



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA



**USO DE FILTRO DE MANGAS PARA TRATAMENTO DE GASES
RESULTANTES DA COMBUSTÃO DE BAGAÇO DE CANA**

MARCELO GARCIA BARBOSA

BAURU - SP
2014



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA



USO DE FILTRO DE MANGAS PARA TRATAMENTO DE GASES RESULTANTES DA COMBUSTÃO DE BAGAÇO DE CANA

MARCELO GARCIA BARBOSA

Orientador: Prof. Dr. Celso Luiz da Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

BAURU - SP
2014

Barbosa, Marcelo Garcia.

Uso de filtro de mangas para tratamento de gases
resultantes da combustão de bagaço de cana / Marcelo
Garcia Barbosa, 2014
90 f.

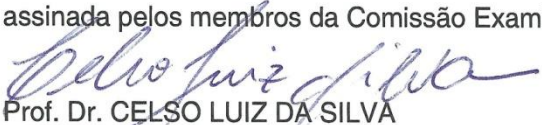
Orientador: Prof. Dr. Celso Luiz da Silva

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014

1. Filtros de mangas. 2. Eficiência de filtração.
3. Tratamento de gases. I. Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru. II.
Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARCELO GARCIA BARBOSA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 06 dias do mês de fevereiro do ano de 2014, às 14:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. CELSO LUIZ DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. GERALDO LUIZ PALMA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO SIMÕES MOREIRA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Escola Politécnica Da Usp, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARCELO GARCIA BARBOSA, intitulado "TRATAMENTO DE GASES RESULTANTES DA COMBUSTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: _ _ _ APROVADO _ _ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. CELSO LUIZ DA SILVA


Prof. Dr. GERALDO LUIZ PALMA


Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO SIMÕES MOREIRA

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO
ALUNO: **MARCELO GARCIA BARBOSA**

DE: "TRATAMETNTO DE GASES RESULTANTES DA COMBUSTÃO DE REDÍSUIOS
SÓLIDOS"

PARA:

Uso de Filtro de Mangas para Tratamento
de Gases Resultantes da Combustão de Bagaco
de CANA.

Bauru, 06 de fevereiro de 2014.



Prof. Dr. Celso Luiz da Silva

Orientador

"Um passo a frente e você já não está mais no mesmo lugar."
(Chico Science)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Miguel de Oliveira Barbosa e Maria Francisca Iglesias Garcia Barbosa, agradeço profundamente, de forma tal que poucas palavras me veem a cabeça a não ser o corriqueiro obrigado, pois tantas foram as situações inóspitas, que seria até compreensível a falta de valores como lealdade, compreensão, paciência, dignidade e respeito em minha criação, mas não faltaram em grande maioria pela presença firme de minha mãe.

Aos professores da pós-graduação pelo contínuo esforço em ampliar meus horizontes através do conhecimento e companheirismo, em especial ao Professor Dr. Celso Luiz, por todo o apoio, paciência e dedicação em todos os momentos.

Agradeço também a minha esposa Andressa pelas horas de companheirismo enquanto eu ficava sentado à frente do computador, pelo amor dedicado e empenho em sempre me motivar mesmo nos momentos em que o propósito parecia distante, provando a cada instante que fiz a escolha correta para minha vida, e, finalmente, à Tersel, por acreditar no meu desenvolvimento profissional e prover o investimento financeiro necessário, com o perfil de sempre buscar o conhecimento de novas tecnologias.

RESUMO

Com o advento de normas e restrições cada vez mais rígidas por parte dos órgãos ambientais, em virtude da crescente preocupação com as modificações climáticas recentes geradas pela contínua descarga de emissões poluentes na atmosfera, torna-se essencial a implantação de equipamentos que amortizem ou eliminem esses resíduos. Por se tratar fundamentalmente de uma questão de saúde pública, atualmente a implantação de qualquer planta industrial que possa gerar impacto ambiental, ou até mesmo adequação de equipamentos já instalados para a não geração de poluentes ou geração dentro de limites adequados, passa cada vez mais por fiscalização rigorosa dos órgãos ambientais. Para este estudo, foi implantado um sistema de tratamento de gases pós-caldeira de queima de resíduos sólidos (bagaço de cana). Os gases oriundos do processo são transportados através de duto passando pelo precipitador do tipo ciclone e coletor do tipo filtro de mangas. O comportamento dos gases e filtro de mangas foi monitorado constantemente para coleta de dados através de termopares e transmissor de pressão, sendo ao final do período de operação feita a análise da composição dos gases antes e após filtro de mangas, além da análise do elemento filtrante. Os resultados das análises de NO_x e material particulado, demonstrando eficiência de filtração acima de 99% como esperado juntamente com os dados de temperatura e pressão em níveis pertinentes a um sistema de tratamento de gases com coletor tipo filtro de mangas, corroboram o que se queria demonstrar com este estudo, que é a possibilidade do uso de filtros de tecido para tratamento de gases oriundos da combustão de resíduos sólidos.

PALAVRAS-CHAVE: Filtros de mangas, eficiência de filtração, tratamento de gases.

ABSTRACT

With the advent of standards and increasingly stringent restrictions by environmental agencies, due to the increasing concern about the recent climate changes generated by the continuous discharge of pollutants emitted into the atmosphere, it becomes essential that the deployment of equipment or disposal of such reduce residues. Because it is fundamentally a public health issue, currently the implementation of any industrial plant that can generate environmental impact, or even fitness equipment already installed for the non-generation of pollutants or generation within appropriate limits, is increasingly on strict enforcement of the environmental agency. For this study, we implemented a system of post-treatment gas from a boiler burning solid waste. The gases from the process are transported by pipeline passing through the cyclone and the bag filter. The behavior of the gases and the bag filter were constantly monitored to collect data using thermosensors and pressure transmitters, and at the end of the operation it was made the analysis of the gas composition before and after the bag filter, besides the analysis filter element. The results of the analysis of NO_x and particulate matter, demonstrating high filtration efficiency above 99% as expected along with the data of temperature and pressure at levels relevant to a gas treatment system with a bag filter collector type, corroborate what was expected from this study demonstrate that it is possible to use fabric filters for treating gases from the combustion of solid waste.

KEY-WORDS: Bag filter, filtration efficiency, gas treatment.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABELAS	3
NOMENCLATURA	4
LISTA DE ABREVIATURAS.....	5
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	6
1.1 Objetivos	7
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 Combustão de resíduos sólidos.....	9
2.2 Teoria da filtração	11
2.3 Tipos de coletores.....	14
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....	41
3.1 Descrição dos equipamentos e circuito dos gases do sistema de exaustão e filtragem	41
3.2 Modo de operação e coleta de dados.....	45
3.3 Metodologia de obtenção dos resultados e tratamento dos dados ..	47
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1 Resultados de temperatura e pressão	52
4.2 Níveis de eficiência alcançados	53
4.3 Análise do elemento filtrante.....	58
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES e RECOMENDAÇÕES	60
REFERÊNCIAS.....	62
ANEXOS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração de filtração em profundidade	12
Figura 2: Câmara de spray.....	16
Figura 3: Secador spray.....	17
Figura 4: Lavador tipo Venturi.....	18
Figura 5: Precipitador eletrostático.....	19
Figura 6: Princípio de funcionamento do precipitador eletrostático.....	19
Figura 7: Filtro de Mangas.....	20
Figura 8: Tipos básicos de filtros disponíveis.....	21
Figura 9: Gaiola com venturi em procedimento de instalação.....	23
Figura 10: Manga filtrante com anel de aço mola em procedimento de instalação.....	23
Figura 11: Danos no tubo ejetor.....	25
Figura 12: Danos no elemento filtrante.....	25
Figura 13: Resultados experimentais da medição da deflexão do disparo de ar comprimido	26
Figura 14: Resultados da simulação para medição da deflexão do disparo de ar.....	26
Figura 15: Fluxo do pulso em operação normal.....	27
Figura 16: Fluxo do pulso em operação com deflexão.....	27
Figura 17: Princípio de funcionamento do venturi em operação normal do filtro	28
Figura 18: Princípio de funcionamento do venturi durante o disparo do jato de limpeza.....	28
Figura 19: Modelo estrutural do venturi protetor.....	29
Figura 20: Efeito do venturi no fluxo de gases com o filtro em operação.	30

Figura 21: Efeito do venturi no fluxo de gases durante o jato de limpeza relativo a cota L.....	30
Figura 22: Efeito do venturi no fluxo durante o jato de limpeza relativo a cota H.....	31
Figura 23: Efeito do venturi no fluxo durante o jato de limpeza relativo a ângulo α	31
Figura 24: Eficiência de coleta.....	33
Figura 25: Equipamento de leitura óptica para aferição das espessuras da torta.....	36
Figura 26: Comparação da queda de pressão para diferentes condições operacionais	37
Figura 27: Espessura média da torta para diferentes condições operacionais.....	37
Figura 28: Densidade e resistência específica média da torta para dois valores de velocidade.....	38
Figura 29: Fluxograma do sistema de tratamento de gases.....	42
Figura 30: Vista geral dos equipamentos utilizados no experimento.....	43
Figura 31: Esquema de utilização do coletor isocinético.....	46
Figura 32: Elemento filtrante alvo dos testes.....	51
Figura 33: Dados coletados de pressão e temperatura.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela1:Tecnologias para a redução das emissões provenientes da incineração de RSU.....	16
Tabela 2: Velocidades de filtragem recomendadas.....	33
Tabela 3: Propriedades da manga com feltro de poliamida e polifenilsulfido....	35
Tabela 4: Perda de carga em equipamentos de controle.....	39
Tabela 5: Comparativo entre lavador de gases e filtro de mangas.....	40
Tabela 6: Características do filtro de mangas Dinaflux 8x7-30.....	44
Tabela 7: Método de medições de efluentes.....	47
Tabela 8: Método de coleta do elemento filtrante.....	47
Tabela 9: Análise dos gases e material coletado na entrada do filtro de mangas.....	54
Tabela 10: Análise de óxidos de nitrogênio na entrada do filtro de mangas.....	55
Tabela 11: Análise dos gases e material coletado na saída do filtro de mangas.....	55
Tabela 12: Análise de óxidos de nitrogênio na saída do filtro de mangas.....	55
Tabela 13: Eficiência do filtro de mangas para material particulado.....	57
Tabela 14: Eficiência do filtro de mangas para óxidos de nitrogênio.....	57
Tabela 15: Resultados das análises dos elementos filtrantes (parte 1).....	58
Tabela 16: Resultados das análises dos elementos filtrantes (parte 2).....	58

NOMENCLATURA

ΔP	Diferencial de Pressão [mmCA]
P	Pressão Pontual [mmCA]
C	Carbono
H	Hidrogênio
O	Oxigênio
N	Nitrogênio
T	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
SO _x	Óxidos de Enxofre
v	Velocidade [m/s]
CO _x	Óxidos de Carbono
n	Quantidade de Dados Coletados
ΔP_m	Média dos Diferenciais de Pressão [mmCA]
T_m	Média das Temperaturas [$^{\circ}\text{C}$]
daN	decaNewton

LISTA DE ABREVIATURAS

CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
RSU	Resíduo Sólido Urbano
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
C.L.P.	Controlador Lógico Programável

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A importância do ar para o homem é indiscutível, principalmente sob o aspecto da necessidade de oxigênio para o metabolismo. Por outro lado, a movimentação de ar natural através dos ventos é um dos fatores responsáveis pelas mudanças de temperatura e umidade determinando o clima da região juntamente com a irradiação solar.

