.

CURITIBA

2010



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais- PIPE
Setor de Tecnologia

RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos vinte e três dias do mês de agosto de 2010, no auditório do CESEC - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. Dante Homero Mosca Jr., coordenador do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a centésima octogésima quinta defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Kleber Franke Portella (UFPR), Vitoldo Swinka Filho (UFPR), Paulo Roberto Janissek (UP). Às 09:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **ELISEU ESMANHOTO** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada **“DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA COM ANÁLISE QUANTITATIVA DE MATERIAL PARTICULADO EM DUTOS E CHAMINÉS DE FONTES ESTACIONÁRIAS”**. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

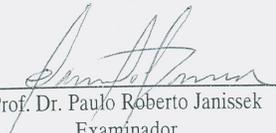
Curitiba, 23 de agosto de 2010.



Prof. Dr. Kleber Franke Portella
Orientador



Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho
Examinador



Prof. Dr. Paulo Roberto Janissek
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que nos proporcionou a vida e saúde, com elas temos a oportunidade de desenvolver este tipo de trabalho que nos faz entender um pouco mais a nossa existência.

Aos meus Pais, Seu Jura e Dona Nirce, que sempre mostraram o caminho do conhecimento que nos leva a independência.

Aos meus irmãos, Eloi, Elizane, Elis, Giovana (Isabela), que sempre estiveram presentes, mesmo estando distante.

Agradeço a Renata, que no início do projeto era minha noiva hoje minha esposa, pela motivação e inspiração constante.

Agradeço ao Adilson Miguel Luz e ao Fabio Mazarotto, que me acompanharam por várias noites e finais de semana, foram muitos, discutindo os mais diversos conceitos, sem eles eu não teria chegado aonde cheguei.

Agradeço ao Professor Fernando Tadeu Boçon pelo apoio na consolidação dos conceitos utilizados no trabalho.

Agradeço ao Dr. Kleber Franke Portella pela dedicação na orientação nos trabalhos realizados.

Em fim agradeço a todos que me ouviram e motivaram nesta jornada de conhecimento, proporcionando o desenvolvimento de um produto tecnologicamente avançado e útil para o mercado brasileiro.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS DO PROJETO	20
1.1.1 Objetivo Geral	20
1.1.2 Objetivos Específicos	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 MATERIAL PARTICULADO, MP	22
2.2 AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA	27
2.2.1 Importância da Amostragem Isocinética	27
□ Velocidade de amostragem menor que a do fluxo gasoso	28
□ Velocidade de amostragem maior que a do fluxo gasoso	29
□ Velocidade de amostragem igual a do fluxo gasoso	30
2.2.2 Obtenção da Amostragem Isocinética	32
2.3 EQUIPAMENTOS EM USO NO MERCADO BRASILEIRO	36
2.3.1 Coletor Isocinético de Partículas de Produção Nacional (A)	36
2.3.2 Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos de Fabricação Nacional (B)	37
2.3.3 Equipamento Isocinético com Tecnologia Importada (C)	38
2.3.4 Equipamento Isocinético com Tecnologia Importada (D)	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 FASE DO DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO	41
3.2 SISTEMA COLETOR ISOCINÉTICO PARA MP, ER1	46
3.3 BALANÇA ANALÍTICA	49
3.4 PROCEDIMENTOS	50
3.4.1 Montagem das Boquilhas	50

3.4.2	Determinações Preliminares.....	52
□	Determinação da umidade.....	52
□	Determinação da densidade.....	53
□	Medida da pressão barométrica	54
□	Temperatura ambiente	54
□	Diâmetro interno da chaminé.....	54
□	Número mínimo de pontos de coleta	54
□	Ensaio de vazamento	55
3.5	OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO	56
3.5.1	Procedimento.....	56
3.5.2	Recuperação e Manuseio da Amostra.....	61
3.5.3	Representatividade da Amostra.....	62
3.6	EQUAÇÕES APLICADAS NO EQUIPAMENTO ER1	62
3.6.1	Pressão Absoluta.....	62
3.6.2	Volume de gás seco	63
3.6.3	Umidade dos gases	63
3.6.4	Massa Molecular.....	64
3.6.5	Velocidade dos Gases.....	64
3.6.6	Cálculo da Isocinética.....	65
3.6.7	Vazões nas Condições da Chaminé ou Duto	66
3.6.8	Concentração de MP	67
3.6.9	Taxa de Emissão	68
3.7	DESCRIÇÃO DA MEDIDA E PARÂMETROS PARA COMPARAÇÃO ESTATÍSTICA DE COLETA DE MP E VALIDAÇÃO DO ER1	69
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
4.1	O equipamento ER1	73

4.2	Testes de validação do ER1	73
4.3	Incerteza das Medidas	75
4.4	Limite de repetitividade	76
4.5	Sensibilidade	77
4.6	Análise Comparativa entre os Equipamentos	80
5.	CONCLUSÃO	81
6.	TRABALHOS FUTUROS	83
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição e propriedades físicas comuns das partículas. (Adaptado de GODISH T. Air Quality, 4 th Edition 2004).....	24
Figura 2 - Velocidade de amostragem sub-isocinética. Fonte CPRH/GTZ.	29
Figura 3 - Amostragem com velocidade superior à isocinética. Fonte CPRH/GTZ.....	30
Figura 4 - Segregação das partículas. Fonte CPRH/GTZ.	31
Figura 5 - Conjunto sonda/boquilha/Pitot (ER1). 1 - Conjunto da sonda; 2 - Boquilha; 3 - Tubo Pitot; 4 - Acoplamento no equipamento: Pressão estática, Pressão total e Sucção da bomba.....	33
Figura 6 - Situação com amostragem isocinética. Fonte CPRH/GTZ.	34
Figura 7 - Situação com amostragem superior a ISOCINÉTICA. Fonte CPRH/GTZ.....	35
Figura 8 - Situação com amostragem sub isocinética. Fonte CPRH/GTZ.....	36
Figura 9 - Coletor isocinético de Partículas (A). Fonte, Catálogo do Equipamento.	37
Figura 10 - Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (B), Fonte Catálogo do Equipamento.	38
Figura 11 - Equipamento Isocinético (C). Fonte Catálogo do Equipamento.....	39
Figura 12 - Equipamento Isocinético (D), Fonte: Catálogo do Equipamento....	40
Figura 13 - Compensação de sinal para um sensor de pressão com sinal de saída de 1 a 5 V. Fonte Freescale Semiconductor [27].....	42
Figura 14 - Princípio de funcionamento do sensor de pressão diferencial. Fonte Freescale Semiconductor.....	43
Figura 15 (a) - Esquema dos sensores colocado no corpo do sensor; 15 (b) - Conexão das duas resistências dos sensores no circuito eletrônico.....	44

Figura 16 - Teste com os primeiros sensores, pressão, vazão e temperatura operando em conjunto.....	45
Figura 17 - Equipamento montado em mala própria, pronto para testes com o sistema de aquisição de dados.	46
Figura 18 - Vista lateral do equipamento ER1 e seus componentes: 1 - sistema de aquisição de dados; 2 - maleta central; 3 - sonda de coleta.....	47
Figura 19 - Esquema do sistema de amostragem e coleta de dados, em tempo real, do equipamento ER1.....	49
Figura 20 - Montagem do conjunto boquilha, filtro e anel de alumínio.	50
Figura 21 - Ilustração do conjunto boquilha após sua montagem.	51
Figura 22 - Desenho esquemático para a confecção de boquilhas.....	52
Figura 23 - Cálculo da umidade dos gases de combustão, Planilha ER1 “Umidade”	53
Figura 24 - Cálculo da densidade dos gases, Planilha ER1 “densidade”.....	54
Figura 25 - Programa de aquisição de dados do equipamento ER1, dados em tempo real.	55
Figura 26 - Equipamento ER1 com todos seus componentes montados.....	58
Figura 27 - Entrada dos dados preliminares a coleta “Dados Gerais”.....	59
Figura 28 - Planilha de aquisição de dados ER1 “Dados de Campo”.	60
Figura 29 - Preparação da sonda e boquilha.	61
Figura 30 - Amostragem com o Equipamento ER1	70
Figura 31 - Detalhes da montagem do sistema de coleta	70
Figura 32 - Detalhe das sondas de coleta.....	71
Figura 33 - Imagem do equipamento de referência.....	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da amostragem comparativa entre o equipamento de Referência e o ER1.	74
Tabela 2 - Incertezas relacionadas às medidas ER1 e Referência.....	75
Tabela 3 - Valores Obtidos nas amostragens.	76
Tabela 4 - Resultados estatísticos das medidas, Tabela 3.	77
Tabela 5 - Valores obtidos nas amostragens.	78
Tabela 6 - Resultados estatísticos das medidas.	78
Tabela 7 - Características dos Equipamentos em Uso no Brasil.....	80

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
NAAQS	National Ambient Air Quality Standards
EPA	Environment Protection Agency
NER	National Research Council
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
SEMA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente
MP _{2,5}	Material Particulado Menor que 2,5 micrometros
MP ₁₀	Material Particulado Menor que 10 micrometros
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
PTS	Partículas Totais em Suspensão
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
ABC	Sigla para as Cidades de Santo Andre, São Bernardo e São Caetano
CICPAA	Comissão Intermunicipal de Controle da Poluição das Águas e do Ar
SUSAM	Superintendência de Saneamento Ambiental
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Pernambuco
CTA	Constante de Temperatura Anemométrica
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
Vb	Velocidade dos Gases na Boquilha

Vc	Velocidade dos Gases na Chaminé
I	Varição Isocinética
Q	Vazão de Amostragem
CIPA	Coletor Isocinético de Partículas
TE-750	Modelo de Equipamento de Coleta Isocinética
SHC 502	Modelo de Equipamento de coleta Isocinética
DRC 80	Modelo de Equipamento de coleta Isocinética
RBC	Rede Brasileira de Calibração
AG-200	Modelo de balança analítica
D	Diâmetro
GPS	Global Position System
B	Pressão Barométrica
Ps	Pressão Estática na Chaminé
VU	Teor Volumétrico de Umidade
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
TBU	Temperatura de Bulbo Úmido
K	Modelo de Termopar
V	Velocidade na Chaminé
S	Fator do Tubo PITOT
T	Temperatura da Chaminé
Ps	Pressão estática
Pv	Pressão dinâmica de velocidade
CNTP	Condição Normal de Temperatura e Pressão
% isoc	Isocinética Percentual
Q _b	Vazão da amostra na boquilha (CNTP, base úmida)

Q_c	Vazão do gás na chaminé (CNTP, base úmida)
Q_F	Vazão da amostra medida no fluxímetro digital
A_b	Área da boquilha
A_c	Área da chaminé
V_C	Volume coletado (base úmida) [litro]
Q_b	Vazão da bomba
LPM	Litro por Minuto
V_{CN}	Volume Coletado Base Úmida nas CNTP
V_{CNBS}	Volume coletado (base seca) nas CNTP [litro]
CN	Concentração de particulados nas CNTP (base úmida)
M	Massa de particulados no filtro [mg]
C_{NBS}	Concentração Normal Base Seca
C_N	Concentração de particulados nas CNTP (base seca)
T_e	Taxa de emissão de MP
Q	Vazão na chaminé
C	Concentração de MP
v	Velocidade na chaminé
A	Área
SENAI	Serviço Nacional da Indústria
CIC	Cidade Industrial de Curitiba
MW	Megawatt
IE	Incerteza Expandida

DEPAM	Diretoria de Estudos e Padrões Ambientais
GL	Número de Graus de Liberdade
m_r	Média dos Resultados em condições de repetitividade
CV	Coeficiente de Variação ou Desvio Padrão Relativo
n_r	Número de Repetições em Condições de repetitividade
$r_{95\%}$	Limite de Repetitividade para um nível de confiança de 95%
S_r	Desvio Padrão em Condições de Repetitividade
t	Valor do t de Student
$U_{95\%}$	Incerteza Expandida para um Nível de Confiança de 95%

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

SO ₂	Dióxido de Enxofre
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
CO ₂	Dióxido de Carbono
H ₂ O	Água
N ₂	Nitrogênio
µm	Micrometro
%	Porcentagem
mg	Miligrama
m ³ /min	Metro cúbico por minuto
mg/min	Miligrama por minuto
°C	Grau Celsius
mm	milímetro
mBar	miliBar
NIpm	Normal litro por minuto
hPa	Hectopascal
Kg/m ³	Kilograma por metro cúbico
K	Kelvin
Pa	Pascal
m ²	Metro quadrado
m/s	metro por segundo
mg/Nm ³	miligrama por normal metro cúbico
Kg/h	Kilograma por hora

ρ	Densidade dos gases
MW	Megawatt
t/h	Toneladas hora
Nm ³ /h	Normal metro cúbico por hora

RESUMO

A quantificação de material particulado (MP) emitido em dutos e chaminés, de fontes estacionárias, possibilita o seu enquadramento aos padrões de emissão legais estabelecidos em normas ambientais. Também, esta fornece importante informação para a indústria, que poderá utilizá-la de forma a verificar as necessidades de variações do seu processo industrial, aprimorando a eficiência dos sistemas de controle instalados e otimizando a instalação de novos equipamentos. Na prática, das metodologias consideradas convenientes para a coleta e análise do MP, a isocinética vem demonstrando ser a mais adequada dada a equiparação dos parâmetros do emissor e do coletor, minimizando os erros devidos ao desvio do fluxo de gases e MP em condições do sistema fora do equilíbrio. Seguindo-se esta premissa, foi elaborado a presente pesquisa e desenvolvimento, no qual foi desenvolvido e testado em campo, com dados estatísticos, comparativamente a outro equipamento disponível e aprovado no mercado nacional. O equipamento ER1 foi construído dentro de critérios para atender aos preceitos da norma NBR 12.827/1993, utilizando materiais e sensores com tecnologias atuais e disponíveis no mercado. As melhorias tecnológicas aplicadas ao equipamento ER1, se comparado aos equipamentos nacionais, o torna de fácil operação, gerando resultados rápidos e confiáveis. Os dados da inter comparação realizada entre o equipamento de referência e o equipamento ER1, 292 e 295 mg/Nm³ respectivamente, demonstraram que esta metodologia e equipamento são opções tecnológicas adicionais disponíveis para o mercado Brasileiro. Pelas inovações propostas foi solicitado junto ao Instituto Nacional de

Propriedade Industrial, INPI, registro de depósito de patente em 29 de Janeiro de 2008, sob número PI0704836-0 A2 [1].