É possível no dia-a-dia vivenciar e presenciar a movimentação de massas de ar, contemplando-se os mecanismos da natureza para manutenção e adequação da temperatura, umidade, e demais fatores que influenciam os macro e micro climas que nos cercam. Baseando-se neste mecanismo natural, o homem desenvolveu toda a base da tecnologia utilizada no objeto principal que norteia este estudo.

A movimentação do ar por meios não naturais (mecânicos) constitui-se no principal objetivo dos equipamentos de ventilação (desempoeiramento), ar condicionado para resfriamento e/ou aquecimento. O movimento do ar também proporciona o transporte de materiais permitindo a separação em equipamentos adequadamente projetados.

A ventilação industrial tem sido e continua sendo a principal medida de controle efetiva para ambientes de trabalho com presença de gases prejudiciais ao ser humano. No campo da higiene do trabalho, a ventilação tem a finalidade de evitar a dispersão de contaminantes no ambiente industrial, bem como diluir concentrações de gases, vapores e promover conforto térmico ao homem. Assim sendo, a ventilação é um método para se evitar doenças profissionais oriundas da concentração de pó em suspensão no ar, gases tóxicos ou venenosos, vapores, etc.

O advento da revolução industrial iniciada na Inglaterra na segunda metade do século XVIII, caracterizada pela passagem da manufatura para a indústria mecânica, pelo surgimento de novos modos produtivos assim como da indústria pesada do aço e construção de máquinas, trouxe a clara necessidade de uma nova força motriz para as máquinas produtivas, aplicada através do uso da energia térmica do vapor em forma mecânica.

Esse novo modo produtivo e necessidades surgidas nas indústrias acarretaram e acarretam até os dias atuais além dos óbvios benefícios claros aos olhos do desenvolvimento tecnológico e social, uma nova demanda surgida perante o descarte dos também novos resíduos gerados, seja de efluentes sólidos, líquidos ou gasosos. Alguns dos avanços e características do braço da ciência que se desenvolveu a partir desta demanda do descarte de efluentes gasosos serão abordados neste estudo.

O crescente e contínuo desenvolvimento tecnológico, populacional e industrial e seus consequentes impactos no meio ambiente, tornam o tema política ambiental cada dia mais corriqueiro. Os maiores volumes de emissões de efluentes atuais, que se encontram em curva de crescimento, contrapondo os limites de emissões mais e mais rígidos, norteiam uma dependência cada vez mais ampla dos equipamentos de exaustão e filtragem.

Para este estudo, foi implantado um sistema de tratamento de gases pós-caldeira de queima de resíduos sólidos (bagaço de cana), em que durante o período de testes foi observado uma série de fatores e dados que serão explanados mais adiante.

1.1 Objetivos

O equipamento objeto alvo do estudo desenvolvido foi instalado em uma planta de produção de álcool e açúcar localizada em Olímpia, interior do estado de São Paulo. A implantação do sistema de tratamento de gases ocorreu desviando-se parte do fluxo total de gases na saída da caldeira, e teve caráter experimental com realização de medições para os parâmetros de temperatura, pressão e composição de gases. Com o intuito de apontar um novo tipo de solução de menor perda de pressão para realização da filtração dos gases do processo, cujo tratamento dos gases originalmente na planta é feito através de um lavador de gases, pretendeu-se o que segue:

- Verificar o perfil de operação com baixa pressão diferencial do coletor tipo filtro de mangas, com níveis de eficiência de filtração que atendam a legislação ambiental;

- Analisar se as temperaturas do processo e composição dos gases são compatíveis ao elemento filtrante utilizado no equipamento;
- Analisar a utilização da gaiola de sustentação com Venturi e seu papel na composição do equipamento;
- Verificar os valores de velocidade de ascensão e de velocidade de filtração utilizadas no filtro de mangas;
- Estabelecer comparativo entre o sistema de filtração a seco e o sistema de filtração úmido comumente utilizado;

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Combustão de resíduos sólidos

O tratamento térmico dos resíduos sólidos apresenta-se como uma solução muito interessante, e em alguns casos necessária, na medida em que pode transformar a matéria indesejável que o homem produz noutras formas de substâncias sólidas, líquidas e gasosas comumente encontradas na natureza. Tais dispositivos operam de acordo com as clássicas leis da Termodinâmica, da Transferência de Calor e Massa e da Mecânica dos Fluidos, sendo que a aplicação adequada de tais conhecimentos estabelecem os resultados característicos do processo (Silva, 1998).

Por outro lado, o tratamento de resíduos sólidos perigosos está regulamentado por portarias e resoluções do governo federal, e também de âmbito Estadual, as quais sugerem que o mesmo pode ser realizado através do processo de incineração.

Teoricamente, considerando-se o processo de combustão como a oxidação total dos elementos combustíveis contidos na massa objeto da queima, dependendo logicamente da composição elementar da biomassa, os efluentes gerados deveriam se limitar a CO_2 , vapor de água e cinzas. Infelizmente, o que se mostra na prática é que os outros produtos gerados são inevitáveis, todos resultantes da combustão incompleta dos elementos.

Entre os fatores que influenciam para que uma combustão seja incompleta destacam-se:

- Misturas insuficientes de biomassa e ar;
- Falta ou excesso de ar;
- Baixas temperaturas de combustão;

Os subprodutos indesejados que habitualmente mais vigoram entre os subprodutos gerados são:

- ✓ Cloro e Bromo;
- ✓ Ácido Clorídrico;
- ✓ SO_x;
- ✓ NO_x;
- ✓ Ácido Fluorídrico;
- ✓ Ácido Bromídrico;
- ✓ Combustível não queimado;
- ✓ Metais, óxidos minerais e sais, presentes nas cinzas;
- ✓ Grupos Benzeno;
- ✓ Carbono e Monóxido de Carbono;
- ✓ Dioxinas e Furanos;

Entre os subprodutos citados acima, destacam-se as dioxinas e furanos pela sua extrema toxicidade. Como relata Sicari,(2003), tratam-se de duas classes de compostos aromáticos tricíclicos, de função éter, onde os átomos de cloro se ligam aos anéis benzênicos possibilitando a formação de 210 compostos altamente tóxicos de hidrocarbonetos.

As dibenzenos-para-dioxinas policloradas (PCCD) e os dibenzofuranos policlorados (PCDF) são duas séries de compostos com ligações tricíclicas sintetizadas com forma plana, que possuem características físicas, biológicas e químicas semelhantes. Estas substâncias são compostos sólidos cristalinos de cor branca com pontos de fusão e ebulição relativamente altos. As dioxinas e furanos podem ser considerados bastante inertes quimicamente, e são dificilmente biodegradáveis e metabolizáveis, o que imediatamente nos faz pensar sobre a dificuldade em se eliminar este tipo de contaminante dos gases.

Ainda segundo Sicari,(2003), pesquisas tem mostrado que esses subprodutos não ocorrem naturalmente, são formados como subproduto não intencional de vários processos envolvendo o cloro ou substâncias e/ou materiais que o contenham.

Para Schneider, Rego e Caldart. (2001), os incineradores de resíduo de serviços de saúde têm sido apontados entre os sistemas de combustão como um dos maiores geradores de dioxinas e furanos, havendo, desta forma, a necessidade urgente de se exigir, avaliar e controlar os sistemas de tratamento das emissões gasosas nestas instalações.

2.2 Teoria da filtração

Em um filtro de mangas a filtração é realizada pela passagem do gás carregado com as partículas através do elemento filtrante, as mangas. Este processo permite que as partículas fiquem retidas na superfície do tecido e em seus poros das fibras, formando assim a chamada torta de filtração responsável direta pela filtração. No momento em que se atinge o tempo de filtração ou queda de pressão máxima determinada para o equipamento, a torta então deverá ser removida da manga (Santo, 2004; Tieni, 2005).

Prever fisicamente o momento exato da formação da torta não é possível por causa da não uniformidade dos materiais dos tecidos, no entanto, a dificuldade em se determinar experimentalmente este ponto, fez com que muitos estudiosos adotassem um valor experimental que demarcaria o ponto em que a torta se forma (ponto de colmatção).

Ao se pensar então neste conceito, nota-se que a determinação do correto valor de velocidade de filtração, razão ar-pano, compatível com o tecido e sistema de limpeza escolhido é um dos grandes problemas dos filtros de tecido. A velocidade de filtração deste modo influencia tanto na eficiência de coleta quanto na vida útil das mangas.

Quanto aos mecanismos de coleta, os principais são: impactação inercial, interceptação direta, por difusão e por gravitação. Forças térmicas, gravitacionais e eletrostáticas somente são consideradas em situações especiais como fatores modificadores da eficiência do filtro. Em situações normais, as forças térmicas, atuantes neste objeto de estudo, são desprezíveis na filtração, pois uma diferença de temperatura muito grande é necessária

entre as partículas e o material coletor para que elas sejam efetivas. Devido às pequenas dimensões da fibra coletora, estas possuem baixa capacidade calorífica e rapidamente alcançam a temperatura da corrente de gás. Com esta curta duração do diferencial de temperatura, as forças térmicas geralmente não são consideradas (Strauss, 1975; Tieni, 2005).

A filtração dos gases a partir de um tecido limpo desenvolve-se em três etapas: filtração em profundidade, transição e filtração superficial. Na Figura 1 temos o exemplo da filtração em profundidade.



Figura 1: Ilustração de filtração em profundidade. (Ceron, 2.009)

Na primeira etapa, filtração em profundidade, como mostra a Figura 1, as fibras do meio filtrante são responsáveis pela captura das partículas. Nos primeiros instantes da filtração as partículas tem penetração intensa no interior do tecido, ficando presas nos interstícios das fibras. A queda de pressão nesta etapa tem um aumento latente e é diretamente proporcional ao número de partículas coletadas.

Tratando-se de um processo contínuo, passa a ocorrer então a filtração superficial, onde uma fina camada de sólidos é formada na superfície do elemento filtrante, a chamada torta. Esta camada desempenha o papel de um novo meio filtrante e fica responsável pela captura do particulado a partir do

momento de sua formação, aumentando gradualmente sua espessura pelo mecanismo de coleta. O tecido neste momento tem a função apenas de suporte para a torta de filtração. A fase de transição citada como uma das etapas do processo de filtração ocorre entre as duas etapas já discutidas, caracterizando-se inicialmente pelo momento em que a deposição das partículas acontece sobre as primeiras partículas coletadas, seguindo então para o momento de crescimento dos detritos onde há a interação com as partículas na vizinhança.

Pensando nos mecanismos que envolvem a filtração, algumas variáveis como velocidade de filtração, queda de pressão no filtro e permeabilidade tornam-se fundamentais.

A velocidade de filtração, ou razão ar-pano, é a velocidade dos gases na interface do tecido e é ela que determina a área total efetiva do tecido que se faz necessária para limpar o fluxo volumétrico de gases (Seville, et al; 1997).

Os fatores que devem ser considerados para se adotar um valor de velocidade adequado são características do pó, distribuição dos tamanhos do particulado, temperatura dos gases, concentração do pó na entrada, método de limpeza adotado e tipo do tecido. Para a maioria das aplicações a faixa utilizada é de 0,3 m/min até 3,7 m/min. Valores altos de velocidade levam a um tempo de filtração pequeno e nível de penetração das partículas no tecido alto, resultando em dificuldades para remoção da torta, aumentando a queda de pressão durante a filtração assim como a queda de pressão residual após a remoção da torta.

A queda de pressão total em um filtro de mangas é dividida em duas partes, sendo a somatória entre a queda de pressão do meio filtrante e a queda de pressão devido à formação da torta. Operados na faixa de 490 a 1.961 Pa, segundo Cavasseno, (1980), por se tratar de faixa que se mostrou melhor pelo ponto de vista econômico, a queda de pressão em um filtro é dos fatores de maior importância pois refletem diretamente nas potências dos equipamentos periféricos, e consequente gastos de energia maiores ao se utilizar faixas de queda de pressão elevadas.

Devido ao fato de ocorrer em ciclos, a operação de filtração ao se iniciar um novo ciclo possuirá valores de queda de pressão através do filtro bem menores ao momento imediatamente anterior à limpeza, queda de pressão máxima permitida, mas ligeiramente superior aos valores de queda de pressão do filtro virgem em virtude da queda de pressão residual, ocorrida pela existência de pedaços de torta que não foram removidos completamente. A queda de pressão residual tende a aumentar após cada ciclo pelo crescente acúmulo de partículas no tecido, no entanto, com a saturação do tecido este valor tende a estabilizar após certo número de ciclos refletindo uma diminuição drástica da permeabilidade do tecido.

A permeabilidade é uma medida que determina o grau de facilidade com que um fluido sobre certo gradiente de pressão percola os vazios em um meio poroso. Uma descrição, portanto, adequada da permeabilidade, passa pela combinação de aspectos do fluido, do meio poroso e do escoamento.

Dessa forma a permeabilidade de um meio filtrante indica menor ou maior facilidade à passagem do fluido através dos poros vazios. Considerando um sistema ideal, o meio filtrante deveria promover a maior remoção de impurezas possíveis com a menor resistência à passagem do fluido, o que pode ser realizado aumentando o volume de vazios na estrutura (porosidade) ou distância entre as fibras (poros).

Filtros que possuem pouca permeabilidade possuem em consequência baixa taxa de coleta de partículas, tornando o processo pouco vantajoso economicamente. Em casos em que a penetração de partículas pode ocasionar danos ao material ou problemas ao equipamento, filtros com pouca permeabilidade são necessários (Innocentini, et al, 2.009).

2.3 Tipos de coletores

Em um sistema de ventilação local exaustora os coletores são responsáveis pela filtração dos gases realizando a coleta dos particulados e/ou absorção de contaminantes provenientes do processo em que se visa realizar o

tratamento dos gases, e fornecendo após a passagem pelo equipamento, gases com quantidades de contaminantes dentro do permitido considerando a exigência imposta para cada situação.

A escolha do tipo de coletor e onde utilizá-lo, como mostra Macintyre, (1990), obedece a uma gama extensa de combinações de diversos fatores conforme a seguir:

- Concentração e tamanho das partículas do contaminante: os contaminantes em sistemas de exaustão abrangem uma faixa muito extensa de concentrações e dimensões de partículas;
- Grau de purificação exigida: para muitos agentes poluidores, existem recomendações e regulamentos que fixam os teores de concentração e grau de purificação, dependentes naturalmente da natureza e propriedades do contaminante e risco de dano que o mesmo possa oferecer ao ambiente;
- Característica do gás transportador do poluente: temperatura do gás, teor de umidade, composição dos gases (presença de SO_x, NO_x, etc), viscosidade, inflamabilidade, agressividade química, solubilidade, etc;
- Características do processo;

Devido à ampla faixa e a natureza dos poluentes oriundos de um processo de combustão, não existe, segundo Daskalopoulos, Badr e Probert; (1997), uma única tecnologia disponível que controle satisfatoriamente as emissões de todos os poluentes em questão.

A Tabela 1 mostra, de forma generalizada, as tecnologias mais utilizadas para cada tipo de poluente.

Tabela 1: Tecnologias para a redução das emissões provenientes da incineração de RSU. (Daskalopoulos,1997)

Poluente	Opções tecnológicas de controle
Material particulado	Centrifugação; precipitação eletrostática; filtração ou lavagem lavador úmido.
Ácido clorídrico (HCl)	Lavagem através do lavador a úmido
Ácido fluorídrico (HF)	Lavagem lavador semi-seco
Dióxido de enxofre (SO ₂)	Lavagem lavador úmido ou seco.
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	Redução catalítica ou não catalítica.
Mercúrio (Hg), cádmio (Cd) chumbo (Pb).	Igual à material particulado.
Outros metais pesados.	Igual à material particulado.
Bifenóis policlorados	Lavagem lavador semi-seco ou seco.
Dioxinas e furanos.	Igual ao material particulado ou à bifenóis policlorados.

Segundo McInnes e Royen (1990), há vários tipos de lavadores disponíveis para a redução dos gases ácidos (alguns deles são até capazes de remover simultaneamente materiais particulados), dentre estes se incluem: as torres de nebulização (ou câmaras de *spray*), os lavadores de bandejas e as instalações de leito empacotado (ou torres compactas).

No primeiro tipo, Figura 2, a pressão da bomba juntamente com os bocais de nebulização atomizam o líquido de lavagem ou absorvente.

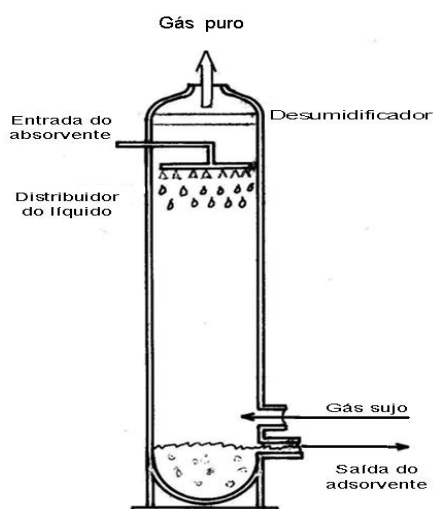


Figura 2: Câmara de spray. (McInnes e Royen,1990)

As câmaras de *spray*, em comparação aos outros sistemas, podem remover uma quantidade maior de SO_2 , enquanto usam também menos energia; porém, tais lavadores têm uma eficiência de controle de particulados extremamente baixos e não são eficazes na captura de partículas com um diâmetro menor que $5\mu\text{m}$.

O secador *spray*, que é um lavador a seco, Figura 3, nebuliza uma lama de cal sobre os produtos da combustão; as gotículas de reagente absorvem o SO_2 e outros gases ácidos, evaporando, finalmente, em virtude do calor do gás de escape, a água que se faz presente na lama. As partículas sólidas são capturadas, em seguida, num filtro de mangas ou precipitador eletrostático conectado ao próprio secador *spray*.

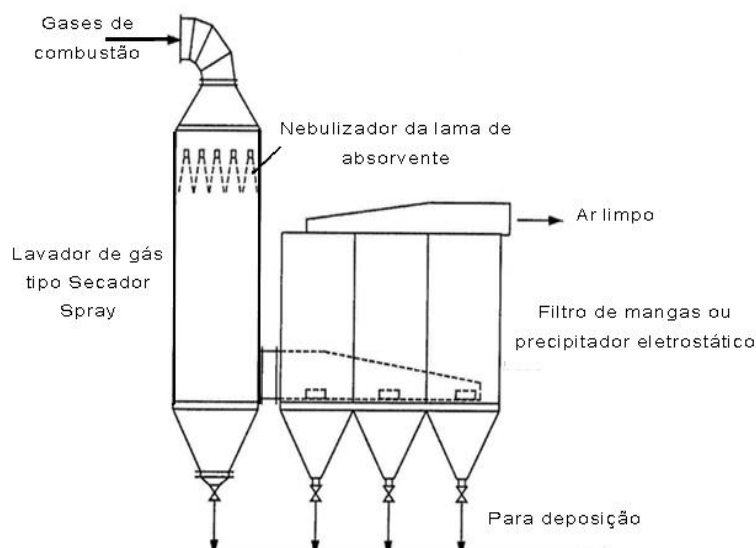


Figura 3: Secador spray. (McInnes e Royen, 1.990; Lora, 2.000)

Para lavadores de gases, o nível de eficiência alcançado está diretamente ligado a energia despendida necessária para a passagem dos gases pelo equipamento. Neste conceito há a classificação em três grupos:

- Baixa energia: perda de carga até 75 mmCA;
- Média energia: perda de carga entre 75 mmCA e 250 mmCA;
- Alta energia: perda de carga acima de 250 mmCA;

Dentre os lavadores, quando se almeja altos valores de eficiência na remoção de particulados, os do tipo Venturi fornecem os melhores resultados trabalhando entre média e alta energia, alcançando eficiências entre 98% e 99,5% para partículas menores que $10\ \mu\text{m}$. Na Figura 4 tem-se um esquema típico de um lavador venturi.

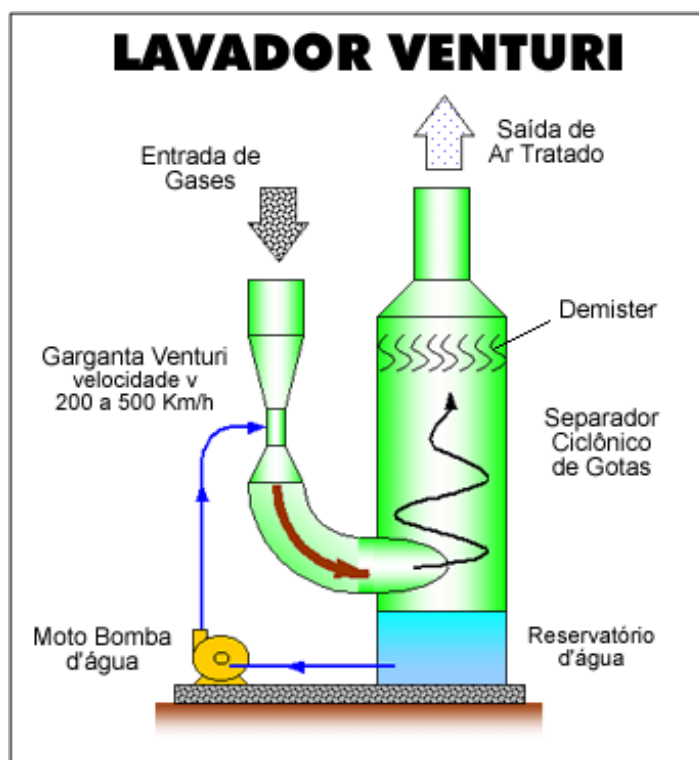


Figura 4: Lavador tipo Venturi. (Sicari, 2003)

Segundo Holanda (2003), as emissões de material particulado, Cd e Pb são eficientemente coletadas nos dispositivos que dependem de forças eletrostáticas (precipitador eletrostático) ou de filtração física (filtro de mangas).

O precipitador eletrostático é um equipamento voltado para a redução das mesmas emissões controladas pelo filtro de mangas, só que com diâmetro entre $0,5 - 20\ \mu\text{m}$, que utiliza forças elétricas para movimentar as partículas desde o fluxo de gases até os eletrodos coletores. O precipitador é o único dispositivo de controle de particulados no qual as forças de remoção atuam só sobre as partículas e não sobre todo o fluxo de gás. Isto garante uma alta eficiência de separação (99,5%) com uma pequena queda de pressão do gás, de aproximadamente 0,01245 bar. A Figura 5 ilustra a disposição básica de um precipitador eletrostático.