ABSTRACT

A quantification of particulate matter (PM) issued by pipeline and chimneys from stationary sources allow the adjustment of this parameter to legal environmental standards established. It also provides important information to industry, in order to verify the necessity of changes in its industrial processes, improving the system control installed and optimizing new equipment installation. In practice, compared to the methodology used for collection an analysis of MP, the isokinetics has proven to be the most appropriate methodology because of equivalence between emission an collected parameters which reduces errors from gases flow deviation and MP in non-equilibrated systems. Following this premise, the research and development was developed with the purpose to test this methodology statistically in field and the results were compared to equipment available and approved in national market. The ER1 equipment was built under NBR 12.827/1993 standard criteria. The technological improvement of ER1 equipment when compared to national equipment showed its easy operation with fast and reliable results. Data from inter comparison between the reference equipment and equipment ER1, 292 and 295 mg/Nm³ respectively, demonstrated that this methodology and equipment are an technology options in Brazilian market. Due to the innovation proposed in January 29th, 2008 a patent under number PI0704836-0 A2 was requested to Instituto Nacional de Propriedade Industrial, INPI.

1. INTRODUÇÃO

Evidências epidemiológicas obtidas durante grande parte da década de 1990 renovaram as preocupações sobre os efeitos das partículas do ar ambiente sobre a saúde humana, levando a “National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)” e a Agência de Proteção Ambiental (EPA), ambas americanas, a definir e implementar, respectivamente, normas tanto para a emissão quanto para o controle do material particulado no ar ambiente. Mesmo com os novos padrões promulgados, cientistas e responsáveis políticos reconheceram que ainda deveriam ser feitas novas pesquisas sobre a influência das partículas em suspensão na saúde da população, já que estas se encontram com diâmetros médios equivalentes cada vez menores. No ano de 1998 a pedido da EPA, foi solicitado ao Congresso Americano que providenciasse um estudo independente pelo “National Research Council (NRC)” com o objetivo de identificar as prioridades de investigação para definir os padrões para as partículas em suspensão no ar ambiente. Este trabalho evoluiu gerando também aqui no Brasil novas demandas como a adequação das legislações de emissões atmosféricas em fontes fixas do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) e da Secretaria de Estado de Meio Ambiente (SEMA) do estado do Paraná.

Para se atender os preceitos normalizados [2-3], as técnicas e os equipamentos de análise dos MPs têm de estar adequados, disseminados e serem fáceis de operar, uma vez que a demanda para se otimizar o controle ambiental pelas indústrias está crescente e as dificuldades de coleta inerentes.

Assim surgiu este projeto de pesquisa com a premissa de desenvolver um novo equipamento de investigação de MP em dutos e chaminés, sendo baseado na coleta isocinética e na otimização dos processos de equipamentos de coleta de MPs disponíveis no mercado, dando-se ênfase nas suas abrangências de atendimento às normas brasileiras [2, 3], facilidades de uso, repetibilidade e reprodutibilidade estatísticas e, também, na sua operacionalidade. Em termos econômicos e estratégicos deste projeto se destaca a redução de custos e a nacionalização da tecnologia, em um setor de extrema importância nacional, que é o controle e preservação do meio ambiente.

1.1 OBJETIVOS DO PROJETO

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um equipamento para análise de MP em diversas fontes potencialmente poluidoras do ar atmosférico, com tecnologia nacional e totalmente adaptada à indústria brasileira, atendendo os preceitos da nova legislação ambiental Nacional CONAMA 382/2006 [4] e do Estado do Paraná SEMA 054/2006 [5].

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar as vantagens e desvantagens dos equipamentos de medidas de MP disponíveis no mercado nacional, aprimorando as técnicas de coleta

e a emissão dos seus resultados no novo equipamento denominado ER1;

- Idealizar e fabricar um equipamento de medida de MP em fontes de emissão de poluentes industriais, usando o princípio de medida isocinética;
- Avaliar a reprodutibilidade das medidas, por intermédio de parâmetros estatísticos e comparativamente a outra técnica e equipamento disponível, em fonte de emissão de gases real;
- Interiorizar ou regionalizar a tecnologia no âmbito nacional, solicitando registro de patente do produto ao INPI.
- Promover ações no sentido de comercializar o equipamento idealizado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será dada ênfase ao conjunto de informações disponíveis sobre a importância do controle do MP à sociedade em geral e ao setor industrial, por ser o principal responsável pelas emissões deste tipo de material ao ambiente. Também serão verificados os equipamentos e técnicas disponíveis de análise para este tipo de poluente. Pretende-se, com isto, balizar a fabricação de um equipamento de medida de MP com tecnologia nacional e com princípios de medidas que atendam ao mercado e aos preceitos das normas brasileiras.

2.1 MATERIAL PARTICULADO, MP

A partir da década de 80, começando pela Alemanha e, posteriormente, por toda a Europa e Estados Unidos têm surgido grande interesse no monitoramento preciso da concentração de materiais dispersos no ar. Os compostos conhecidos como fuligem fina, negro de fumo ou “black carbon”, por ter sua geração relacionada à ação humana, sendo fundamentada nos processos de queima de combustíveis fósseis são os poluentes de maior interesse [6].

Partículas na atmosfera incluem algumas substâncias na fase sólida e líquida e possuem vários tamanhos e densidades. As partículas grandes e densas permanecem na atmosfera por minutos, já, as menos densas permanecem suspensas na atmosfera por período de dias a semanas. Individualmente, as partículas diferem pelo tamanho, massa, densidade, morfologia, composição química e por várias propriedades químicas e físicas, conforme gráfico esquemático apresentado na Figura 1. O MP pode ser emitido

por fontes naturais e antropogênica na sua emissão primária ou secundária, sendo resultado da reação química envolvendo a fase gasosa dos poluentes emitidos, principalmente, os sulfatos [7].

Partículas grossas são, usualmente, produzidas por processos mecânicos (fragmentação de materiais e atomização de líquidos). A maior parte das partículas dispersas está com seu diâmetro médio entre 2,5 a 10 μm , mas elas podem ser maiores, na faixa de 30 μm ou mais. As partículas finas tendem a permanecer suspensas na atmosfera por muito tempo e são descritas como partículas suspensas. O MP que contém um diâmetro médio $> 100 \mu\text{m}$ tende a se depositar rapidamente, sendo definido como MP depositável [7].

As evidências epidemiológicas mundiais originárias de MP, obtidas durante a década de 1990, propiciaram a elaboração pelos órgãos ambientais dos Estados Unidos de um projeto com duração de cinco anos e investimentos da ordem de 450 milhões de dólares. Estes estudos visam o desenvolvimento de pesquisas relacionando o diâmetro médio das partículas em suspensão no ar com a saúde pública [8]. Destas pesquisas resultaram a publicação dos novos métodos de coleta $\text{MP}_{2,5}$, e MP_{10} de fontes estacionárias, onde se adicionaram dois separadores inerciais na cabeça de uma sonda de coleta para quantificar amostras com tamanho médio de partículas menor ou igual a 2,5 μm e de até 10 μm . Além disto, as alterações propostas prevêm procedimentos adicionais no sentido de se reduzir a formação de reações que possam levar a medidas imprecisas de partículas condensáveis. Esta ação vem eliminar a maior parte das opções de equipamentos e métodos de análise existentes, uma vez que houve a necessidade de se melhorar a precisão [9].

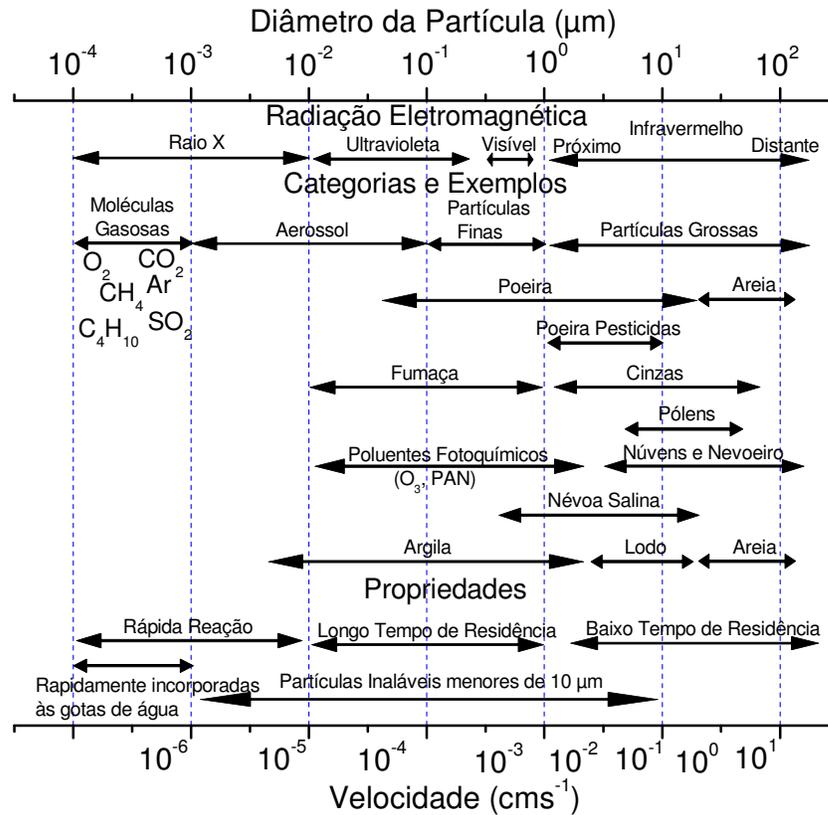


Figura 1 - Distribuição e propriedades físicas comuns das partículas.

(Adaptado de GODISH T. Air Quality, 4 th Edition 2004)

No Brasil os conceitos utilizados para efeito de legislação e controle do MP em suspensão são similares aos utilizados pela EPA. Destaca-se que sob a denominação geral de MP se encontra, também, um conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e de todo o tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho. Também se encontram aqueles originários de reações químicas no ar, como dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs) que são emitidos principalmente em atividades de combustão [10].

O MP pode ser classificado como: **partículas totais em suspensão** (PTS) que são definidas de maneira simplificada como aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é menor do que 50 μm . Uma parte destas partículas é inalável e pode causar problemas à saúde, outra pode afetar desfavoravelmente a qualidade de vida da população, interferindo nas condições estéticas do ambiente e prejudicando as atividades normais da comunidade; **partículas inaláveis** PM_{10} , as quais podem ser definidas de maneira simplificada como aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é menor do que 10 μm ; as partículas inaláveis podem, ainda, ser classificadas como **partículas inaláveis finas**, $\text{PM}_{2,5}$ ($< 2,5 \mu\text{m}$) e as **partículas inaláveis grossas** (2,5 a 10 μm). As partículas finas, devido ao seu pequeno tamanho, podem atingir os alvéolos pulmonares, já, as grossas, ficam retidas na parte superior do sistema respiratório.

A poluição do ar em grandes cidades é um sério problema de saúde pública, pois provoca na população doenças respiratórias como a asma, a bronquite e, até mesmo, o câncer, levando a morte.

A relação entre os efeitos à saúde e a poluição atmosférica foi estabelecida a partir de episódios agudos de contaminação do ar e estudos sobre a ocorrência do excesso de mortes registradas em Londres, em 1948 e 1952. Segundo o Prof. Paulo Saudiva [11] da Faculdade de Medicina da USP, somente a cidade de São Paulo perde cerca de US\$ 450 milhões por mortes que acontecem antes do tempo. De acordo com seus relatos, viver em São Paulo corresponde a fumar diariamente quatro cigarros, em virtude das partículas em suspensão no ar que resulta em média a perda de dois anos de vida. Isto é consequência de um crescimento desordenado verificado na região metropolitana de São Paulo - RMSP, especialmente da região do ABC, que a

partir da 2ª Guerra Mundial tornou progressiva e exponencial a instalação de indústrias de grande porte. Neste período não havia a preocupação com o controle das emissões de poluentes atmosféricos, sendo possível a visualização de chaminés emitindo enormes quantidades de fumaça. Há registros em jornais da década de 60 e, especialmente, de 70, de episódios agudos de poluição do ar que levaram a população ao pânico devido aos fortes odores, decorrentes do excesso de poluentes lançados pelas indústrias na atmosfera, causando mal-estar e lotando os serviços médicos de emergência. Esse crescimento rápido e desordenado levou, no início dos anos 60, à criação da Comissão Intermunicipal de Controle da Poluição das Águas e do Ar - CICPAA, envolvendo os municípios de Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul e Mauá. As medições de poluentes na atmosfera restringiam-se às taxas mensais de sulfatação, poeira sedimentável e corrosividade, pela falta de metodologias e equipamentos no parque nacional. As atividades da CICPAA, no início da década de 70, foram incorporadas pela Superintendência de Saneamento Ambiental – SUSAM, vinculada à Secretaria de Saúde do Estado de São Paulo e, em 1975, transferidas à CETESB [12].

Para fins de monitoramento ambiental é fundamental garantir que os dados obtidos a partir de cada fonte de emissão de MP sejam diretamente comparáveis a um padrão conhecido. Dois métodos básicos são utilizados para quantificar as fontes de emissão, o primeiro, utiliza a sua concentração em massa (mg/m^3) e, o segundo, o seu fluxo de massa, em g/s ou kg/h. Ambos os métodos utilizados são consistentes e seus resultados podem ser convertidos entre si. De qualquer maneira, a forma mais comum de quantificar a emissão de fontes estacionárias é a partir da sua massa. Para tanto, se faz necessário identificar e determinar a quantidade de MP no volume analisado, a sua

distribuição e massa específica. Outra alternativa é o de coletar o MP contido em um metro cúbico de ar a partir de um filtro, medindo-se a seguir sua massa resultante. O método mais prático e usualmente utilizado para a medida de MP em dutos e chaminés é o chamado de sistema de coleta isocinética, que é a proposta deste projeto.

2.2 AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA

A palavra isocinética é de origem grega e significa “igual velocidade”. Transportando o sentido da palavra para a aplicação no trabalho de amostragem de fluxos de gases em dutos e chaminés, significa inferir que a velocidade de aspiração a ser impressa pelo equipamento de medida deverá ser igual à velocidade com que os gases deverão estar sendo emitidos no local. Para tanto, o sistema deverá estar constituído de um conjunto de tubos, sondas, bomba de vácuo, termopares entre outros sensores, de modo a diminuir os riscos de erros analíticos da medida do MP. Assim, considerando que a amostragem deve coletar uma amostra representativa para todo o fluxo de gases emitidos pela chaminé, é necessário que a operação dos equipamentos obedeça aos critérios que proporcionem uma correta medição, sendo os seus parâmetros mostrados na sequência de subitens relatados [13].

2.2.1 Importância da Amostragem Isocinética

Numa chaminé, em princípio, só podem ocorrer três situações de amostragens diferentes: ou seja, que a sua velocidade seja menor, igual ou superior à existente no interior do duto. Para que haja boa reprodutibilidade da

medida se considera, durante a coleta, uma variação isocinética de, no máximo, 10% segundo as normas referenciadas [2-3].

➤ **Velocidade de amostragem menor que a do fluxo gasoso**

Para a referida medida, encontra-se representado, esquematicamente, na Figura 2, um duto coletor de MP (boquilha) inserido no interior de uma chaminé hipotética. No sistema, é realizada uma situação de fluxo na qual a velocidade de sucção dos gases pelo equipamento de medida é menor do que a do fluxo interno dos mesmos na chaminé (sub-isocinética). Nesta situação, serão coletadas mais partículas maiores, do que as que existem na realidade, como demonstrado na Figura 2. Esta Figura retrata, esquematicamente, a situação onde algumas linhas do fluxo estão desviadas devido ao semi bloqueamento da boquilha, que se comporta como se tivesse sido “tampada” parcialmente, desviando parte dos gases que teriam entrado para o coletor.