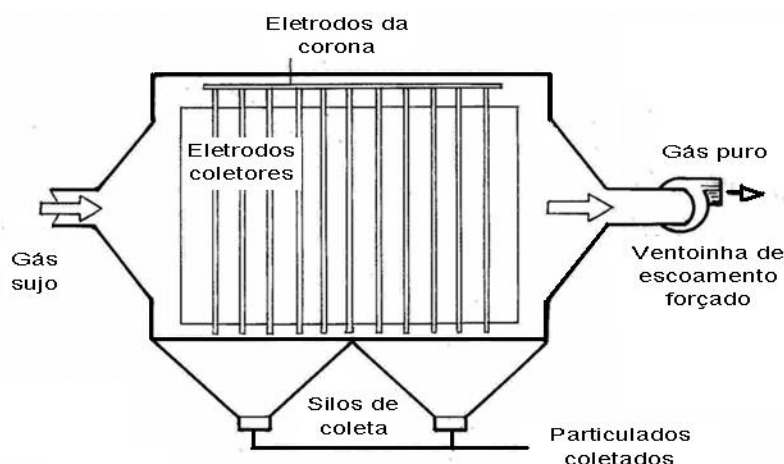


Figura 5: Precipitador eletrostático. (McInnes, Jameson e Austin, 1992)

Sicari, (2003) discorre sobre o princípio de funcionamento dos precipitadores eletrostáticos onde relata o mecanismo de passagem dos gases com particulado primeiramente em uma unidade ionizante sendo carregados eletrostaticamente, ou seja, as moléculas que constituem a partícula tem os polos norte e sul alinhados tornando-se magnéticas. Em um segundo momento, as partículas já magnetizadas atravessam uma unidade coletora onde são atraídas por placas metálicas de polaridade oposta, ficando assim depositadas sobre estas, onde se aglomeram. O desprendimento das partículas das placas ocorre com o uso de sistema de sacudimento mecânico. A Figura 6 ilustra o processo citado.

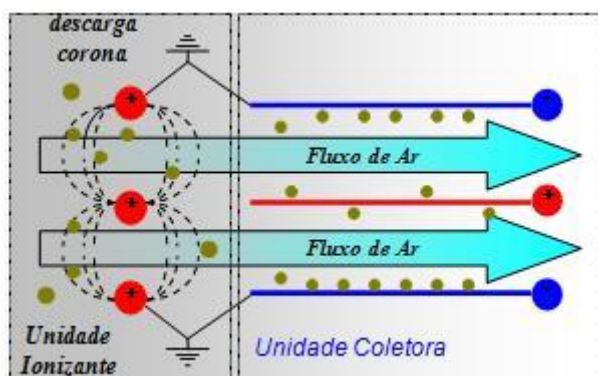


Figura 6: Princípio de funcionamento do precipitador eletrostático. (Sicari, 2003)

Tendo como propósito demonstrar a possibilidade de utilização do filtro de mangas na exaustão e tratamento de gases advindos da combustão de uma

caldeira de queima de biomassa, onde normalmente utiliza-se lavadores de gases devido aos altos teores de umidade e gradientes de temperatura, optou-se pelo uso desta categoria de coletor para este trabalho.

Como mostra Mesquita, A.L.S.; Guimarães, F.A.; Nefussi, N. (1977), a utilização de filtros é um dos mais antigos métodos de remoção de partículas de um fluxo gasoso, podendo apresentar eficiências altas para uma grande gama de tamanho de partículas.

O filtro de mangas, Figura 7 é um sistema amplamente aceito para o controle de particulados e traços de metais pesados com diâmetro menor que $0,3 \mu\text{m}$; dentre os seus componentes básicos pode-se destacar um meio filtrante, uma armação sustentadora das mangas e um mecanismo de remoção das partículas que ficam acumuladas no pano das mangas.

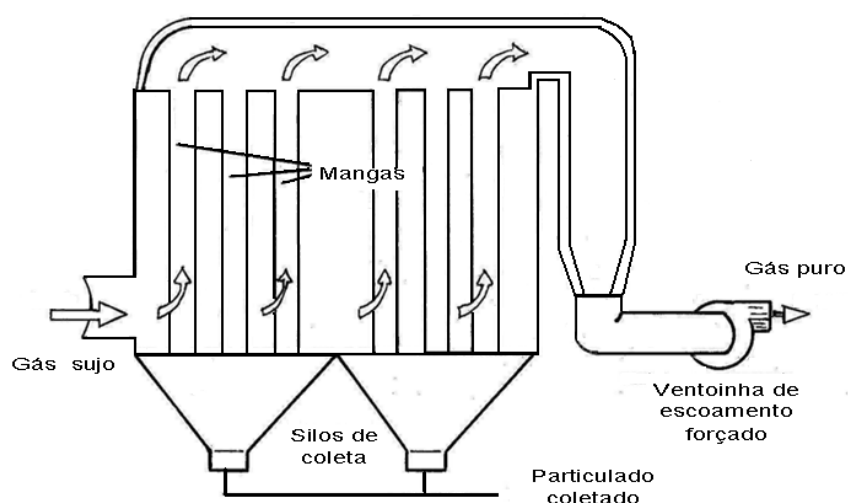


Figura 7: Filtro de Mangas. (McInnes, Jameson e Austin, 1992).

Seu princípio de funcionamento é forçar o fluxo de gases por um meio poroso que pode ser composto de material granulado ou fibroso. Dentre os tipos de filtros, considerando-se como base para a classificação a escolha do material filtrante, os filtros de tecido são tidos como os de mais ampla aplicação no campo de controle da poluição.

Em seu trabalho, Ivell, (2011), discorre sobre os três tipos básicos de filtros de mangas e sua classificação e nomenclatura quanto a tecnologia do sistema de limpeza: jato pulsante, ar reverso e sacudimento mecânico.

Para o sistema de limpeza por sacudimento mecânico assim como para o sistema com ar reverso, a deposição do particulado a ser retido pelo coletor é feita na parte interna do elemento filtrante, sendo a instalação da chapa espelho para fixação dos elementos filtrantes realizada na parte inferior da carcaça do filtro, próxima a moega coletora. Devido à inexistência da gaiola de sustentação para o elemento filtrante nestes dois casos, ainda que para o sistema de ar reverso haja anéis de sustentação ao longo do elemento filtrante, a tensão necessária para a fixação e disposição correta da manga é provida por tensionadores dispostos no mecanismo de sacudimento mecânico e por tensionadores individuais, no caso do sistema ar reverso. No caso do sistema por jato pulsante a deposição do pó é feita na camada externa da manga, que além de possuir gaiolas para sustentação da manga, tem a disposição da chapa espelho de fixação dos elementos filtrantes na parte superior da carcaça. Na Figura 8 têm-se ilustrações dos três tipos de filtros.

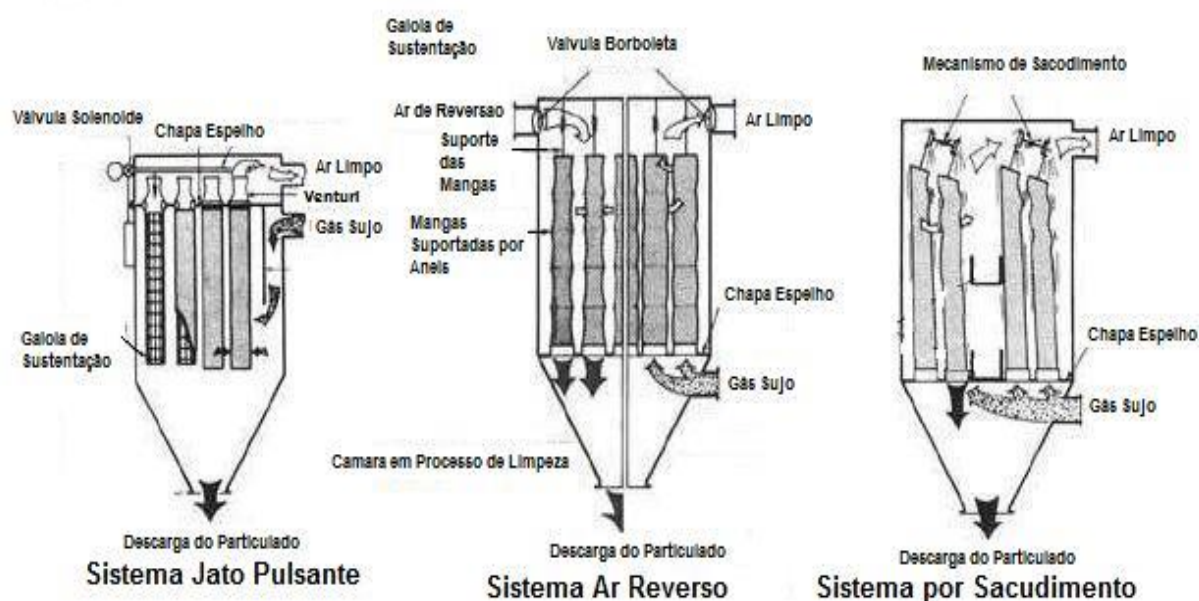


Figura 8: Tipos básicos de filtros disponíveis (Ivell, 2011)

Como ilustra a Figura 8, os filtros com sistema de limpeza por ar reverso são compartimentados possibilitando a alternância para as câmaras individuais entre o fluxo de gases com particulado e o fluxo de gases de ar reverso para a

limpeza, alternância realizada com o fechamento e abertura das câmaras através das válvulas borboletas. O ar reverso para este tipo de filtro é proporcionado por um ventilador dedicado. Tanto os filtros com sistema de limpeza por sacudimento mecânico quanto os filtros com sistema de limpeza por jato pulsante não necessitam serem compartimentados.

O sistema de limpeza por sacudimento mecânico trabalha de forma intermitente, onde barras horizontais contendo uma série de tensionadores presos aos elementos filtrantes são agitadas com o auxílio de um conjunto formado por motor elétrico com came.

Para o sistema de limpeza por jato pulsante, alimentado por linha de ar comprimido com pressões em torno de 6 bar, que American Conference of Governmental Industrial Hygienists – Committee on Industrial Ventilation (2001); Simon, et all (2007) e Ivell, (2011) mostram ser valor usual para este tipo de sistema (5,52 bar a 6,89 bar), a limpeza no elemento filtrante ocorre com o disparo do jato através de válvula diafragma acionada por solenóide. O disparo do jato de pressão elevada ocorre em pulsos com tempo de permanência em torno de 0,1 segundos, em acordo com Simon, et all. (2007); Ivell, (2011) e Saleem, et all. (2012), que acelerado pelo venturi locado na gaiola de sustentação atua internamente ao elemento filtrante, gerando uma onda de choque contrária ao sentido do fluxo de gases agindo como agente causador do desprendimento de material particulado da camada superficial externa do elemento filtrante. Visto o modo de funcionamento do sistema jato pulsante, é verificada a importância fundamental da escolha e uso correto da gaiola de sustentação, de modo a minimizar os efeitos de fadiga do elemento filtrante em virtude dos disparos de ar comprimido feitos continuamente durante a operação do equipamento.

Nesse sentido Ivell, (2011), ainda relata sobre o uso do material construtivo correto para a gaiola, geralmente em aço carbono galvanizado, além da adoção de tecidos lisos em detrimento de tecidos plissados para as mangas filtrantes, as quais geralmente possuem diâmetro em torno de 130 mm com comprimento que recomenda-se não ultrapassar os 3657 mm para assegurar uma limpeza eficiente. Nas Figuras 9 e 10 temos o exemplo de mangas e gaiolas em procedimento de instalação.



Figura 9: Gaiola com venturi em procedimento de instalação.(Ivell, 2011)



Figura 10: Manga filtrante com anel de aço mola em procedimento de instalação. (Ivell, 2011)

A limpeza por jato pulsante, geralmente muito eficiente pelo fato de operar de modo contínuo, aliada a mangas filtrantes com dimensões próximas as definidas como ideais, proporcionam ao filtro trabalhar com velocidades de filtragem de ordem maior do que as aplicadas nos filtros com os demais sistemas de limpeza.

Este fator, combinado ao fato de que o volume de ar necessário para a realização da limpeza no sistema jato pulsante é muito inferior ao volume necessário, por exemplo, no sistema com ar reverso, permite ao filtro de mangas com sistema de limpeza por jato pulsante não ser compartimentado e requerer um espaço físico de implantação muito menor.

Objetivando implementar uma aplicação não usual e dificultosa para filtros de mangas em seu trabalho, na filtração de fertilizantes, Ivell, (2011) utiliza um programador com temporizador para controle da frequência e duração dos pulsos de limpeza acionado conforme as leituras de um transmissor de pressão diferencial, e uma válvula rotativa para efetuar a vedação do equipamento e prover a correta descarga do particulado, procurando enfatizar a dificuldade nesta aplicação que é justamente o alto grau de higroscopia do pó aliado a alta umidade.

Estudando de forma mais aprofundada a dinâmica de operação que envolve o sistema jato pulsante, Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012), promove a desmontagem do sistema de limpeza em mau funcionamento de um filtro de mangas já em operação, para filtração de coque em uma planta de fabricação de aço, retirando dessa forma os tubos ejetores de ar comprimido, as mangas filtrantes e gaiolas de sustentação para análise.

Foi verificado como ponto primordial para os problemas encontrados a não presença do venturi nas gaiolas de sustentação, notando-se ainda um desgaste excessivo nos orifícios de saída do pulso de ar devido a baixa espessura do material construtivo e furos nos elementos filtrantes localizados nos primeiros 500 mm desde o ponto de fixação das mangas. Nas Figuras 11 e 12 visualiza-se os danos relatados.



Figura 11: Danos no tubo ejetor. (Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012))



Figura 12: Danos no elemento filtrante. (Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012))

As condições encontradas no filtro levam a situação de emissão de particulado na descarga do chaminé de ar limpo, sendo que até uma invalidação do equipamento, caso estes níveis estejam acima do permitido pela legislação, é possível. Observando as características dos danos causados pelo jato de ar pulsante, vislumbrou-se como causa possível uma deflexão no ângulo do jato de ar comprimido, a qual precisaria ser medida primeiramente para que qualquer tipo de correção pudesse ser proposta.

De maneira a obter medições empíricas, Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012), através de um dispositivo similar ao tubo ejetor presente no filtro de mangas, onde se manteve o dimensional idêntico e as condições de pressão e volume de ar de operação de disparo no filtro, com o auxílio de um pó para demarcação, obteve-se o resultado da Figura 13.



Figura 13: Resultados experimentais da medição da deflexão do disparo de ar comprimido. (Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012))

Em contrapartida ao experimento da Figura 13, para obtenção de uma análise mais aprofundada do comportamento do fluido durante todo o trajeto, e ainda para promover uma comparação com os resultados de deflexão obtidos do experimento empírico, um estudo teórico em software de simulação de fluidos baseando as condições de contorno nos parâmetros reais foi realizado, cujo resultado é mostrado na Figura 14.

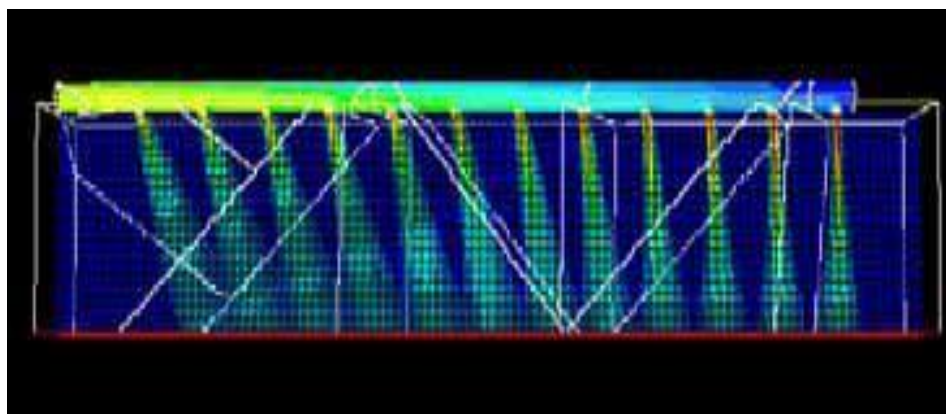


Figura 14: Resultados da simulação para medição da deflexão do disparo de ar. (Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012))

Os resultados da simulação demonstraram que a velocidade do gás nos disparos localizados na extensão que compreende a primeira parte do tubo ejetor, da esquerda para a direita, apresenta valores mais baixos com valor maior de deflexão, deflexão esta que diminui gradativamente ao longo da extensão que compreende a segunda parte do tubo com visível aumento dos

valores de velocidade do gás. Há também um perceptível aumento do diferencial de pressão estática presente entre a primeira metade do tubo ejetor e a segunda metade do tubo ejetor, causado pela pressão estática maior na primeira metade do tubo em relação a segunda.

Visando evitar os danos ocorridos tanto nos tubos ejetores quanto nos elementos filtrantes, e realizar a correção desta deflexão nos ângulos de disparo encontrada, Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012) realiza uma nova simulação para verificação do comportamento do fluxo de gases em torno de um disparo com deflexão e sem deflexão em um sistema com venturi, onde os resultados estão nas Figuras 15 e 16.

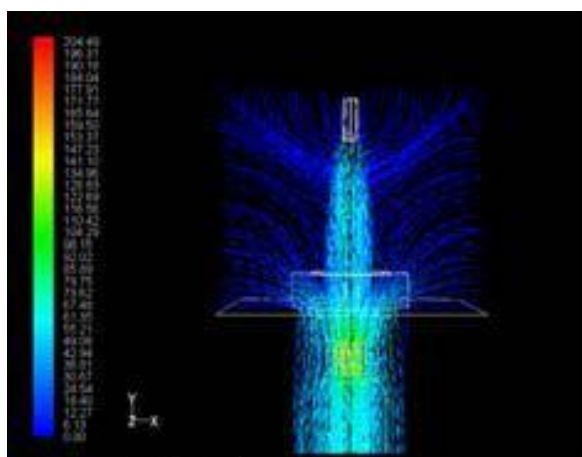


Figura 15: Fluxo do pulso em operação normal. (Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012))

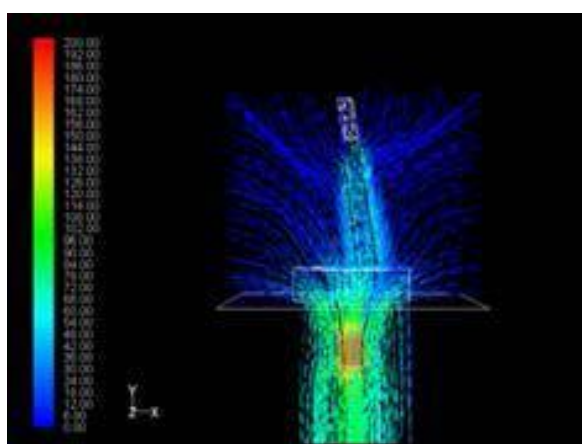


Figura 16: Fluxo do pulso em operação com deflexão. (Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012))

Os resultados ilustrados nas Figuras 15 e 16 permitem concluir que o princípio de funcionamento do projeto proposto de venturi estará então de acordo com as Figuras 17 e 18, além da visualização da correção da deflexão como proposto.

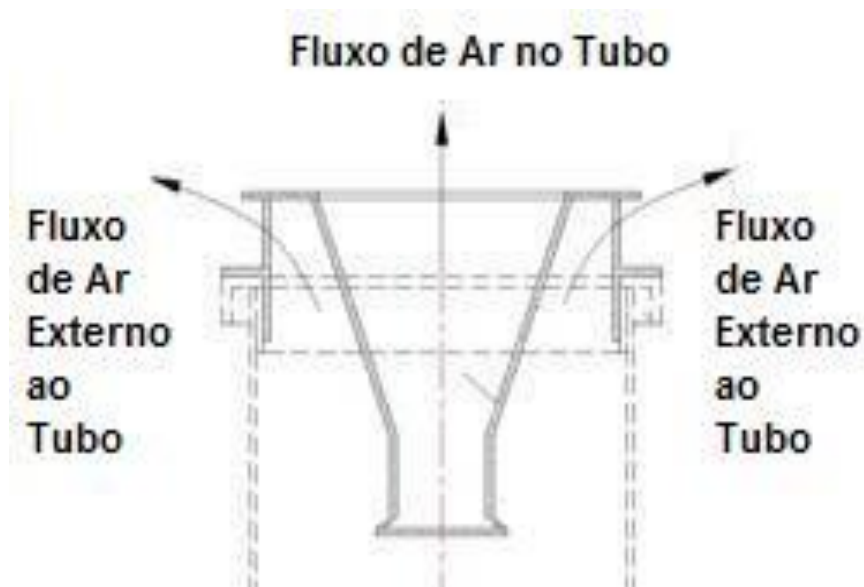


Figura 17: Princípio de funcionamento do venturi em operação normal do filtro (Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012))

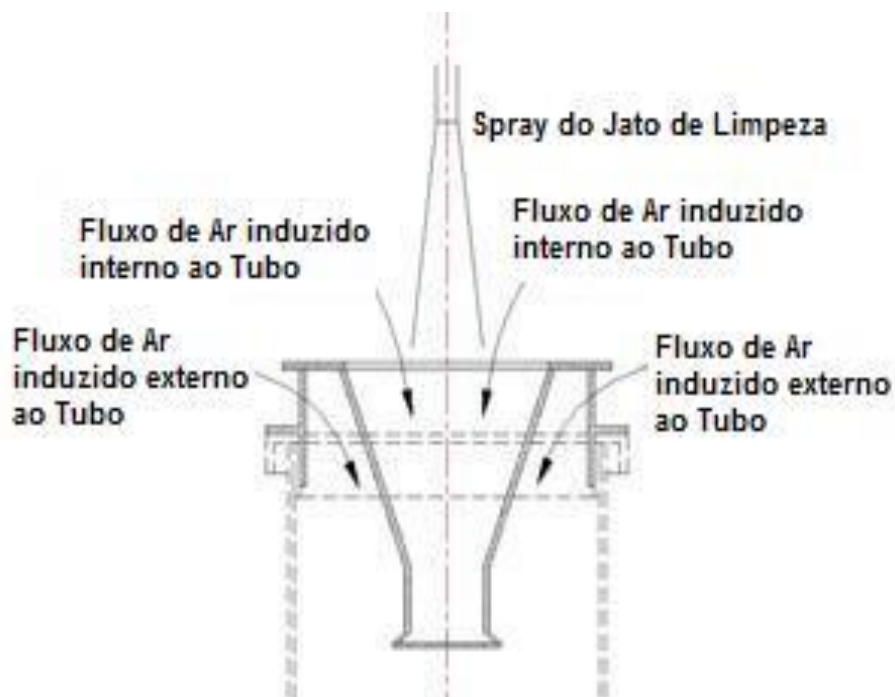


Figura 18: Princípio de funcionamento do venturi durante o disparo do jato de limpeza. (Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012))

Consistindo então o fluxo de ar para limpeza das mangas em uma somatória do ar induzido pelo jato de ar pulsante nos arredores da entrada do venturi, com o próprio jato de ar, viu-se a necessidade de um projeto de venturi baseado em dados que apresentassem a influência das cotas L e H e do ângulo alfa como demonstra a Figura 19 . Um ponto importante dos fluxos induzidos, interno e externo ao venturi, é que estes evitam o contato direto do elemento filtrante com o jato de ar comprimido, homogeneizando a pressão na superfície do tecido no momento da limpeza.