Na mesma figura, estão demonstradas, esquematicamente, dois tamanhos de partículas bem diferenciadas. A partícula menor, por ser muito pequena e possuir pouca inércia, pode acompanhar, com muita facilidade, qualquer desvio na direção dos gases e, desta maneira, como pode ser verificado, se a mesma estiver na linha de fluxo mostrada, não será captada pela boquilha e, portanto, não será amostrada. As partículas maiores possuem um peso e uma inércia muito maior (observe-se que o peso aumenta com o cubo do diâmetro) e, portanto, não conseguem acompanhar desvios pronunciados do fluxo dos gases. Do exposto, conclui-se que, como o peso das partículas maiores é proporcionalmente significativo, a concentração de MP medida neste caso será superior à realmente existente nos gases da chaminé.

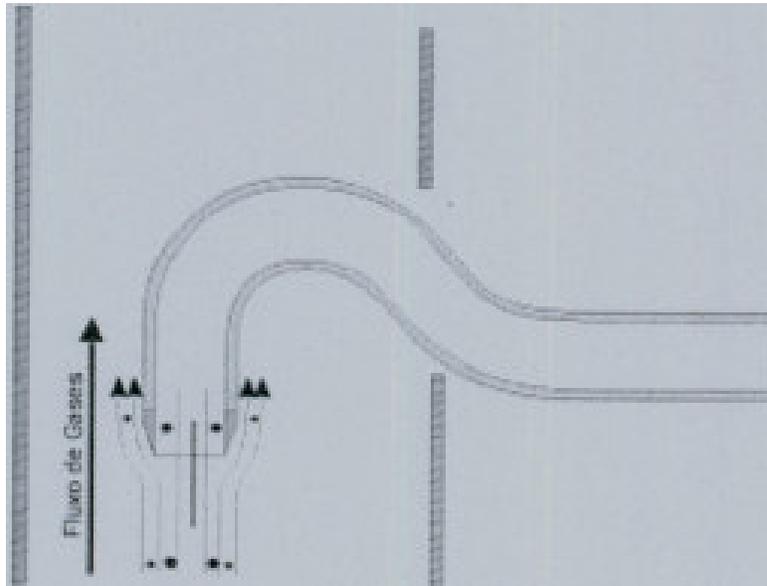


Figura 2 - Velocidade de amostragem sub-isocinética. Fonte CPRH/GTZ.

➤ **Velocidade de amostragem maior que a do fluxo gasoso**

Nesta situação, as linhas de fluxo desviam-se para dentro da boquilha, fazendo com que as partículas menores não consigam continuar no seu caminho, sendo arrastadas pelo fluxo de gases e, posteriormente, capturadas pela sonda, conforme mostrado, esquematicamente, na Figura 3.

As partículas maiores, devido a sua inércia, não acompanham este desvio dos gases e continuam numa trajetória praticamente reta, de forma que não são capturadas pela sonda. Desta maneira, a amostragem faz com que os gases captados pela sonda contenham um número muito menor de partículas grandes do que realmente existe nos gases da chaminé e, portanto, a concentração medida será muito menor do que a real.

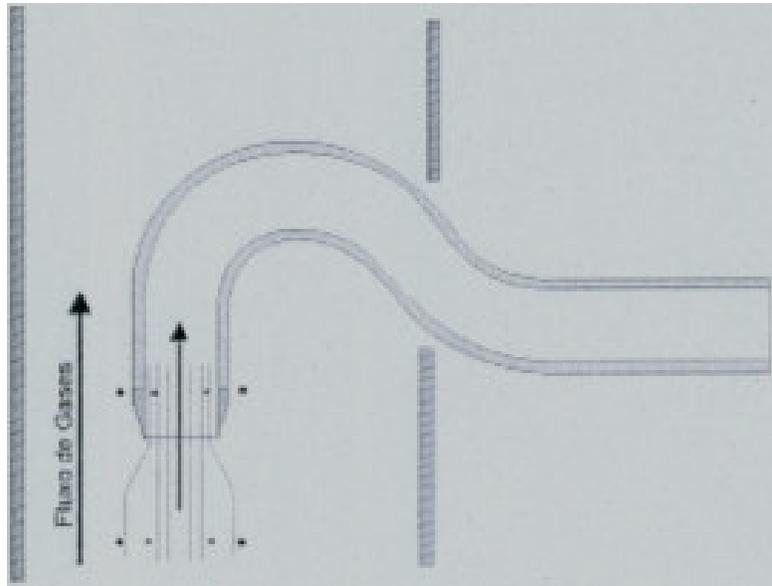


Figura 3 - Amostragem com velocidade superior à isocinética. Fonte CPRH/GTZ.

➤ **Velocidade de amostragem igual a do fluxo gasoso**

Esta situação caracteriza, de fato, uma amostragem isocinética, e apesar de aparentemente bastar ajustar a velocidade dos gases no ponto de amostragem e depois ajustar a vazão da boquilha para que a velocidade na boquilha seja equivalente, esta solução não é assim tão simples, devido ao fato de que:

a) a velocidade dos gases na chaminé varia em função do sistema de alimentação utilizado;

b) a obtenção de uma amostragem representativa implica em coletar vários pontos, no sentido de acompanhar o movimento das partículas no fluxo gasoso que, em alguns casos, apresenta segregação ou distribuição não uniforme, devido à força centrífuga ou por sedimentação nos Dutos ou Chaminé, conforme demonstrado na Figura 4.

Considerando todas estas variáveis, os especialistas desenvolveram uma metodologia de amostragem representativa dos gases. De uma maneira geral, esta metodologia implica em coletar amostras em vários pontos para que seja coberta a seção de forma uniforme, ou seja, não só no meio da chaminé, mas, de acordo com a distribuição transversal. Assim, toda e qualquer alteração na direção do duto ou chaminé, como mostrado esquematicamente na Figura 4, onde se tem um duto na forma de um cotovelo pode proporcionar ao MP, de diâmetro maior, um possível ponto de acumulação. Este fato é devido, principalmente, à força centrífuga, que o desloca diferencialmente para as paredes externas do mesmo. Assim, como exemplo, se o ponto A da figura for o local de coleta, a amostragem não será representativa do ambiente, pela possibilidade de haver uma quantidade menor de MP de diâmetro médio maior, dado o deslocamento diferenciado no local analisado. Em um duto horizontal, onde a velocidade não é muito grande, as partículas maiores tenderão a sedimentar-se e a acumular-se na parte inferior do duto, de tal forma que uma amostragem no ponto “B” da figura, também resultaria em erro.

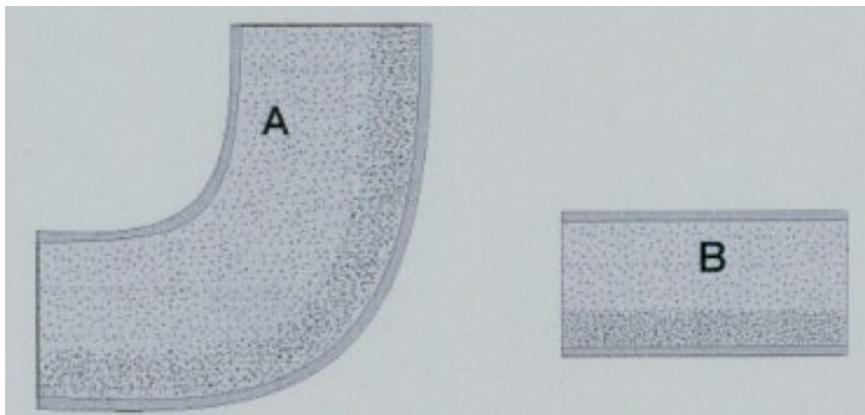


Figura 4 - Segregação das partículas. Fonte CPRH/GTZ.

2.2.2 Obtenção da Amostragem Isocinética

Qualquer fluido em movimento dentro de um duto existe um perfil de velocidade [14]. Normalmente, quanto mais perto das paredes, menor é a velocidade do fluxo, devido ao atrito das mesmas. Neste caso, à medida que se muda a posição da boquilha dentro do duto, a velocidade em cada ponto mudará e será preciso ajustar a vazão da bomba para que a velocidade na entrada da boquilha mantenha-se isocinética [14]. Para a realização da amostragem é necessário que os equipamentos permitam medir constantemente a velocidade dos gases e, também, que possa ser ajustada a sua vazão [15]. O sistema deve operar de maneira contínua e rápida, pois ao mudar a posição da boquilha dentro da chaminé, mesmo que a vazão permaneça constante, a velocidade dos gases, nestes diferentes pontos será diferente. De forma prática, a solução consiste em colocar, numa posição bem próxima à boquilha, um sensor de velocidade (neste caso o tubo Pitot é usado quase que exclusivamente) para dar informação contínua e instantânea da velocidade do fluxo de gases. Na Figura 5, encontra-se demonstrado o conjunto sonda/boquilha/Pitot, acoplado ao equipamento.

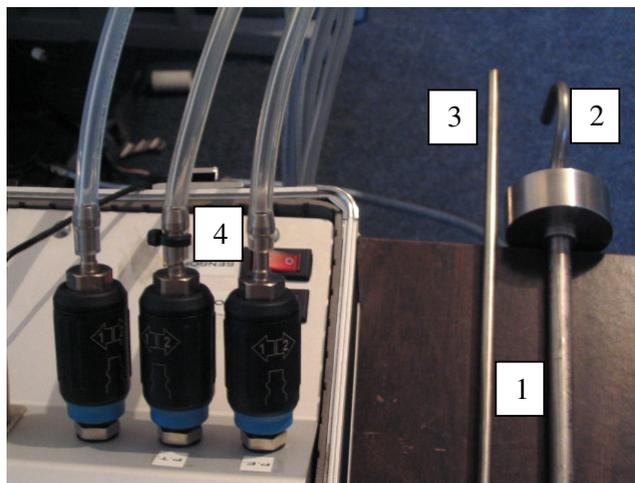


Figura 5 - Conjunto sonda/boquilha/Pitot (ER1). 1 - Conjunto da sonda; 2 - Boquilha; 3 - Tubo Pitot; 4 - Acoplamento no equipamento: Pressão estática, Pressão total e Sucção da bomba.

Desta forma, é possível conhecer a velocidade instantânea dos gases no ponto da chaminé, podendo-se ajustar rapidamente a vazão da amostragem, para que haja uma coleta isocinética. A condição isocinética de amostragem permite delinear a velocidade dos gases que estão sendo amostrados na ponta da boquilha (V_b) uma vez que esta é, praticamente, igual à velocidade do fluxo dos gases no duto ou chaminé (V_c), conforme a Equação 1:

$$I = \frac{V_b}{V_c} \times 100 \quad (1)$$

Onde I = Variação isocinética, em (%)

Quando a vazão e as linhas de fluxo de um gás são desviadas, como acontece numa amostragem não isocinética, ou seja, quando $V_b \neq V_c$, o resultado da amostragem pode apresentar concentrações menores ou maiores do que a realidade, por que:

a) as partículas maiores tendem a mover-se continuamente na direção inicial;

- b) as partículas menores tendem a acompanhar as linhas de fluxo, ou seja, se comportam mais como moléculas do mesmo gás portador;
- c) as partículas de tamanho intermediário desviam-se um pouco de sua trajetória original.

Para um melhor entendimento sobre a questão, serão apresentados, a seguir, três exemplos, que simplificarão as características de um gás composto por partículas de 2 e 0,05 mg, respectivamente, com diâmetros aproximados de 1,8 mm e 0,2 mm.

Exemplo 1:

Supondo ser uma amostragem isocinética, ou seja, que por definição $V_b = V_c$, conforme demonstrado na Figura 6, e que a vazão de amostragem seja $Q = 1 \text{ m}^3/\text{min}$, serão coletadas, esquematicamente, 4 partículas grandes e 4 partículas pequenas por minuto.

Portanto, a massa de MP coletada por minuto será:

$$\text{Massa de MP} = 4 \times 2 + 4 \times 0,05 = 8,2 \text{ mg/min}$$

A concentração de partículas no fluxo gasoso será:

$$\text{Concentração de MP no fluxo gasoso} = 8,2 \text{ mg/min} / 1 \text{ m}^3/\text{min} = 8,2 \text{ mg/m}^3$$

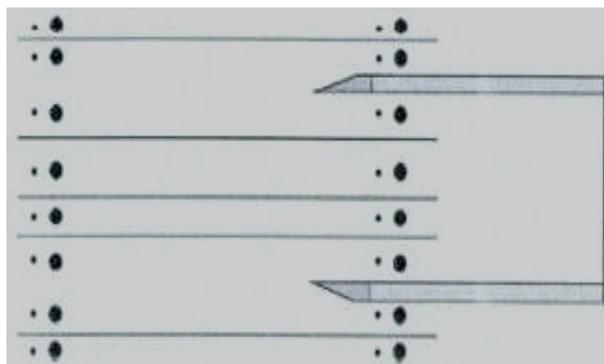


Figura 6 - Situação com amostragem isocinética. Fonte CPRH/GTZ.

Exemplo 2:

Supondo que por definição $V_b = 2 V_c$, ou seja, a amostragem represente 200% da velocidade isocinética, conforme demonstrado na Figura 8 e que a vazão correspondente seja $Q = 2 \text{ m}^3/\text{min}$.

Neste caso, serão coletadas 4 partículas grandes e 8 partículas pequenas. Portanto, o peso coletado por minuto será:

$$\text{Massa de MP} = 4 \times 2 + 8 \times 0,05 = 8,4 \text{ mg/min}$$

A concentração de partículas no fluxo gasoso será:

$$\text{Concentração de MP no fluxo gasoso} = 8,4 \text{ mg/min} / 2 \text{ m}^3/\text{min} = 4,2 \text{ mg/m}^3$$

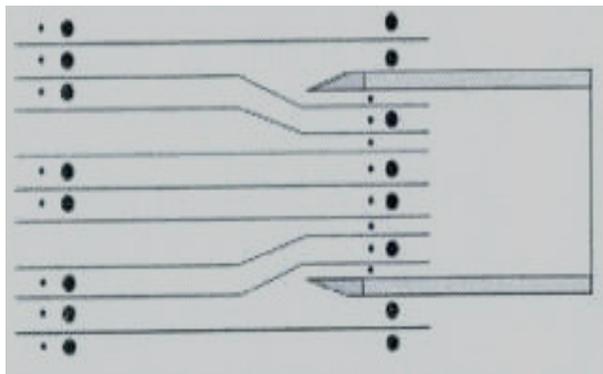


Figura 7 - Situação com amostragem superior a ISOCINÉTICA. Fonte CPRH/GTZ.

Exemplo 3:

Supondo que $V_b = 0,5 V_c$, ou seja, que a velocidade de amostragem seja igual à metade do valor isocinético, conforme demonstrado na Figura 8, e que a vazão correspondente seja $0,5 \text{ m}^3/\text{min}$.

Neste caso, serão coletadas 4 partículas grandes e 2 partículas pequenas. Portanto, o peso coletado será:

$$\text{Massa de MP} = 4 \times 2 + 2 \times 0,05 = 8,1 \text{ mg/min}$$

A Concentração de partículas no fluxo gasoso será:

$$\text{Concentração de MP no fluxo gasoso} = 8,1 \text{ mg/min} / 0,5 \text{ m}^3/\text{min} = 16,2 \text{ mg/m}^3$$

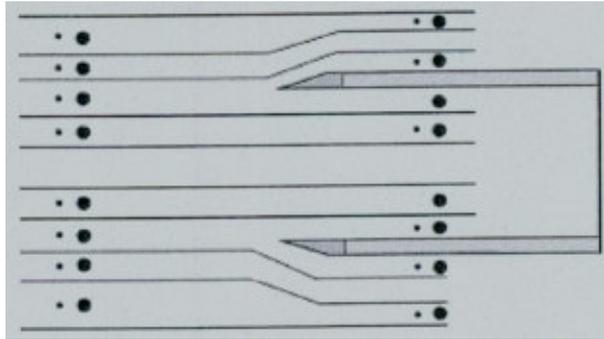


Figura 8 - Situação com amostragem sub isocinética. Fonte CPRH/GTZ.

Os exemplos citados, obviamente, são teóricos, pois o que determina quais as faixas de tamanho do MP, bem como a sua classificação em grande, médio ou pequeno são as informações referentes à:

- 1) sua massa específica;
- 2) velocidade dos gases na chaminé;
- 3) temperatura interna;
- 4) viscosidade e forma das partículas; e,
- 5) diâmetro da boquilha.

2.3 EQUIPAMENTOS EM USO NO MERCADO BRASILEIRO

2.3.1 Coletor Isocinético de Partículas de Produção Nacional (A)

O coletor isocinético de material particulado, denominado como (A) ilustrado na Figura 9, foi o primeiro equipamento de coleta de material particulado produzido no Brasil [16]. Este equipamento permite ao usuário monitorar velocidades, temperaturas, pressões e vazões, visando manter a

amostragem isocinética dos gases. Nesta condição, o gás entra pela boquilha a uma velocidade igual à velocidade do gás que se aproxima. Durante a amostragem, parâmetros como velocidade e temperatura dos gases têm de ser constantemente monitorados, e a vazão periodicamente ajustada de modo que a velocidade na boquilha se iguale à velocidade dos gases e mistura de partículas na chaminé.

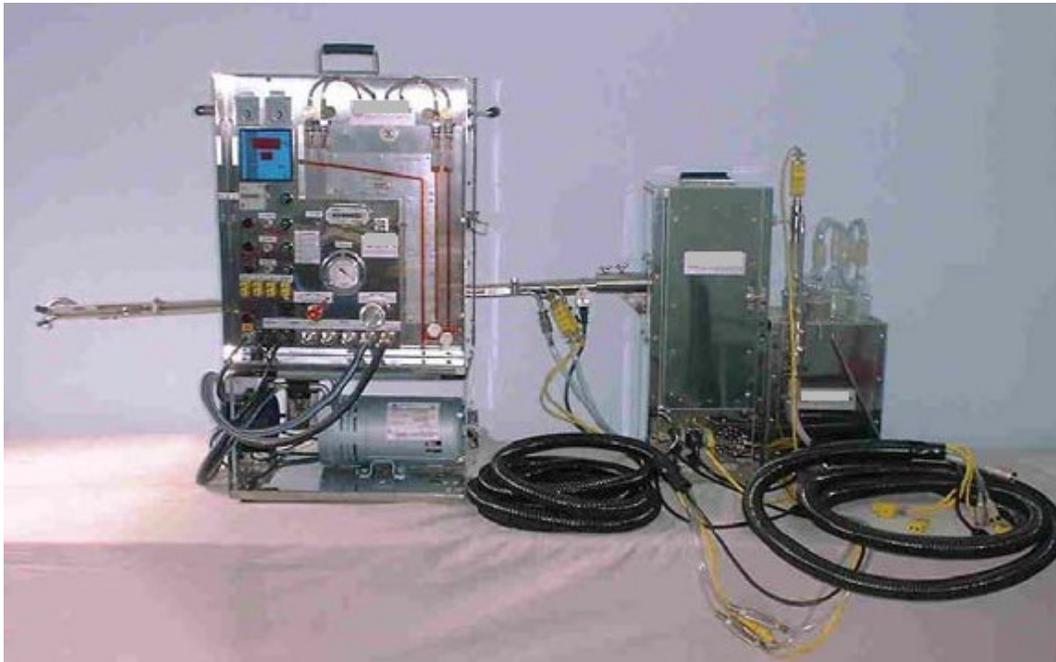


Figura 9 - Coletor isocinético de Partículas (A). Fonte, Catálogo do Equipamento.

2.3.2 Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos de Fabricação Nacional (B)

O equipamento ilustrado na Figura 10, denominado como (B), foi lançado no mercado em 2008. Seu projeto segue as mesmas características do equipamento do item 2.3.1 [17]. A desvantagem de ambos se insere na necessidade de monitoramento e de ajuste manual, constantes. Os dois

equipamentos com tecnologia nacional operam com o sistema filtrante externo ao duto ou chaminé.



Figura 10 - Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (B), Fonte Catálogo do Equipamento.

2.3.3 Equipamento Isocinético com Tecnologia Importada (C)

O equipamento ilustrado na Figura 11, denominado como (C), é um sistema de medição móvel para a determinação gravimétrica do material particulado em dutos e chaminés. O gás é extraído isocineticamente pelo sistema sonda boquilha. O MP é retido pelo conjunto filtro/boquilha e pesado subseqüentemente [18]. Este equipamento apresenta tecnologia atual de coleta isocinética de MP, porém, tem preço elevado de compra e alto custo operacional.



Figura 11 - Equipamento Isocinético (C). Fonte Catálogo do Equipamento.

2.3.4 Equipamento Isocinético com Tecnologia Importada (D)

O equipamento ilustrado na Figura 12, denominado como (D), é um coletor automático de MP que opera isocineticamente em dutos e chaminés. O equipamento extrai automaticamente o gás juntamente com o MP que é depositado em um filtro que após a coleta é condicionado e pesado [19]. O sistema operacional deste equipamento é similar ao equipamento do item 2.3.3, possuindo as mesmas dificuldades operacionais citadas anteriormente. Os dois equipamentos com tecnologia importada operam com o sistema filtrante no interior do duto ou chaminé.



Figura 12 - Equipamento Isocinético (D), Fonte: Catálogo do Equipamento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão detalhadas as fases do desenvolvimento do equipamento ER1, a definição dos sensores, o dimensionamento das peças, as plantas para condicionamento do sistema e a definição da interface com o computador para o sistema de aquisição de dados. Também, encontra-se apresentado o equipamento já pronto para uso e seus acessórios utilizados na medição da concentração de MP em fluxos gasosos no interior de dutos e chaminés de fontes estacionárias. Estão detalhados, também, todos os processos de rastreamento dos sensores utilizados.

3.1 FASE DO DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO

Neste trabalho, foi desenvolvido um equipamento com a utilização dos princípios básicos das tecnologias existentes no mundo para a medida de pressão, vazão e temperatura. Para isso, foram pesquisados os principais fabricantes de componentes para medição destes parâmetros. Após a pesquisa de mercado destes dispositivos, foram iniciados os testes com alguns sensores de pressão, vácuo e vazão de duas empresas já consagradas no mercado internacional, a Motorola e a Honeywel. Estas empresas, após a apresentação do projeto, se mostraram interessadas em financiar o desenvolvimento com a doação de alguns sensores que seriam utilizados para testes. De início, foram testados alguns sensores de pressão, vácuo e vazão, optando pelos sensores com sinal não condicionados, os quais exigiram um sistema externo para ampliação do sinal de saída, que geralmente são em milivolts. Após vários testes foi verificado que os

resultados não eram eficientes, apresentando várias interferências que geravam resultados ruins. Estas empresas possuem uma gama muito grande de sensores, e a definição do melhor dispositivo de interação no equipamento prolongou o tempo de montagem e testes de qualidade. Após vários meses e os mais diversos componentes, se chegou à conclusão que utilizar sensores com o sinal condicionado seria a melhor opção, mesmo possuindo um custo maior, sendo compensado com a melhora da qualidade dos resultados. O sinal condicionado trabalha sob atenuação, sendo linear na faixa de medida do trabalho de campo. Como exemplo pode-se citar o sensor de pressão diferencial utilizado no desenvolvimento neste trabalho, Figura 13.

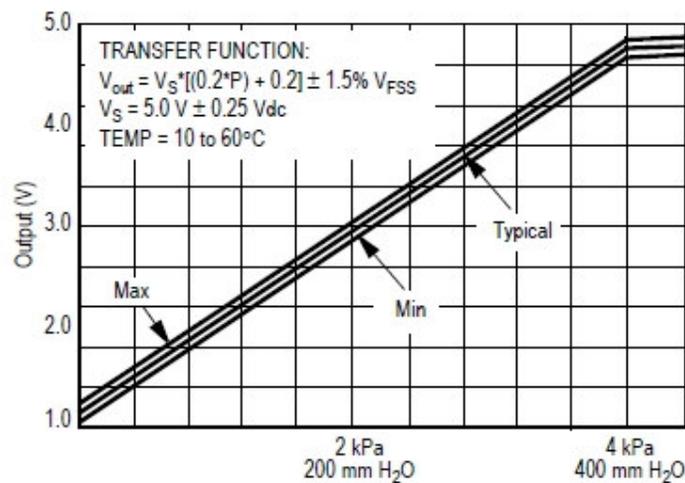


Figura 13 - Compensação de sinal para um sensor de pressão com sinal de saída de 1 a 5 V. Fonte Freescale Semiconductor [27]

Os sensores com sinal linearizado, apesar de possuírem um custo maior, no final do processo acabam se tornando mais econômicos por não necessitarem de sistemas auxiliares para a atenuação deste sinal, com a grande vantagem de apresentarem resultados melhores. Após esta definição,

foram testados alguns sensores com esta tecnologia e definidos quais seriam efetivamente utilizados no desenvolvimento do protótipo. A tecnologia que foi escolhida para as medidas com os sensores de pressão diferenciais e vácuos possuíram o princípio do transdutor piezo resistivo, que é o estado da arte dos sensores de pressão de silício monolítico, projetados para uma ampla gama de aplicações [27]. O princípio de funcionamento destes sensores está apresentado na Figura 14.

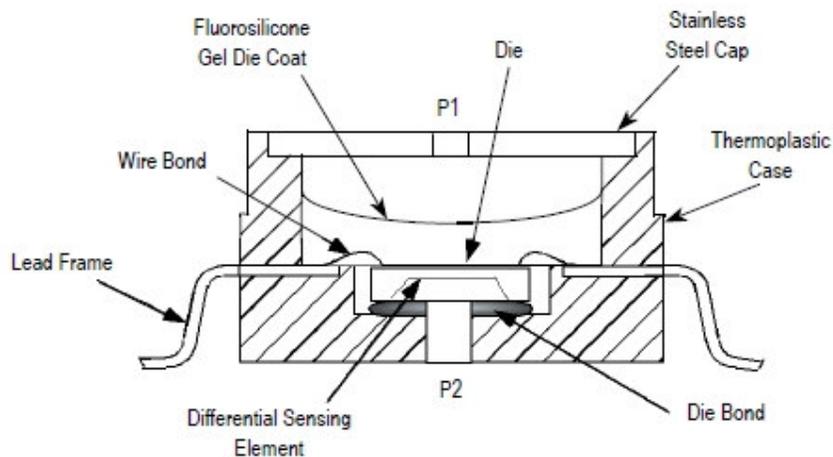


Figura 14 - Princípio de funcionamento do sensor de pressão diferencial.

Fonte Freescale Semiconductor.

Para a definição dos sensores de vazão, não foi diferente, após vários testes com muitos equipamentos de vários fabricantes, se optou por sensores que utilizassem o princípio mássico térmicos. Estes sensores possuem um sistema de medição por diferencial de temperatura e com a vantagem de ter um custo mais acessível e resultados eficientes. A grande dificuldade destes sensores é a alta sensibilidade com a umidade, que os danificam. O sensor consiste de um resistor aquecido e um sensor de temperatura que são inseridos no interior do ambiente com o fluxo de gás, conforme ilustrado na Figura 15. Para cada faixa de vazão o diâmetro interno do tubo é alterado de

tal forma que a velocidade do fluxo permaneça no valor nominal especificado para cada sensor. Ao direcionar uma corrente através dele, a temperatura do aquecedor aumenta alguns graus sobre a temperatura ambiente. O resistor do sensor mede a diferença de temperatura existente, fazendo a sua compensação para a condição padrão. As resistências e os sensores estão ligados a uma ponte Wheatstone. O poder de aquecimento necessário para manter a diferença de temperatura entre o aquecedor e o sensor a uma taxa constante é dependente do fluxo de massa. No caso de ausência de fluxo, uma constante relativamente pequena de potência de aquecimento chamada de poder calorífico “offset” se faz necessária, sendo ajustada pelo sistema de medida. Quando um determinado fluxo de massa ocorre, o aquecedor é resfriado por convecção forçada. Portanto, o poder de aquecimento tem de ser aumentado para manter a diferença de temperatura. O princípio de medida descrito é denominado de constante de temperatura anemometria (CTA) [20].

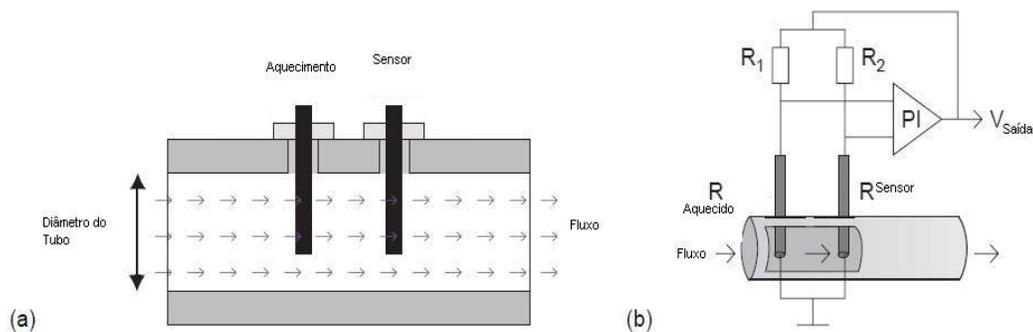


Figura 15 (a) - Esquema dos sensores colocado no corpo do sensor; 15 (b) - Conexão das duas resistências dos sensores no circuito eletrônico.