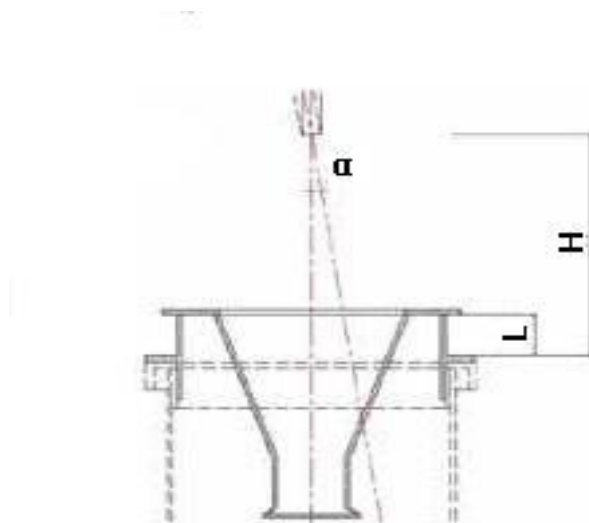


Figura 19: Modelo estrutural do venturi protetor.
(Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012))

Analizando a influência do venturi no fluxo dos gases para as duas condições, filtro em operação normal e com atuação do sistema de limpeza jato pulsante, com a ajuda de um software de simulação de fluidos, Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012) apresenta os seguintes resultados na Figura 20 para condições do filtro em operação normal e nas Figuras 21, 22 e 23 para o filtro com sistema de limpeza em funcionamento, isto para os parâmetros citados de cotas L e H, e ângulo alfa.

A Figura 20, mostra que a resistência proporcionada pelo venturi ao fluxo de ar durante a operação normal do filtro é menor com a cota L em torno de 40 mm a 55 mm, sendo o ar induzido externo ao venturi em torno de 70% de todo o fluxo que passa pelo dispositivo.

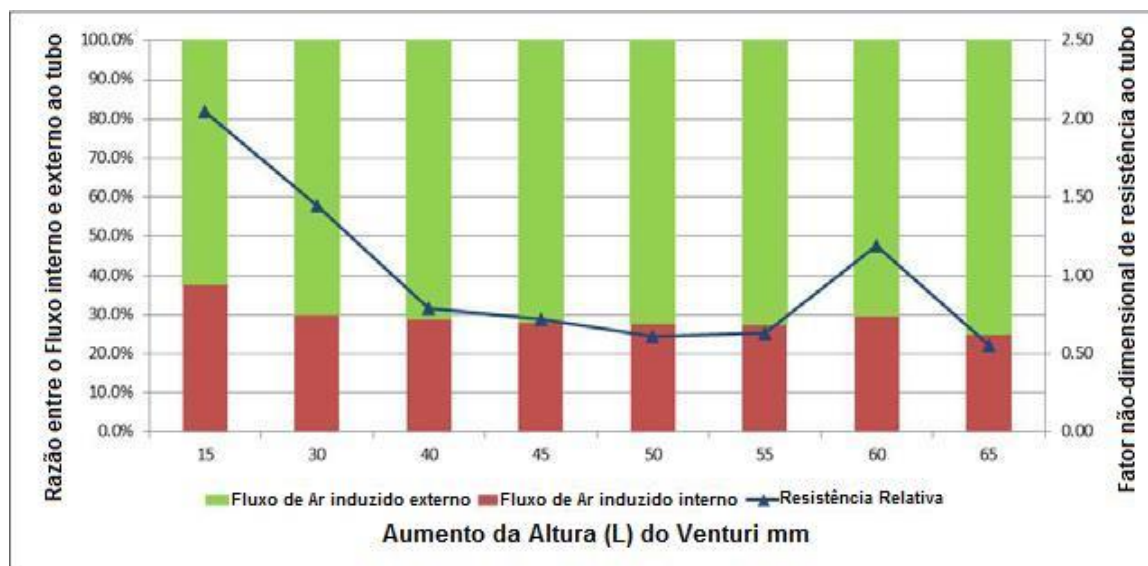


Figura 20: Efeito do venturi no fluxo de gases com o filtro em operação. (Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M.(2012))

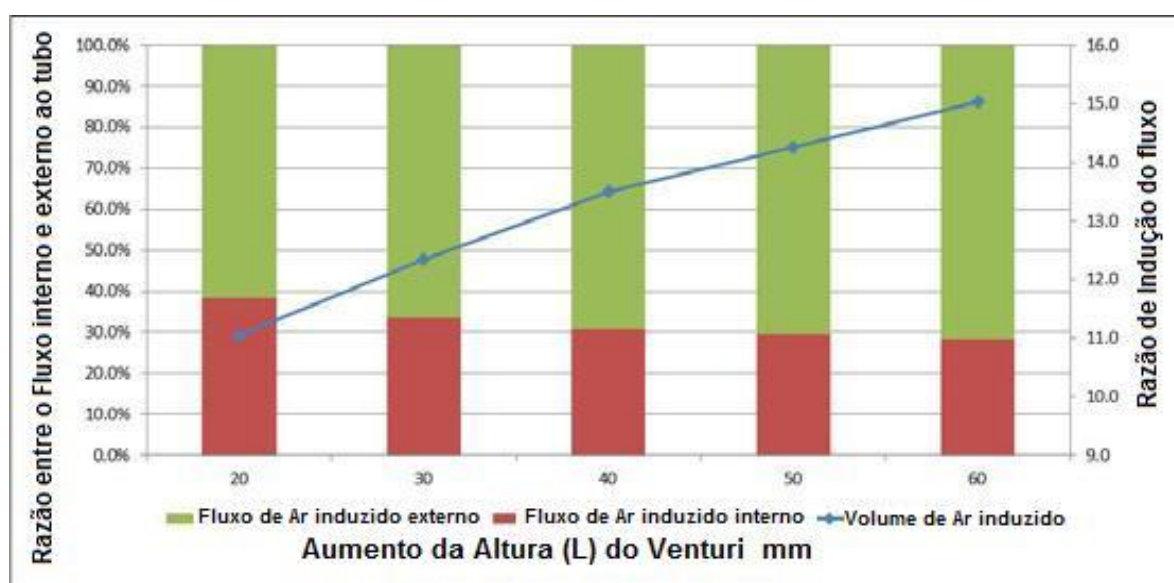


Figura 21: Efeito do venturi no fluxo de gases durante o jato de limpeza relativo a cota L. (Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M.(2012))

Na Figura 21 para o intervalo de menor resistência oferecida pelo dispositivo com o filtro em operação normal, 40 mm a 55 mm, demonstra-se que o fluxo de ar induzido pelo jato de ar comprimido corresponde a cerca de 60% a 70% do fluxo total de ar para limpeza das mangas, com 30% representado pelo ar induzido internamente ao corpo do venturi e 70%

representado pelo ar induzido externamente ao corpo do venturi. Um aumento linear do volume de ar induzido também é observado com o aumento da cota L.

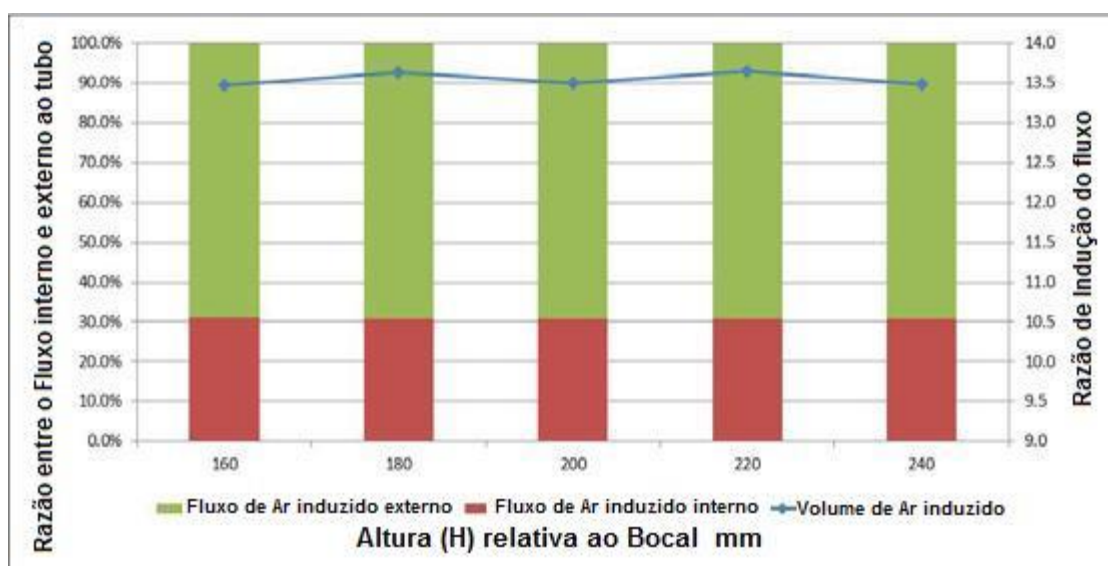


Figura 22: Efeito do venturi no fluxo durante o jato de limpeza relativo a cota H. (Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M.(2012))

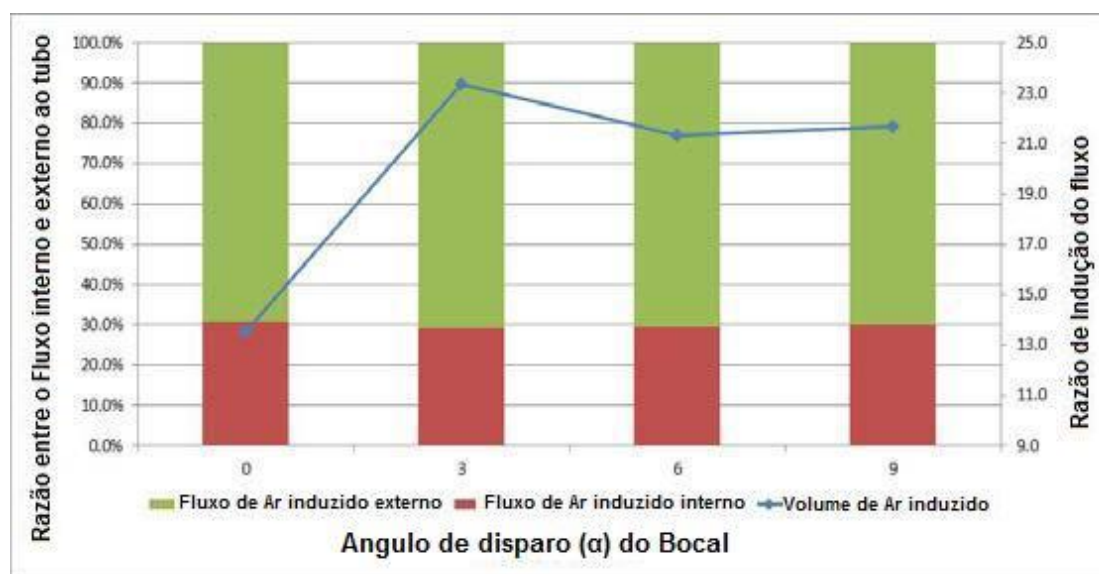


Figura 23: Efeito do venturi no fluxo durante o jato de limpeza relativo a ângulo α . (Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M.(2012))

O efeito para a variação da cota H ilustrado pela Figura 22, mostra pouca efetividade seja para variação do volume de ar induzido, em torno de 1%, ou razão entre ar induzido externamente ao corpo do dispositivo e internamente ao corpo. No caso da Figura 23, representando a variação do

ângulo do jato de ar comprimido, nota-se um aumento do ar induzido em torno de 50% com o aumento do ângulo de deflexão, sendo que entre 0° e 3° encontra-se a maior variação mantendo-se sempre a proporção de 30% de ar induzido internamente ao venturi e 70% de ar induzido externamente.