Para a medida de temperatura foram utilizados termopares tipo K, com sistema de condicionamento de sinal de fabricação nacional. O desenvolvimento do conjunto para esta medida se tornou mais fácil por possuir

componentes no mercado nacional em grande escala. Uma das dificuldades encontradas foi à grande oscilação nos valores apresentados. Após rastrear todas as possibilidades foi verificado que na montagem do sistema se utilizou componente de material diferente ao do termopar que estava sendo utilizado no tubo de PITOT. Após troca destes componentes, por cabo de compensação do mesmo material, este problema foi solucionado.

Na Figura 16, pode ser verificada a primeira fase do desenvolvimento do protótipo com os sensores operando individualmente. Na Figura 17, está ilustrado o sistema de medida com todos os sensores montados para a aquisição de dados em tempo real.

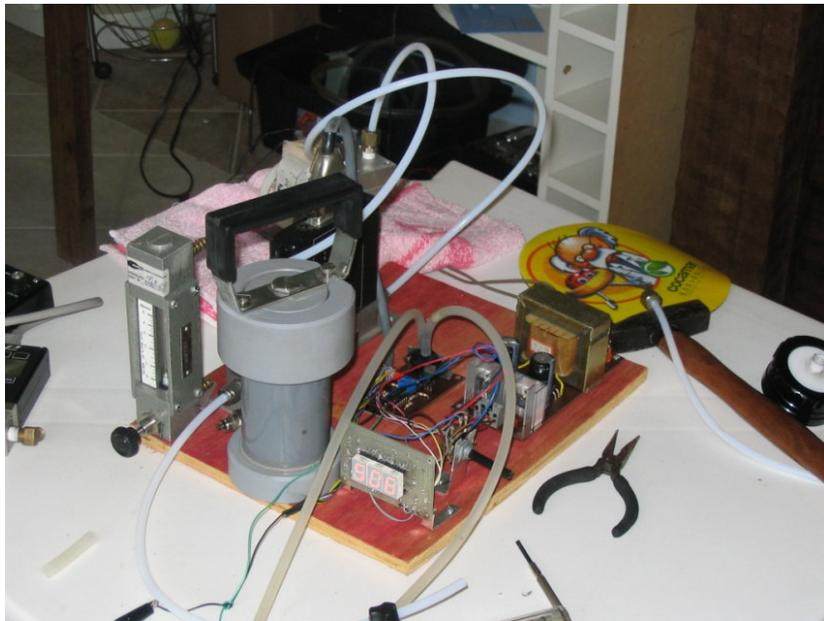


Figura 16 - Teste com os primeiros sensores, pressão, vazão e temperatura operando em conjunto.

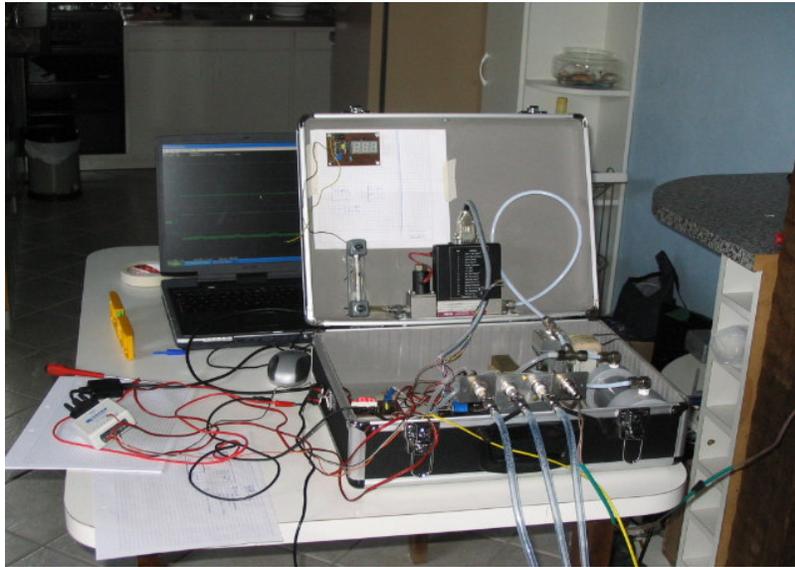


Figura 17 - Equipamento montado em mala própria, pronto para testes com o sistema de aquisição de dados.

3.2 SISTEMA COLETOR ISOCINÉTICO PARA MP, ER1

O equipamento ER1 foi idealizado para ser composto de quatro sistemas:

- 1 sonda de coleta, composta de tubo de PITOT [21-22], termopar [23-24] e porta-filtro (boquilha);
- 1 maleta central composta de sistema eletrônico [25, 26, 27], sistema de vácuo [28-29] e controladores de fluxo [30, 31, 32];
- 1 maleta de boquilhas, contendo um conjunto de trinta e seis boquilhas sendo seis boquilhas para cada diâmetro especificado 3, 4, 5.6, 6, 7.2 e 9 mm [33]; e

- 1 computador portátil para a aquisição e tratamento de dados, com emissão de relatório [34-35].

Na Figura 18, encontra-se apresentada imagem de todo o conjunto do equipamento ER1, com os componentes empregados para a realização da coleta isocinética.

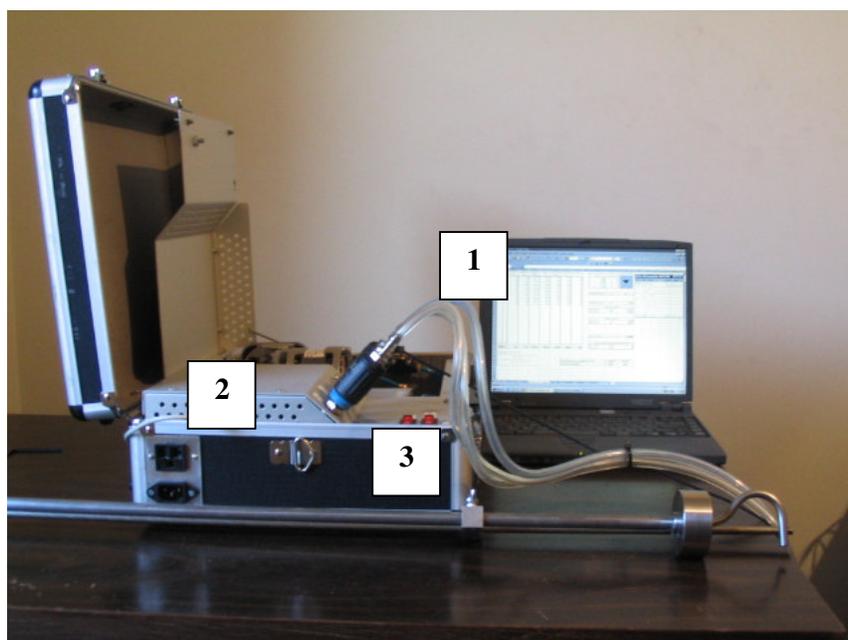


Figura 18 - Vista lateral do equipamento ER1 e seus componentes: 1 - sistema de aquisição de dados; 2 - maleta central; 3 - sonda de coleta.

O equipamento ER1 foi projetado de forma a operar com sensores eletrônicos para a medida da velocidade de fluxo pela pressão diferencial, vazão [36], temperatura e vácuo, em tempo real e em paralelo, garantindo a coleta isocinética do MP, segundo recomendações da norma ABNT NBR 12827/93 [2] e seus documentos complementares. Todos os sensores e peças

confeccionadas foram rastreados pela Rede Brasileira de Calibração, RBC, sob os códigos:

- i) sensor de pressão diferencial [37-38]: Cert. de calibração nº - 76 265-101 - 2006/2007;
- ii) tubo Pitot: Cert de calibração nº – 74 385-101 – 2006/2007;
- iii) sensor de temperatura: Cert. de calibração nº – 1129/07;
- iv) sensor de vazão: Cert. de calibração nº - 74 381-101 - 2006/2007;
- v) peso padrão: Cert. de calibração nº – 3448/2003;
- vi) confecção das boquilhas: Cert. de calibração nº – 020/07.

Na Figura 19, está apresentado, esquematicamente, o sistema de amostragem, o sentido do fluxo de gás e os sinais eletrônicos empregados na coleta de MP em dutos e chaminés de fontes estacionárias, pelo equipamento ER1.

Na sequência, serão apresentados os parâmetros necessários para as medidas experimentais do MP em fontes emissoras de gases, o sistema de processamento e o conjunto de acessórios necessários para que os resultados estejam dentro dos preceitos normalizados.

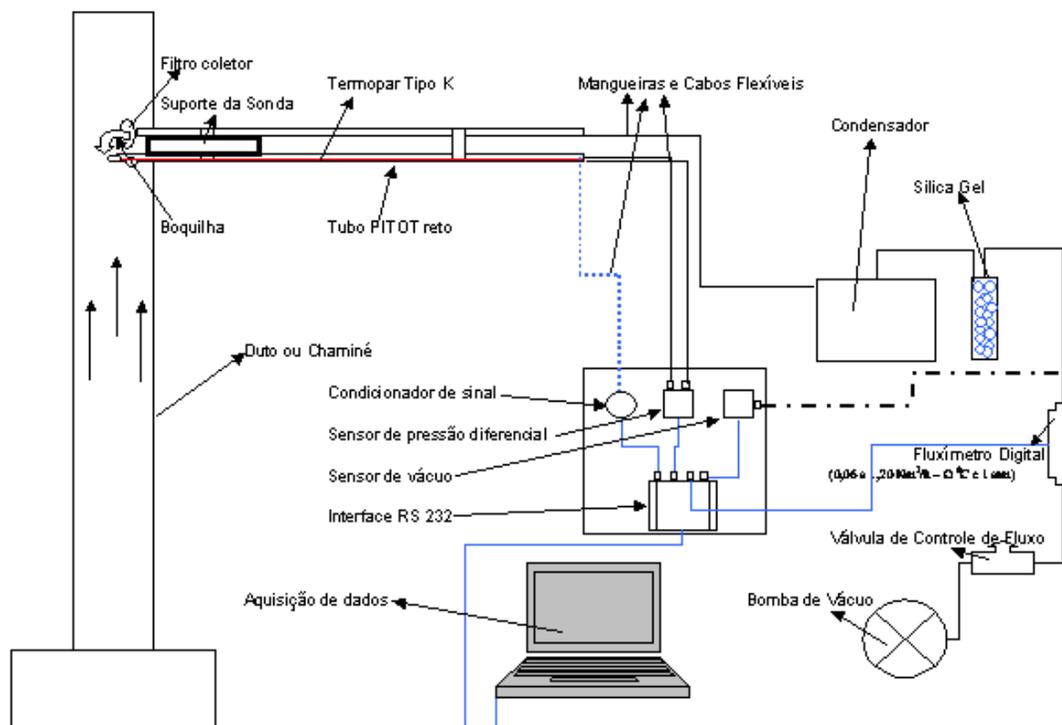


Figura 19 - Esquema do sistema de amostragem e coleta de dados, em tempo real, do equipamento ER1.

3.3 BALANÇA ANALÍTICA

A medida de massa da boquilha é realizada antes da coleta e após, quando o MP já se encontra aderido ao sistema filtrante. Esta massa é obtida com balança analítica. Neste projeto foi utilizada a balança analítica, marca Gehaka, modelo AG-200 [39], com capacidade de medida de 200,0000 g e precisão de 0,1 mg.

A calibração foi realizada com peso padrão com certificado de calibração nº 11803/04 emitido pela Rede Brasileira de Calibração, RBC.

3.4 PROCEDIMENTOS

Neste capítulo estão detalhados os procedimentos para a plena utilização do equipamento e metodologias propostas.

3.4.1 Montagem das Boquilhas

As boquilhas na cabeça da sonda são constituídas dos acessórios mostrados na Figura 20. O anel de alumínio (1), o filtro (2) e o suporte (3), conjunto denominado de boquilha, é montado no sistema de prensagem (4), para a sua fixação. Após a montagem, o conjunto (anel, filtro e suporte) deve ser identificado, seco em estufa a uma temperatura de 105 °C, por um período de 2 a 3 h, resfriado em dissecador por 2 h e pesado em balança analítica, até massa constante, com precisão de 0,1 mg. A boquilha montada e pronta para a utilização pode ser vista na Figura 21.

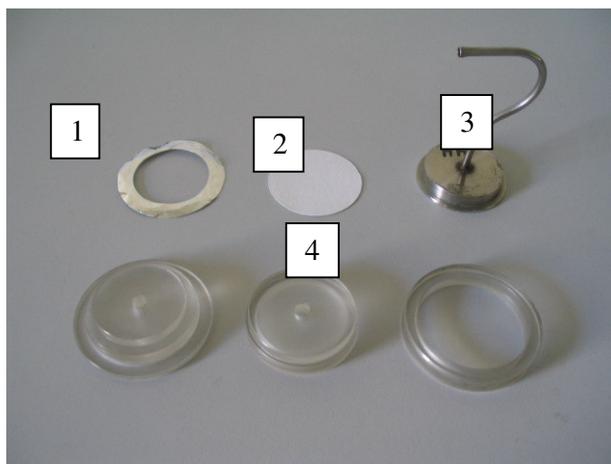


Figura 20 - Montagem do conjunto boquilha, filtro e anel de alumínio.



Figura 21 - Ilustração do conjunto boquilha após sua montagem.

O filtro utilizado nas boquilhas apresenta 99,97% de eficiência para a retenção de partículas de até 0,3 μm de material não reativo com o meio e compatível com a temperatura do efluente analisado.

Para a fabricação das boquilhas foi utilizado desenho esquemático mostrado na Figura 22, sendo esta montada em aço inox 316, de modo a utilizar as medidas efetivas dos diâmetros (D) apresentados para o cálculo da área. Para a certificação das medidas dos diâmetros efetivos foi utilizado paquímetro padrão, o qual apresentou exatidão total de acordo com a norma JIS B7507 [40].

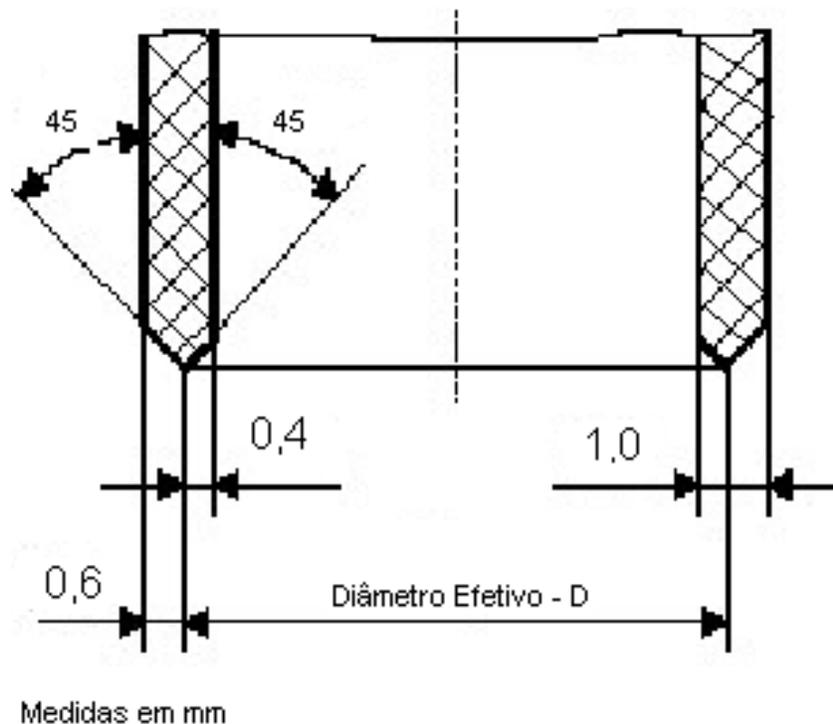


Figura 22 - Desenho esquemático para a confecção de boquilhas.

3.4.2 Determinações Preliminares

Neste item encontram-se descritos os procedimentos preliminares para a execução do ensaio no ER1.

➤ **Determinação da umidade**

A umidade dos gases deve ser determinada a partir da técnica do bulbo úmido e seco [41]. O procedimento deve ser iniciado pela medida da temperatura de bulbo seco, utilizando termômetro com comprimento de haste de 300 mm. Para a determinação do valor do bulbo úmido, na mesma haste do termômetro, é colocado um chumaço de algodão umedecido na ponta do termopar, sendo, ambos, inseridos no duto. Espera-se a temperatura estabilizar e anota-se a temperatura de bulbo úmido. Os valores obtidos devem ser

digitados em planilha do programa ER1, conforme exemplificado na Figura 23, que representa a tela inicial das medidas, pelo software. A pressão ambiente deve ser determinada pelo barômetro que acompanha o equipamento GPS, marca eTrex, modelo Vista [42].

Parâmetros experimentais para a determinação do MP, pelo ER1	
% H₂O	10,4 %
Temperatura do bulbo seco	100 °C
Temperatura do bulbo úmido	50 °C
Pressão atmosférica	900 mBar

Nota: após a inserção dos valores, pressionar a tecla F9 para a atualização dos cálculos.

Figura 23 - Cálculo da umidade dos gases de combustão, Planilha ER1 “Umidade”.

➤ **Determinação da densidade**

Para o cálculo da densidade dos gases de combustão utiliza-se o equipamento analisador de gases de medição contínua, com princípio de medida por célula eletroquímica para o oxigênio (O₂) e cálculo de combustão fornecido pelo próprio equipamento para o dióxido de carbono (CO₂) [43]. Os dados obtidos são digitados na planilha do programa do equipamento, conforme exemplificado na Figura 24. O valor inserido para a percentagem em volume da umidade (célula H₂O) é obtido conforme planilha ilustrada na Figura 23.

Preencher as células amarelas com os valores medidos dos gases						
Esta planilha não aceita ponto no lugar de virgula						
Dados medidos	O2	10	CO2	0	H2O	2,12697863
		Base Seca		Base Umida		
ELEMENTO	Densidade	Composição	Contribuição	Composição	Contribuição	
Oxigênio (O2)	1,4276	10,00	0,143	9,79	0,14	
Nitrogênio (N2)	1,2498	90,00	1,125	88,09	1,10	
Gás Carbônico (CO2)	1,9635	0,00	0,000	0,00	0,00	
Monóxido de Carbono (CO)	1,2497	0,00	0,000	0,00	0,00	
Água (H2O)	0,80376	0,00	0,000	2,13	0,02	
		100	1,27	100	1,26	Kg/m3
Precionar F9 para atualizar os calculos						

Figura 24 - Cálculo da densidade dos gases, Planilha ER1 “densidade”.

➤ **Medida da pressão barométrica**

A pressão atmosférica deve ser medida a partir do barômetro instalado no equipamento GPS que acompanha todo o conjunto de amostragem.

➤ **Temperatura ambiente**

A medida da temperatura ambiente é realizada com termômetro que acompanha o conjunto de amostragem.

➤ **Diâmetro interno da chaminé**

A medida do diâmetro da chaminé é realizada com auxílio de uma trena, caso não seja possível, solicitar este dado ao responsável pelo sistema a ser medido.

➤ **Número mínimo de pontos de coleta**

O número de pontos deve ser determinado conforme NBR 10.701 [43], sendo que o tempo medido em cada ponto não pode ser inferior a 2 minutos.

➤ **Ensaio de vazamento**

O ensaio de vazamento deve ser executado antes de iniciar a coleta (com o sistema de amostragem já montado), sempre que ocorrer a troca de componentes (antes e após a troca) e após a conclusão da coleta. O ensaio de vazamento deve ser conduzido da seguinte forma:

- ligar a bomba, abrir totalmente o regulador de fluxo e fechar a entrada da boquilha. O teste será satisfatório se o medidor de fluxo indicar valor abaixo de 0,6 Nlpm. O respectivo valor é visualizado na tela do computador, conforme representado na Figura 25, canal 3 = 3. Caso isto não ocorra os tubos e as conexões deverão ser revisadas.

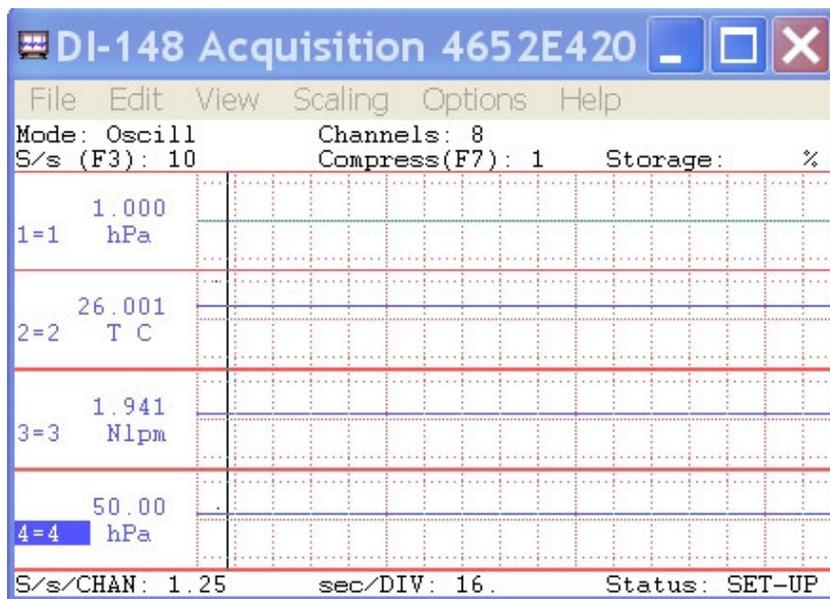


Figura 25 - Programa de aquisição de dados do equipamento ER1, dados em tempo real.

3.5 OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO

3.5.1 Procedimento

- i) Montar o equipamento ER1, conectando todos os sensores da sonda, conforme Figura 26.
- ii) Conectar o computador ao equipamento com o cabo USB.
- iii) Ligar o computador e abrir o programa WINDAQ DI 148U, na tela do computador, aparecerá o gráfico conforme Figura 25, com as indicações:

Canal 1 – Pressão diferencial de velocidade (hPa);

Canal 2 – Temperatura dos gases de combustão (°C);

Canal 3 – Vazão da bomba (Nlpm); e,

Canal 4 – Pressão (vácuo) da linha de amostragem (hPa).

- iv) Aguardar a estabilização do sistema por um período mínimo de 15 minutos.
- v) Medir a pressão estática desconectando o conector da pressão total e deixar este sensor aberto para a pressão atmosférica, anotar este valor.
- vi) Definir o número de pontos a serem coletados conforme NBR ABNT 10.701 [44], e anotar na planilha do Excel.
- vii) Abrir programa EXCEL e planilha de aquisição de dados, não se esquecendo de renomear e salvar a planilha para cada coleta.

- viii) Entrar com os valores preliminares coletados e a pressão estática, na planilha do Excel “Dados Gerais”, Figura 22. Anotar, também, os dados da empresa e as características do ponto amostrado.
- ix) Inserir a sonda no duto para medida da velocidade e escolha da boquilha a ser utilizada.
- x) Iniciar o programa de aquisição na planilha “Coleta” por um período de 8 minutos. Caso o programa seja iniciado em outra planilha aparecerá um sinal de erro. A bomba deve permanecer desligada neste período.
- xi) Entrar na planilha “Dados de Campo”, conforme imagem mostrada na Figura 28, para visualizar os dados que estão sendo medidos.
- xii) Escolher a boquilha, coluna vazão isocinética na Planilha da Figura 28 “Dados de Campo”, utilizar a boquilha que apresenta a maior vazão, não excedendo o limite da bomba, (15,00 Nlpm). Deve-se ter o cuidado de escolher a boquilha que mais se adequou às condições do duto a ser ensaiado e as condições do equipamento coletor ER1. Escolher a boquilha de tal forma que não seja necessária sua troca no decorrer da coleta.
- xiii) Após a escolha do diâmetro da boquilha a ser utilizado, montar o conjunto boquilha e sonda, conforme item 3.3.1 e Figura 29, tendo todo o cuidado para não danificar o filtro.
- xiv) Na seqüência, a linha de amostragem deverá ser testada quanto a vazamentos.
- xv) Inserir a sonda novamente no duto com a bomba desligada, fixá-la, ligá-la e ajustar a vazão isocinética, iniciando a coleta. Acompanhar a isocinética na coluna isocinética da planilha da Figura 28, “Dados de Campo”, tendo o cuidado de permanecer sempre próximo a 100% com

um desvio não maior do que 10% para mais ou para menos em todo o período da coleta. Se esta condição não for seguida a coleta não será válida.

- xvi) O tempo total de coleta não deve ser inferior a 60 minutos, na soma de, no mínimo, duas amostragens. Em casos em que a concentração de MP seja elevada o tempo de coleta deve ser reduzido para evitar o rompimento do filtro (NBR 12827/93, item 5.3.2.5, onde, os casos especiais devem ser previamente estudados), o qual possui a capacidade máxima de 200 mg de massa coletada.



Figura 26 - Equipamento ER1 com todos seus componentes montados.

Coletor Isocinético para Material Particulado Total - ER1				
	Data	29/09/09	Dados Processados	15/10/2009 16:45
	Industrial	Eliseu Esmanhoto		
	Ponto de amostragem	Caldeira 2		
	Processo	Produção de Vapor		
	Resp	Eliseu		

PARÂMETROS		Unidade	VALORES	Nome

INÍCIO DA AMOSTRAGEM		hh:mm		
TÉRMINO DA AMOSTRAGEM		hh:mm		
FATOR DE CALIBR. DO PITOT		TESTO	0,67	Fator_Ptot
UMIDADE DOS GASES		%	2,1	Umidade
SEÇÃO DA CHAMINÉ		m²	0,031	Área
PRESSÃO ESTÁTICA		Pa	10	Pressão
PRESSÃO ATMOSFÉRICA		mBar	912	Patm
TEMPERATURA AMBIENTE		Celsius	18	°C
TEMPERATURA AMBIENTE		Kelvin	291	K
CONDIÇÃO NORMAL		mBar	1013	mBar
CONDIÇÃO NORMAL		Kelvin	273,15	K
OXIGÊNIO DE REFERÊNCIA		%	21	O ₂
OXIGÊNIO MEDIDO		%	10	O ₂
DIÓXIDO DE CARBONO		%	0	CO ₂
DENSIDADE DOS GASES		Kg/m3	1,26	Kg/m3
MASSA COLETADA		grama	0,002	g
PONTOS POR EIXO		Pontos	8	Eixo

Figura 27 - Entrada dos dados preliminares a coleta “Dados Gerais”.

EMISSÕES ATMOSFÉRICAS - MPT Dutos e Chaminés

Local		Eliseu Esmanhoto		Ponto		Caldeira 2		29/09/09		
Tempo	Press Ch	Veloc Ch	Vazão Ch	Temp	Vazão Bom	Press Bom	Isocinética	Vazão Isocinética	Boquilha	Escolha Boquilha
min	hPa	m/s	Nm³/h	°C	NLPM	hPa	%	NLPM	Diâm - mm	
2	0,06	2,28	216,5	18,94	7,24	58,71	101	0,82	3	
4	0,06	2,31	220,0	18,95	7,22	57,20	99	1,46	4	
6	0,06	2,35	223,3	19,10	7,31	56,64	99	2,86	5,6	
8	0,07	2,52	239,4	19,24	7,66	60,63	97	4,73	7,2	
10	0,07	2,52	239,2	19,39	7,91	63,21	100	7,39	9	
12	0,08	2,59	246,4	19,53	7,92	62,98	97			
14	0,07	2,52	238,9	19,64	8,00	63,91	101			
16	0,07	2,44	231,7	19,67	7,65	59,75	100			
18	0,07	2,47	234,1	19,76	7,89	62,46	102			
20	0,06	2,28	216,0	19,89	8,02	63,68	112			
22	0,05	2,15	204,2	19,93	6,69	48,52	99			
24	0,06	2,18	206,7	19,98	6,96	51,29	102			
26	0,06	2,17	206,2	19,93	6,62	47,37	97			
28	0,06	2,21	209,7	19,66	6,82	49,21	98			
30										
32										
34										
36										
38										
40										
42										
44										
46										
48										
50										
52										
54										
56										
58										
60										
Médias	0,07	2,36	223,7	19,54	7,42	57,54	100			

Vazão Isocinética			Boquilha			Escolha Boquilha		
NLPM			Diâm - mm					
0,82			3					
1,46			4					
2,86			5,6					
4,73			7,2					
7,39			9					
Boquilha Utilizada			9			mm		
Tempo de Coleta			min			27,9		
Vazão da Chaminé								
Base Umida			Nm³/h			224		
Base Seca			Nm³/h			219		
Volume coletado								
Base Umida			Nm³			0,212		
Base Seca			Nm³			0,207		
Massa coletada			g			0,0020		
Concentrações Material Particulado Total								
Base Umida			mg/Nm³			9		
Base seca			mg/Nm³			10		

Referência N = 0 °C e 1013 hPa

$$v = 1,4142 S \sqrt{\frac{101,3 \cdot 10^3}{\rho_N (B + P_s)} \frac{T}{273}} P_v$$

Concentração Corrigida O2 ref.	mg/Nm³	0
Taxa de Emissão	Kg/h	0,00

Figura 28 - Planilha de aquisição de dados ER1 “Dados de Campo”.



Figura 29 - Preparação da sonda e boquilha.

3.5.2 Recuperação e Manuseio da Amostra

- a) Após o término da coleta, deve-se remover a sonda do interior do duto, aguardar o conjunto esfriar, e proceder à limpeza externa da sonda e boquilha.
- b) Retirar a boquilha da sonda, acondicionar na maleta apropriada, tendo o cuidado para não danificar o filtro no manuseio e no transporte até o laboratório.
- c) No laboratório proceder à pesagem do conjunto boquilha e filtro após a secagem na estufa e resfriamento em dissecador, conforme item 3.4.1.
- d) Depois de obtida a massa da amostra, digitar a diferença desta antes e depois da coleta na planilha “Dados Gerais”. O programa calculará automaticamente todas as medidas para caracterização do ponto amostrado, concentração de MP e a Taxa de Emissão.