Por ter a função de ser o coletor principal do sistema, os cuidados e observações a serem efetuadas no dimensionamento do filtro de mangas abrangem variados aspectos. Considerações a respeito de características e carga do particulado, temperatura, umidade, como observado por Macintyre, (1990) e Ivell, (2011), para a escolha do tipo do tecido, além de considerações sobre a velocidade de ascensão dos gases na câmara suja e velocidade de filtração dos gases, devem ser corretamente ponderadas. Um dos principais pontos a serem observados é a determinação da velocidade de filtração adequada.

De acordo com Mesquita, A.L.S.; Guimarães, F.A.; Nefussi, N. (1977), em filtros de tecidos que ainda não tenham sido utilizados, a eficiência de coleta é baixa (da ordem de 60%) e, tão logo material particulado começa a se depositar sobre a superfície do elemento filtrante, a eficiência sobe para valores acima de 90% ou mais. Os valores de eficiência para filtros de tecido chegam a níveis altos de até 99,9% para partículas acima de 1 micron, como é demonstrado na prática em equipamentos para remoção de particulado de cimento e carvão por exemplo. Uma das principais características para filtros de tecido são justamente os valores baixíssimos de emissão alcançados na saída do equipamento diante das crescentes requisições dos órgãos ambientais.

Realizando a leitura do que representa este aumento exponencial nos valores de eficiência, Mesquita, A.L.S.; Guimarães, F.A.; Nefussi, N. (1977) observou então o elevado grau de importância deste acúmulo de partículas depositadas suportadas pelas fibras do tecido, os reais responsáveis por exercer a coleta do particulado. Diante disto, concluiu-se que eficiências de coleta em filtros de tecido podem ser observadas em função da quantidade de poeira depositada, velocidade e tamanho de filtros de tecido.

Através da Figura 24, observa-se que a velocidade de filtração é um parâmetro básico se relativo à eficiência de coleta, fator motivador para que se

realizassem inúmeras determinações experimentais de velocidades ótimas de filtragem para diversas operações industriais.

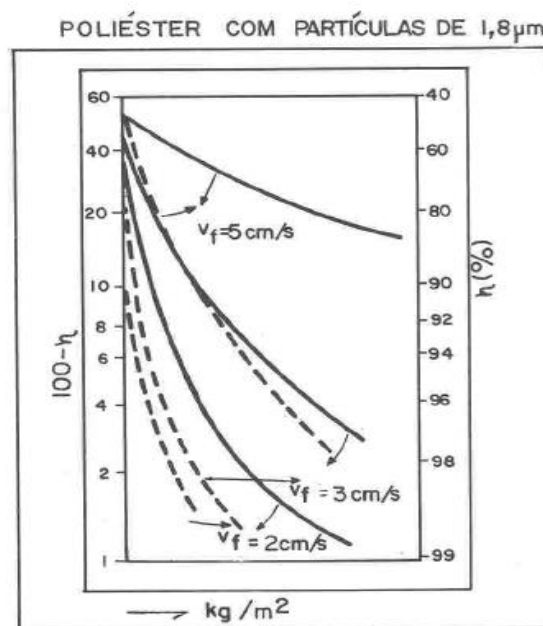


Figura 24: Eficiência de coleta.
(Mesquita, A.L.S.; Guimarães, F.A.; Nefussi, N.1977)

Na Tabela 2, alguns valores de velocidade de filtragem recomendados são apresentados.

Tabela 2: Velocidades de filtragem recomendadas. (Mesquita, A.L.S.; Guimarães, F.A.; Nefussi, N.1977)

Material	Máx. veloc. filtr., $\text{pés}^3/\text{min}/\text{pé}^2$	Material	Máx. veloc. filtr., $\text{pés}^3/\text{min}/\text{pé}^2$
Alumina	2,25	Gesso	2,50
Óxido de alumínio	2	Grafita	2
Abrasivos	3	Minério de ferro	2
Asbestos	2,75	Óxido de ferro	2
Bauxita	2,50	Couro	3,50
Poeira de bronze	2	Cimento	1,50
Carvão mineral	2,25	Óxido de chumbo	2,25
Carvão vegetal	2,25	Manganês	2,25
Cacau	2,25	Mica	2,25
Chocolate	2,25	Pigmentos	2
Poeira cerâmica	2,50	Papel	3,50
Argila	2,25	Plástico	2,50
Minério de cromo	2,50	Quartzo	2,75
Algodão	3,50	Sílica	2,75
Cosméticos	2	Sabão	2,25
Feldspato	2,50	Amido	2,25
Fertilizantes (resfriamento, secagem)	2	Açúcar	2,25

Equipamentos coletores do tipo filtros de mangas, que L'offler, F.; Dietrich, H.W. (1988) mostra serem utilizados na filtração para remoção de particulados sólidos de gases originados de uma ampla gama de processos, são vastamente utilizados como solução ideal para os altos requisitos de eficiência exigidos como performance para sistemas de tratamento de gases.

Como já citado, um dos principais pontos a ser observado no conjunto de fatores que proporcionam as altas eficiências dos coletores do tipo filtros de mangas é a determinação da velocidade de filtração adequada, que Saleem e Krammer, (2007) e Saleem, et al., (2012) mostram ter grande influência na queda de pressão através do equipamento e formação da camada de pó externa ao elemento filtrante denominada torta.

Usualmente assumida como a somatória entre a perda de pressão através do tecido e a perda de pressão através da torta, a perda de pressão total no filtro de mangas é fator delimitante para o funcionamento do equipamento, seja relativo a resistência estrutural do equipamento ou como parâmetro fundamental de operação. Buscando entender melhor a influência de alguns parâmetros operacionais na formação da camada superficial de pó nas mangas filtrantes durante a operação do filtro, Saleem, et al. (2012) através de experimentações em um filtro piloto em escala verifica em seu trabalho a influência de fatores como velocidade de filtração no equipamento e concentração de pó no fluxo de gases nas características da formação da torta.

O experimento foi realizado utilizando-se um filtro de mangas dotado de sistema jato pulsante de limpeza com arranjo de três fileiras de mangas contendo uma manga por fileira. Para injeção do particulado de CaCO_3 utilizado, um duto de diâmetro de 100 mm fazia a conexão com o interior do filtro, sendo ar ambiente injetado em uma mistura com o particulado que permeando através dos elementos filtrantes é descarregado ao ambiente com o auxílio de um ventilador centrífugo. Os dados de perda de pressão no filtro foram medidos através de transmissor de pressão diferencial, assim como os dados de temperatura foram coletados com o uso de termopar e valores de vazão medidos com o auxílio de um instrumento pitot atuando como referência para o inversor de frequência que controlava o fluxo de gases gerado pelo ventilador. Como os valores de velocidade de filtração são baixos com número

de Reynolds também baixo, pode-se aplicar a lei de Darcy's para descrever o fluxo de gases através da torta e do tecido da manga e chegar a valores de perda de pressão.

As mangas adotadas para o filtro possuíam diâmetro de 12 mm e comprimento de 1800 mm, sendo suas características descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades da manga com feltro de poliamida e polifenilsulfido. (Saleem, et all. 2012)

Propriedades	Valores	Unidades
Composição da Fibra	PI + PPS/PPS	–
Força de Ruptura (ISO 9073-3)		
Longitudinal	841	$\frac{N}{5cm}$
Transversal	1464	$\frac{N}{5\ cm}$
Tensão (ISO 9073-3)		
Direção da máquina	27,7	%
Transversal	35,4	%
Permeabilidade do Ar (EN ISO 9237)	133 a 200 Pa	mm/s
Gramatura (ISO 9073-1)	575	g/m ²
Espessura	2	mm
Volume de Poros	78	%
Construção do Feltro	Feltro Agulhado	

Com programador eletrônico com regulagem do tempo de permanência de disparo dos pulsos de limpeza entre 50 ms e 200 ms e para intervalos de pulso entre 2 segundos e 450 segundos, o procedimento para aferição dos dados iniciava-se pela injeção do fluxo de gases com particulado para a formação do bolo até que se alcançasse o valor de perda de pressão máxima estipulado de 1200 Pa. No momento em que o valor de perda de pressão máxima era atingido, a inserção de particulado era cessada e o sistema de limpeza acionado. A leitura da espessura da torta formada foi realizada por equipamento de leitura óptica acoplado externamente ao filtro, onde a primeira leitura para referência e calibração foi feita com as mangas limpas e as leituras posteriores realizadas no momento em que a perda de pressão atingia o valor máximo após a injeção de particulado ser finalizada, e uma segunda leitura feita após o disparo do sistema de limpeza.

A Figura 25 ilustra o equipamento de leitura óptica e seu posicionamento, onde a presença da janela de vidro que permitia a leitura também é visualizada.