3.5.3 Representatividade da Amostra

É necessário que a amostragem seja representativa das condições de operação da fonte emissora. Deve-se, então, efetuar pelo menos duas determinações de MP por fonte. A amostragem deve ser considerada representativa se os resultados obtidos em cada coleta não forem discrepantes entre si.

3.6 EQUAÇÕES APLICADAS NO EQUIPAMENTO ER1

Os procedimentos de cálculos utilizados no equipamento ER1 estão apresentados nas equações listadas na seqüência, utilizando a mesma ordem seguida na norma NBR 12827/1993, item 6.1 [45, 46, 47].

Algumas equações presentes na norma citada não são diretamente aplicáveis no ER1, devido à utilização de novas tecnologias no processo, entretanto, todos os princípios físicos utilizados no ER1 são os mesmos envolvidos na obtenção das equações constantes na norma NBR 12827/1993. As diferenças estão na forma de realizar certas medidas e cálculos e, não, nos princípios físicos envolvidos no método de determinação da concentração de MP coletado isocineticamente.

3.6.1 Pressão Absoluta

A fórmula para o cálculo da pressão absoluta, P, está apresentada na Equação 2.

$$P = B + P_s \quad (2)$$

Onde:

B = pressão barométrica; e

P_S = pressão estática na chaminé.

A pressão barométrica e a pressão estática na chaminé são medidas e devem ser fornecidas como dados de entrada na planilha de cálculos do ER1.

3.6.2 Volume de gás seco

Pelos itens 6.1.2, 6.1.3 e 6.1.4, da NBR 12827/93, calcula-se o volume de gás (seco) no gasômetro nas condições da chaminé. No ER1, a determinação desse volume é feita por intermédio do valor de vazão dos gases secos (após o condensador e a sílica gel) fornecido pelo fluxímetro digital, fornecendo dados em tempo real, multiplicado pelos intervalos de tempo de coleta da amostra de gases.

3.6.3 Umidade dos gases

No ER1, o teor volumétrico de umidade dos gases é calculado pela Equação 3, apresentada em curso ministrado pelo Prof. Dr. Andréas F. Grauer [48].

$$VU = \frac{611,213}{B} \exp\left(\frac{17,5043 \text{ TBU}}{241,2 + \text{TBU}}\right) - 0,06653 (\text{TBS} - \text{TBU}) \quad (3)$$

Onde:

- VU = Teor volumétrico de umidade dos gases [%];
- B = Pressão barométrica [mbar];
- TBS = Temperatura de bulbo seco [°C]; e
- TBU = Temperatura de bulbo úmido [°C].

As temperaturas de bulbo seco e úmido são medidas pelo termopar, tipo K, instalado na ponta da sonda coletora, fazendo a leitura no ponto de coleta da amostra. Para a medição da TBU a ponta do termopar é imersa em algodão umidificado.

3.6.4 Massa Molecular

No ER1 a massa específica (densidade) dos gases úmidos é calculada para ser usada na equação da velocidade. O cálculo da massa específica é feito pela composição química dos gases, considerados como O₂, CO₂, N₂ e H₂O. O teor volumétrico de O₂ é medido pelo princípio de células eletroquímicas, e o teor volumétrico do CO₂ é calculado a partir dos dados de combustão fornecidos diretamente pelo analisador de gases. O teor volumétrico do vapor de água, VU é calculado conforme o item 3.5.3. O teor de N₂ é o restante para completar 100%.

3.6.5 Velocidade dos Gases

O ER1 utiliza o princípio da equação geral dos tubos de Pitot. Na dedução mostrada na Equação 4, às constantes que aparecem são as necessárias para a conversão das unidades adotadas na norma [49].

$$v = 1,4142 S \sqrt{\frac{101,3 \cdot 10^3}{\rho_N (B + P_s)} \frac{T}{273} P_v} \quad (4)$$

Onde:

- v = velocidade dos gases;
- S = fator de correção do tubo PITOT;

- T = Temperatura do duto;
- ρ = Densidade dos gases;
- B = Pressão barométrica;
- Ps = Pressão estática; e
- Pv = Pressão dinâmica de velocidade.

3.6.6 Cálculo da Isocinética

No item 6.1.9 da norma referenciada é calculada a equação isocinética, considerando a presença de umidade no gás quando este passa pela boquilha de coleta. Isso também é feito no ER1. Para o cálculo da velocidade na boquilha, a vazão de gases secos fornecida pelo fluxímetro do equipamento ER1 já é dada na condição normal de temperatura e pressão (CNTP) e corrigida para a base úmida, em função do teor de umidade VU dos gases e, então, dividida pela área da boquilha. Assim a equação da isocinética resulta, Equação 5.

$$\% isoc = \frac{v_b}{v_c} 100 = \frac{\left(\frac{Q_b}{A_b}\right)}{\left(\frac{Q_c}{A_c}\right)} 100 = \frac{\frac{Q_F}{A_b \left(1 - \frac{VU}{100}\right)}}{\left(\frac{Q_c}{A_c}\right)} 100 = \frac{Q_F A_c}{Q_c A_b \left(1 - \frac{VU}{100}\right)} 100 \quad (5)$$

% isoc = isocinética percentual [%];

v_b = velocidade do gás na boquilha;

v_c = velocidade do gás na chaminé;

Q_b = vazão da amostra na boquilha (CNTP, base úmida);

Q_c = vazão do gás na chaminé (CNTP, base úmida);

Q_F = vazão da amostra medida no fluxímetro digital (CNTP, base seca);

VU = teor volumétrico de umidade nos gases [%];

A_b = área da boquilha; e

A_c = área da chaminé.

3.6.7 Vazões nas Condições da Chaminé ou Duto

O volume de gases coletado é calculado integrando-se a vazão da bomba ao longo do tempo de coleta, conforme Equação 6 [50].

$$V_C = \int_0^{T_{coleta}} Q_b dt \quad (6)$$

Onde:

- V_C = volume coletado (base úmida); e
- Q_b = vazão da bomba [LPM] ^[1].

A correção do volume coletado para as CNTP pode ser obtida por intermédio da Equação 7.

$$V_{CN} = V_C \frac{T}{T_N} \frac{P_N}{P} \quad (7)$$

Onde:

- V_{CN} = volume coletado (base úmida) nas CNTP;
- V_C = volume coletado em base seca;
- T = temperatura dos gases;
- T_N = temperatura normal;
- P = pressão atmosférica.

¹ LPM = litro por minuto.

Também, se faz necessária a correção da base úmida (de coleta) para a base seca (índice BS). Essa correção é calculada pela Equação 8.

$$V_{CNBS} = V_{CN} (100 - VU) \quad (8)$$

Onde:

- V_{CNBS} = volume coletado (base seca) nas CNTP [litro];
- V_{CN} = Volume coletado nas condições normal base úmida; e,
- VU = teor volumétrico de umidade [%].

3.6.8 Concentração de MP

A concentração é obtida a partir da medição da massa de particulado coletada no filtro e do volume coletado. Assim, tem-se, pela Equação 9.

$$C_N = 1000 \frac{m}{V_{CN}} \quad (9)$$

Onde:

- C_N = concentração de particulados nas CNTP (base úmida) [mg/Nm³]^[2]
- M = massa de particulados no filtro [mg]
- V_{CN} = volume coletado nas CNTP [litro]

A correção para a base seca é dada pela Equação 10.

$$C_{NBS} = C_N \frac{100}{(100 - VU)} \quad (10)$$

² N refere-se às CNTP 0 °C e 1013 mBar

Onde:

- C_{NBS} = Concentração Normal Base Seca;
- C_N = concentração de particulados nas CNTP (base seca) [mg/Nm³];
- VU = teor volumétrico de umidade [%].

3.6.9 Taxa de Emissão

A taxa de emissão de MP é realizada pela Eq. 11, onde a vazão de gás na chaminé é devidamente corrigida para as CNTP e base seca.

$$T_e = Q_c C_c = Q_{NBS} C_{NBS} = Q_c \frac{T_N}{T} \frac{P}{P_N} C_{NBS} = v A_c \frac{T_N}{T} \frac{P}{P_N} C_{NBS} \quad (11)$$

Onde:

- T_e = taxa de emissão de MP;
- Q = vazão na chaminé;
- C = concentração de MP;
- v = velocidade na chaminé;
- T = temperatura na condição normal;
- P = pressão na condição normal;
- T e P = temperatura e pressão dos gases;
- A_c = área da chaminé; e

- Índices: c = condições na chaminé, N= CNTP , NBS= CNTP e base seca

3.7 DESCRIÇÃO DA MEDIDA E PARÂMETROS PARA COMPARAÇÃO ESTATÍSTICA DE COLETA DE MP E VALIDAÇÃO DO ER1

Para validação dos resultados realizados pela coleta com o equipamento ER1 foram realizadas coletas simultâneas com o equipamento coletor isocinético de referência, certificado para uso e o equipamento ER1. Nas Figuras 25, 26, 27 e 28 encontram-se apresentados os detalhes da coleta com a equipe de campo que operam os equipamentos. O equipamento de referência utilizado nesta amostragem comparativa pertence ao SENAI – CIC, sob o número de patrimônio 1038693. Este equipamento tem como objetivo determinar a concentração de MP de efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias, utilizando linha de coleta e filtro aquecido, sendo o filtro externo ao duto. Este método utiliza os preceitos da norma ABNT NBR 12019/1990 e seus documentos complementares. A metodologia também se baseia na coleta de MP, de forma isocinética, ponto a ponto, em dutos e chaminés de fontes estacionárias. A massa armazenada no sistema filtrante é medida, gravimetricamente fora do sistema de medida ou “out line”, em balança analítica, sendo relacionada com o volume do fluxo gasoso coletado medido com o tempo.



Figura 30 - Amostragem com o Equipamento ER1



Figura 31 - Detalhes da montagem do sistema de coleta



Figura 32 - Detalhe das sondas de coleta



Figura 33 - Imagem do equipamento de referência

Descrição do ensaio

A intercomparação foi realizada em condições ambientais com temperatura de 25 °C e umidade relativa de 60%. Para a realização da coleta simultânea, foi utilizada uma chaminé de caldeira pertencente a Cooperativa

Agrária S.A, localizada no estado do Paraná. Essa caldeira tem capacidade nominal de produção de vapor de 20 t/h e potência térmica nominal de 19,2 MW e utiliza lenha como combustível. As coletas ocorreram de forma simultânea onde os equipamentos foram instalados em furos perpendiculares, seguindo a mesma metodologia para a determinação dos pontos de coleta, ABNT NBR 10.701 [43]. Os dados preliminares utilizados, extra-equipamentos, foram os mesmos e estão relacionados na seqüência:

- a) área da seção transversal = 0,985 m²;
- b) pressão atmosférica = 985,7 mBar;
- c) temperatura ambiente = 23 °C;
- d) concentração de CO₂ = 9,2 %;
- e) número de pontos = 12; e,
- f) tempo de coleta = 60 min.

Para a determinação da umidade dos gases pelo ER1 foi utilizada a metodologia pela determinação das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido descrita anteriormente. O equipamento utilizado como referência determina a umidade dos gases pela diferença de massa entre os tubos de sílica gel antes e após a coleta. Esta diferença é considerada a quantidade de água contida nos gases de combustão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 O equipamento ER1

O diferencial tecnológico do sistema desenvolvido, se comparado com as tecnologias disponíveis no mercado é um novo “design”, mais compacto, de grande precisão analítica, por utilizar sensores de última geração para as medidas de pressão, vazão e temperatura. Todos os parâmetros medidos são integrados em um banco de dados, desenvolvido exclusivamente para o equipamento, gerando 2,5 leituras por segundo para cada parâmetro. Estes dados são tratados em tempo real e o sistema gera relatórios, apresentando ao operador se a coleta isocinética está sendo realizada dentro dos limites das normas referenciadas. Após o término de cada coleta o sistema emite o relatório final. Todas as inovações desenvolvidas para o equipamento ER1 permitem uma fácil adaptação aos ambientes de medida, proporcionando rápida adequação para atender a novos interesses metodológicos.

Pelas inovações propostas foi solicitado junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial, INPI, registro de depósito de patente em 29 de Janeiro de 2008, sob número PI0704836-0 A2. A publicação do pedido de patente foi realizada em 29 de Julho de 2009 e está disponível para consulta.

4.2 Testes de validação do ER1

Na Tabela 1, estão apresentados os resultados obtidos na amostragem comparativa entre os equipamentos ER1 e o de referência. Pelos dados obtidos podemos verificar que o ER1 apresentou resultados próximos aos do equipamento de referência, que é um equipamento em uso no Brasil há muito

tempo. A vantagem do sistema ER1 em relação ao de referência é seu processo automatizado de aquisição de dados, tornando as médias muito mais precisas se comparada ao sistema manual empregado no equipamento de referência. Podemos observar no valor da % isocinética uma variação de 12%, a justificativa é que como o ER1 apresenta os valores da coleta “on line”, diferente do equipamento utilizado para a comparação, que os dados são calculados posteriormente, as correções podem ser feitas em tempo real, validando a medida no término da coleta. No equipamento de referência caso a medida fosse acima dos 10 % a coleta deveria ser descartada.

Tabela 1 - Resultados da amostragem comparativa entre o equipamento de Referência e o ER1

Parâmetros	Referência	ER1	Desvio ** Ref/ER1 (%)
MPT * (mg/Nm ³)	292	295	-1
Temp. do Gás (°C)	147,4	154,4	-5
Umid. do Gás (%)	8,5	9,1	-7
Veloc. do Gás (m/s)	17	16,3	4
Vazão bs (Nm ³ /h)	34.835	32.556	7
Isocinética (%)	109,9	98	12

Notas:

* Valores à base seca (bs) sem correção para o oxigênio de referência.

** Para o cálculo da % do desvio considerou-se os resultados do equipamento de referência como verdadeiro.

4.3 Incerteza das Medidas

Para o levantamento dos cálculos das incertezas relacionadas às medidas [51] [52] foram utilizados os certificados de calibração dos equipamentos ER1 e o de Referência, e os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Incertezas relacionadas às medidas ER1 e Referência

Parâmetros	Incertezas	
	Incertezas ER1 (%)	Referência (%)
Vazão da Bomba	1,5	2,0
Temperatura do Duto	1,5	1,5
Fator do Tubo Pitot	3,0	1,2
Pressão Diferencial de Velocidade	1,5	1,5
Boquilhas	0,5	0,5
Pressão da Placa de Orifício		2,0
Temperatura do Gasômetro		1,5
Incerteza Expandida (IE)	8,0	8,1

A incerteza expandida relatada, Equação 12, é baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência, $K=2$, correspondendo a um nível de confiança de 95% [53, 54].

$$IE = K \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 \dots + I_n^2} \quad (12)$$

4.4 Limite de repetitividade

Para a avaliação dos limites de repetitividade do equipamento ER1, foram realizadas seis amostragens consecutivas em uma caldeira que queima biomassa para a produção de vapor e os resultados da concentração de MP estão apresentados na Tabela 3.

Os dados estatísticos apresentados na Tabela 4 validaram a metodologia. Deve ser considerado que as caldeiras que queimam biomassa apresentam grande instabilidade, apresentando variações repentinas e freqüentes na combustão, mas, mesmo com estas variações, o equipamento se mostrou eficiente. Estes valores demonstram que o sistema de amostragem isocinética para coleta de MP em dutos e chaminés de fontes estacionárias pelo ER1, atendeu ao preconizado nas Resoluções ambientais vigentes no país.

Tabela 3 - Valores Obtidos nas amostragens

Número da Análise	Concentração MP (mg/Nm³)
1	215
2	197
3	182
4	163
5	218
6	195

Tabela 4 - Resultados estatísticos das medidas, Tabela 3

Média, m_r	195	mg/Nm ³ (base seca)
S_r	21	mg/Nm ³ (base seca)
CV	10	%
r	57	mg/Nm ³ (base seca)
$r_{(CV)}$	30	%
$U_{95\%}$	20	mg/Nm ³ (base seca)
n_r	6	---
GL	5	---
t	2,3	---

Sendo: m_r = média dos resultados em condições de repetitividade; S_r = desvio padrão em condições de repetitividade; **CV** = coeficiente de variação ou desvio padrão relativo; r = limite de repetitividade para um nível de confiança de 95%; $r_{(CV)}$ = Limite de repetitividade (r) em função de CV; $U_{95\%}$ = incerteza expandida para um nível de confiança de 95%; n_r = número de repetições em condições de repetitividade; **GL** = número de graus de liberdade ($n-1$); t = valor do t de Student.

4.5 Sensibilidade

Para avaliar a sensibilidade da metodologia proposta foram realizadas três medidas em uma caldeira que utiliza óleo combustível para a geração de vapor. Estas caldeiras, em geral, são as mais eficientes e tendem há emitir muito pouco MP. Os resultados estão apresentados na Tabela 5 e, na Tabela 6, estão apresentadas as avaliações estatísticas das três coletas realizadas.

Tabela 5 - Valores obtidos nas amostragens

Número da Análise	Concentração MP (mg/Nm ³)
1	50
2	58
3	48

Tabela 6 - Resultados estatísticos das medidas

Média, m_r	52	mg/Nm ³ (base seca)
s_r	6	mg/Nm ³ (base seca)
CV	10	%
r	15	mg/Nm ³ (base seca)
$r_{(CV)}$	28	%
n_r	3	-x-
GL	2	-x-

Sendo: m_r = média dos resultados em condições de repetitividade; s_r = desvio padrão em condições de repetitividade; CV = coeficiente de variação ou desvio padrão relativo; r = limite de repetitividade para um nível de confiança de 95%; $r_{(CV)}$ = Limite de repetitividade (r) em função de CV; n_r = número de repetições em condições de repetitividade; GL = número de graus de liberdade ($n-1$).

A legislação que determina o limite de emissões atmosférica no estado do Paraná, SEMA 054/2006, apresenta as metodologias que devem ser

seguidas para cada parâmetro a ser determinado. No que se refere à coleta e análise de MP as normas sugeridas na legislação são a ABNT NBR 12.827/1993 e ABNT NBR 12.019 ou metodologia equivalente desde que aprovada pelo órgão ambiental. No caso do estado do Paraná, devido ao ER1 ser um equipamento novo no mercado, o Instituto Ambiental do Paraná (IAP) exigiu que a metodologia aplicada no equipamento seguisse os preceitos da NBR 12.827/1993 e que seu desempenho fosse avaliado por outro órgão oficial independente. Após todos os trâmites legais, a presente solicitação foi encaminhada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná que emitiu um relatório conclusivo das medidas. Tal documento foi protocolado junto ao IAP, que após avaliação criteriosa do documento, emitiu parecer favorável à metodologia empregada e desenvolvida com o ER1 em ofício de número 001/08 DEPAM, como seguinte texto:

“Em atendimento à sua solicitação, feita através do SID 9.765.949-4, informamos que a partir do reconhecimento pela Universidade Federal do Paraná, através de relatório técnico conclusivo, de que o equipamento ER1 atende ao previsto na NBR 12.827/93, Norma oficial prevista na Resolução Sema 054/06, passamos a aceitá-lo como método equivalente.”

4.6 Análise Comparativa entre os Equipamentos

Para podermos comparar os equipamentos citados neste trabalho, e que estão em operação no Brasil, apresentamos na Tabela 7 as características de cada modelo e as suas vantagens e desvantagens na utilização para a análise de MP em Dutos e Chaminés de fontes estacionárias.

Tabela 7 - Características dos Equipamentos em Uso no Brasil

Características	Equipamentos				
	A	B	C	D	ER1
Equipamento	Analógico	Analógico	Digital	Digital	Digital
Procedência	Brasil	Brasil	Alemanha	Alemanha	Brasil
Operacionalidade	Regular	Regular	Bom	Bom	Bom
Sensibilidade	Bom	Bom	Ótimo	Ótimo	Ótimo
Peso	Regular	Regular	Bom	Bom	Ótimo
Portabilidade	Regular	Regular	Bom	Bom	Ótimo
Manutenção	Regular	Regular	Bom	Bom	Ótimo
Tecnologia	Regular	Regular	Ótimo	Bom	Bom
Relatórios	Regular	Regular	Bom	Bom	Bom
Preço	Bom	Bom	Regular	Regular	Ótimo

5. CONCLUSÃO

O equipamento ER1 foi construído dentro de critérios rígidos para atender aos preceitos da norma NBR 12.827/1993, utilizando materiais e sensores com tecnologias atuais e disponíveis no mercado, para as medidas de MP em dutos e tubulações tipo chaminé. Todos os sensores utilizados e peças construídas foram certificados com padrões rastreados pela Rede Brasileira de Calibração, sendo os resultados gerados pelo equipamento garantidos por estes padrões.

Todos os procedimentos de operação, de cálculo da concentração de MP e a sua implementação na planilha incorporada ao software do equipamento ER1 foram avaliados e os conceitos ficaram de acordo com as normas referenciadas.

Foram analisados todos os itens da norma NBR 12827/1993 referentes aos cálculos para a determinação da concentração de MP, sendo constatado que os procedimentos e cálculos utilizados no ER1 são idênticos ou análogos às normas referenciadas.

A partir do trabalho de análise e verificação da aparelhagem, dos procedimentos e do manual de operação utilizados pelo equipamento em questão, concluiu-se que as medições de grandezas e o subsequente cálculo da concentração de MP feitos pelo equipamento ER1, estão em conformidade com o previsto pela norma NBR 12827/1993.

As melhorias tecnológicas aplicadas ao equipamento ER1, se comparado aos equipamentos nacionais, o tornam de fácil operação, gerando resultados rápidos e confiáveis.

Os dados estatísticos que foram apresentados tanto para as incertezas, repetitividade e sensibilidade, demonstraram que a metodologia proposta está de acordo com as normas referenciadas e se encontra entre as metodologias mais avançadas do mercado Brasileiro.

6. TRABALHOS FUTUROS

Para obter melhores resultados na estabilização da sonda um novo formato poderá ser idealizado, sendo todos os componentes, Pitot, termopar e tubo coletor encapsulado no mesmo tubo. Este novo formato viabilizará uma melhor fixação da sonda na parede do duto ou chaminé.

O programa de aquisição de dados foi elaborado em planilha EXCEL, sendo sugerido o estudo de um novo software, dedicado, de forma a permitir rápidos comandos para gerenciamento de algumas funções no equipamento. Este programa poderá viabilizar o controle da isocinética automática não utilizando mais a válvula manual.

É sugerido o desenvolvimento de um sistema de resfriamento do gás de pequeno porte, utilizando sistema Peltier.

Finalmente, observou-se que poderá ser implementada a instalação de sensores de gases para a avaliação de todos os produtos de combustão emitidos por fontes potencialmente poluidoras, o que estará de acordo com os interesses da Engenharia e Ciência dos Materiais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ESMANHOTO ELISEU BR/PR. **Sistema coletor isocinético de material particulado em dutos, chaminés e similares.** G01N 5/04; G01N 15/06. PI0704836-0 A2. 29 Jan. 2008, 28 jul. 2009. Revista da Propriedade Industrial – RPI, Rio de Janeiro, n. 2012, p. 61.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Efluentes gasosos com o sistema filtrante no interior do duto ou chaminé de fontes estacionárias – Determinação de material particulado** - NBR 12.827/1993. Rio de Janeiro, 1993.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação do material particulado - Método de ensaio** - NBR 12.019. Rio de Janeiro, 1990.
- [4] CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.** Resolução n. 382, de 26 de dezembro 2006. 37p.
- [5] PARANÁ - SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. Art. 1^o – **Definir critérios para o Controle da Qualidade do Ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para a proteção da saúde e bem estar da população e melhoria da qualidade de vida.** Resolução n. 054 de 22 de dezembro de 2006. 69 p.
- [6] FRONDIZE, C. A. **Monitoramento da Qualidade do Ar – Teoria e Prática** – Rio de Janeiro 2008.
- [7] GODISH T. **Air Quality**, 4 th Edition 2004.

[8] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA - **Research Priorities for Airborne Particulate Matter. Executive summary of Research Priorities for Airborne Particulate Matter: IV. Continuing Research Progress, National Research Council (2004).** Disponível em <http://books.nap.edu/catalog/10957.html> > Acesso em 15 de janeiro de 2010.

[9] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Methods for Measurement of Filterable PM10 and PM2.5 and Measurement of Condensable Particulate Matter Emissions From Stationary Sources.** EPA 40 CFR Part 51. Março 2009. 44p.

[10] COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Poluentes atmosféricos.** Disponível em http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_saude.asp > Acesso em 20 de Janeiro de 2010.

[11] MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Conpet - Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural.** Edição Especial 15/10/2009. Disponível em www.conpet.gov.br/poluicao/index.php?segmento > Acesso em 30 janeiro de 2010.

[12] COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Histórico da qualidade do ar no Estado.** Disponível em http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_historico.asp > Acesso em 12 de Dezembro, 2009.

[13] CPRH/GTZ – **Amostragem em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias: Manual de Procedimento,** Recife 1999.

[14] CARVALHO JR., J. A., LACAVA, P.T. **Emissões em Processos de Combustão,** ed. UNESP, 2003.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Planejamento de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Procedimento** - NBR 10.700. Rio de Janeiro, 1993.

[16] ENERGÉTICA – **Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos – CIPA** - Método 5, Manual de Operação.

[17] TECNAL – **Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos, Modelo TE – 750**. Catálogo. 1p.

[18] SICK - **Gravimetric Dust Concentration Measuring System – SHC 502**. Operating Manual.

[19] DURAG - **Automatic Sampling Device for Gravimetric Dust Measurements, D-RC 80**. Operating Manual.

[20] H.H. Bruun, **Hot-Wire Anemometry, principles and signal analysis**, Oxford University Press, Oxford, UK, 1995.

[21] TESTO - **Straight Pitot Tubes**. Data Sheet.

[22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação de velocidade e de vazão – Método de ensaio** - NBR 11996. Rio de Janeiro, 1993.

[23] NOVUS, **Transmissor de Temperatura TxRail 0 – 10Vdc**. Manual de Operação.

[24] MINIPA, **Termômetro Digital MT-401A**. Manual de Operação.

[25] DATAQ INSTRUMENTS, **Windaq Acquisition and Playback Software**. Technical data.

[26] DATAQ INSTRUMENTS. **DI-194RS Serial Port Data Acquisition Module**. Technical data.

[27] DATAQ INSTRUMENTS. **DI-148 U, USB Data Acquisition Starter Kit**. Technical data.

[28] FREESCALE SEMICONDUTOR. **Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated PXV5050**, Technical Data.

[29] HONEYWELL, **24PCCFG6G Low Pressure- Flow Through**. Technical data.

[30] FREESCALE SEMICONDUTOR. **MPXV5004**, Technical Data.

[31] MKS INSTRUMENTS, INC. **MKS Type 1359C, Masster-Flo™ Mass Flow Controller**. Operating Manual.

[32] COLE PARMER. **MC Series Gas Flow Controllers**. Operating Manual.

[33] METAL PARTS. Manufaturados de Metal Ltda, **Relatório de Inspeção de Boquilhas, 020/87**. 1p.

[34] SANTIAGO J. **Curso de Excel Avançado**. 2007.

[35] DATAQ INSTRUMENTS. **WinDaq to Excel Real Time Data Acquisition Software**. Technical data.

[36] HONEYWEL. **Mass Flow Versus Volumetric Flow**. Aplication Sheet.

[37] FREESCALE SEMICONDUCTOR. **MPXV 7002 Series**. Technical Data.

[38] TESTO. **Portatle Digital Micromanometer**. Operatin Manual.

- [39] GEHAKA, INDÚSTRIA E COMÉRCIO ELETRO ELETRÔNICA. **Balança Analítica AG-200**, Manual de Operação.
- [40] JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD – JIS. **Vernier, dial and digital calipers – JIS B 7507. Japão, 1993.**
- [41] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. Psychrometric Chart and Plotting Software – Including System Analysis and Design. 1989.
- [42] GARMIN. **eTrex Vista^R Cx**. Data Sheet.
- [43] TELEGAN. **Tempest 100 – Analizador de Gases de Combustão**. Manual de Operação – Confor - Instrumentos de Medição Ltda.
- [44] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Determinação de pontos de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Procedimento** - NBR 10.701. Rio de Janeiro, 1993.
- [45] SOUDERS, M. **Caderno do Engenheiro**, Editora Hemus, 1980.
- [46] DALLY, J.W., RILEY, W.F., MCCONNELL, K.G. **Instrumentation for Engineering Measurements**. John Wiley & Sons, 1993.
- [47] MARTINS N. **Manual de Medição de Vazão**, Editora Interciência, 1998.
- [48] FRIEDRICH G. A. **Curso Medição de Poluentes Atmosféricos**, 2007.
- [49] TORREIRA, RAUL P. **Geradores de Vapor**. Ed. Libris, S. Paulo, 1995.
- [50] DELMÉE, GÉRARD J. **Manual de Medição de Vazão**. Ed. Edgard Blücher Ltda, 2003.

[51] GUM - **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição. Terceira edição brasileira - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement** - Edição revisada - agosto 2003.

[52] RIBANI, M. **Validação de Métodos Analíticos**. Paraná Metrologia, 2008.

[53] GUIA EURACHEM / CITAC - **Determinando a Incerteza na Medição Analítica**. Primeira edição brasileira - Segunda edição - 2002.

[54] VIM - **Vocabulário Internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia** - 2^a edição brasileira - 2000.