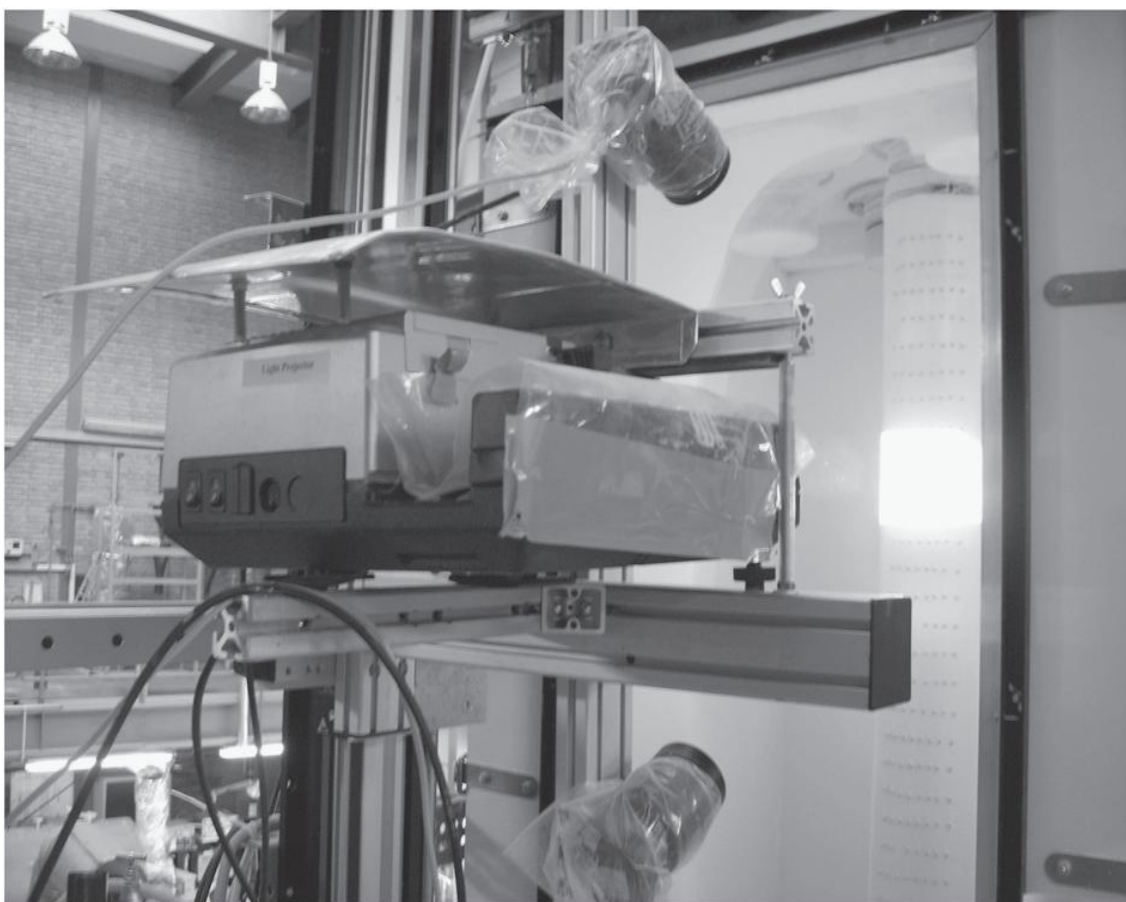


Figura 25: Equipamento de leitura óptica para aferição das espessuras da torta. (Saleem, et all. 2012)

O procedimento relatado então foi repetido de forma cíclica para diferentes valores de velocidade de filtração e de concentração de pó.

Na Figura 26 , onde Saleem, et all, (2012) apresentam três curvas com valores de velocidade de filtração e concentração de pó diferentes, é possível visualizar que o aumento tanto dos valores de velocidade de filtração quanto da concentração de particulado refletem num decréscimo do tempo necessário para alcançar o mesmo valor de queda de pressão no equipamento, ficando evidente no entanto que o aumento da velocidade de filtração possui influência muito maior nos parâmetros operacionais do equipamento visto que para a velocidade de filtração e para a concentração de pó o acréscimo foi o mesmo, de aproximadamente 60%, tendo a curva que representa o valor da velocidade mais alta uma inclinação superior.

Outro ponto a ser salientado é o valor de pressão residual maior para a curva de velocidade 34,1 mm/s.

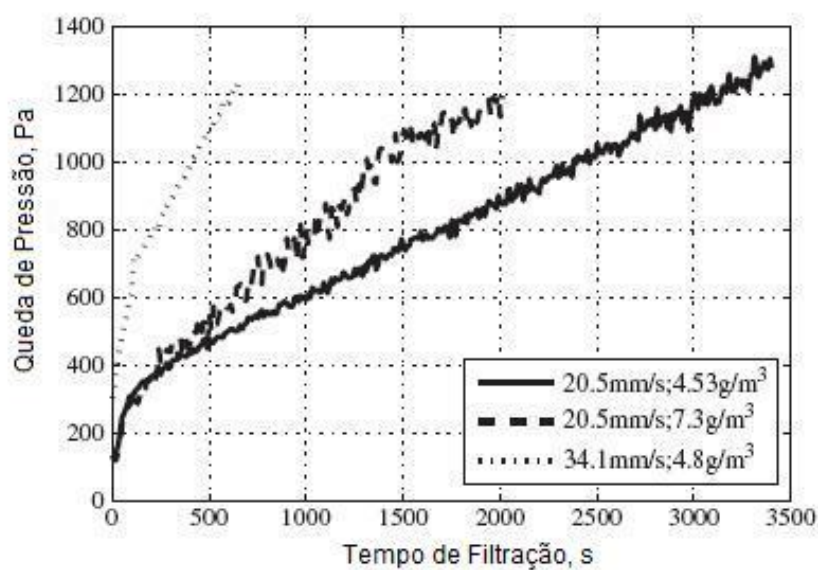


Figura 26: Comparação da queda de pressão para diferentes condições operacionais. (Saleem, et all. 2012)

Em termos de espessura, densidade e resistência específica na formação da torta, as Figuras 27 e 28 apresentam alguns dados.

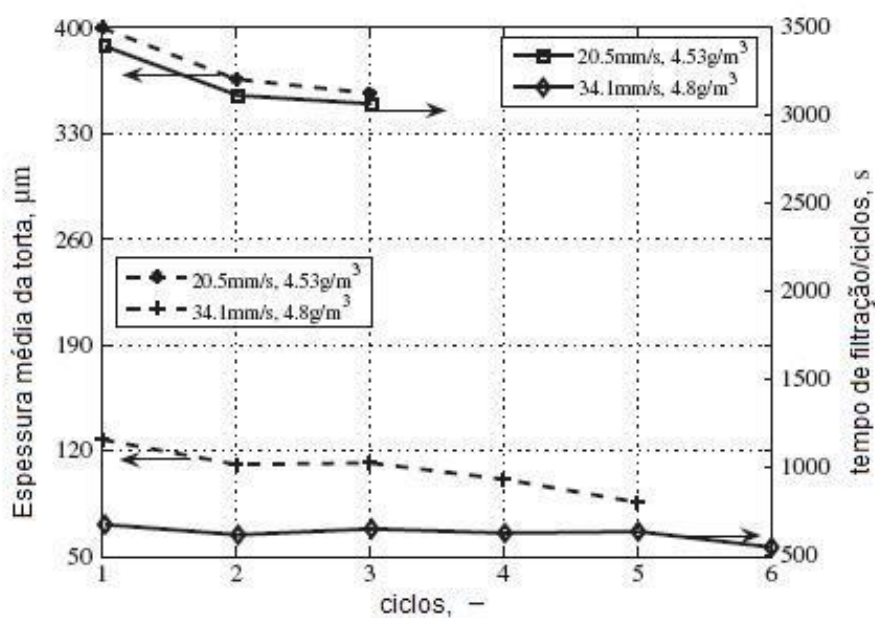


Figura 27: Espessura média da torta para diferentes condições operacionais. (Saleem, et all. 2012)

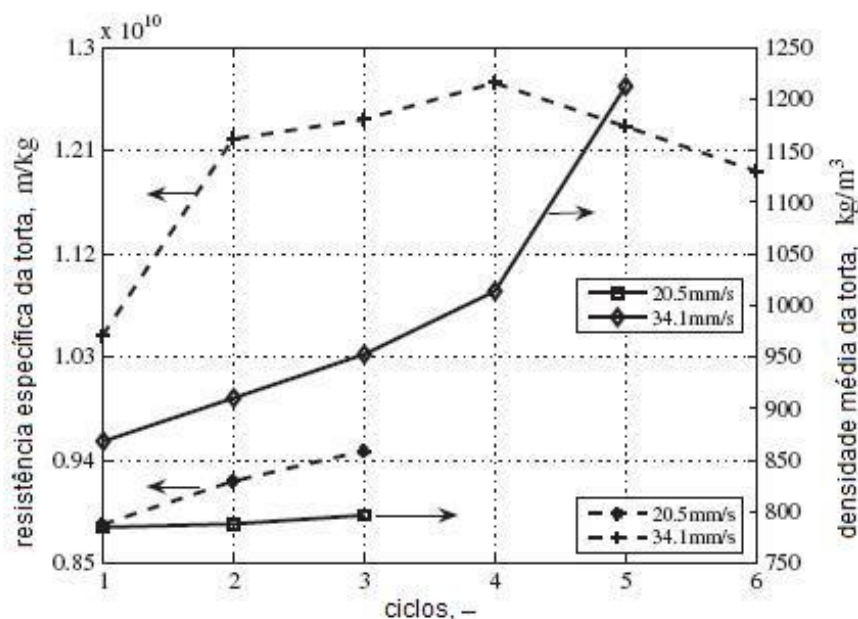


Figura 28: Densidade e resistência específica média da torta para dois valores de velocidade. (Saleem, et all. 2012)

Os valores médios de densidade e resistência específica apresentados na Figura 28 mostram-se maiores para valores maiores de velocidade de filtração, considerando as mesmas concentrações de pó. Esta situação vai de encontro aos dados apresentados na Figura 27, que apresenta valores de espessura média da torta maiores para velocidade de filtragem menor, podendo assim ser concluído que os bolos de maior espessura formados no equipamento com o uso de menores velocidades possuem menor densidade e resistência e vice versa.

A velocidade de filtragem como demonstrado influi diretamente na impregnação de pó na camada externa do elemento filtrante, visto que nada mais é que a taxa de passagem do volume de ar por unidade de área de tecido de filtragem disponível; taxa essa que deve levar em consideração a carga de pó pertinente ao processo para ser determinada, assim como a característica dos gases filtrados. Outro ponto de enfoque num sistema coletor é a determinação da velocidade de ascensão, que é resultado de ponderações a respeito da densidade do particulado a ser coletado.

A escolha da taxa de filtração ou velocidade de filtragem, como já discutido, é então de fundamental importância para que se alcancem valores baixos de perda de pressão no coletor, valores típicos entre 75 mmCA e 150

mmCA, demonstrando uma das características principais dos coletores desta categoria, em acordo com alguns trabalhos (Mesquita, A.L.S.; Guimarães, F.A.; Nefussi, N, 1977; American Conference of Governmental Industrial Hygienists – Committee on Industrial Ventilation, 2001; Ivell, 2011; Saleem, et all, 2012). Logo, passa a ser esta virtude de queda de pressão não excessiva no equipamento, fator preponderante para que se tenham instalações com baixa potência instalada.

Na Tabela 4, Mesquita, A.L.S.; Guimarães, F.A.; Nefussi, N. (1977) lista faixas de valores de perda de carga para alguns tipos de equipamentos coletores.

Tabela 4: Perda de carga em equipamentos de controle. (Mesquita, A.L.S.; Guimarães, F.A.; Nefussi, N. (1977))

Equipamento	Perda de carga (pol H ₂ O)	
	Faixa encontrada	Faixa comum
Câmara gravitacional	0,2-1,5	0,2-0,8
Ciclone comum	0,5-2,5	1,0-2,0
Ciclone de alta eficiência	2,0-6,0	4,0-5,0
Multiciclone	2,0-6,0	4,0-5,0
Câmaras de impactação	1,0-4,0	1,5-2,5
Precipitadores eletrostáticos	0,2-1,0	0,2-0,8
Filtros de tecido (filtros de manga)	3,0-6,0	4,0-5,0
Filtros compactados	0,2-1,0	0,2-1,0
Torres de borrfio	0,2-2,0	0,5-1,0
Torres de enchimento	2,0-10,0	2,0-8,0
Torres de prato	1,0-8,0	2,0-6,0
Lavadores auto-induzidos	0,2-8,0	2,5-6,0
Lavadores ventúri	10,0-60,0	10,0-40,0
Lavadores de disco	10,0-60,0	10,0-40,0
Lavadores de impactação	1,5-8,0	4,0-6,0

Como demonstra Fujii, et all, (1994), em situações de aumento da velocidade de filtração para coletores filtros de mangas, o aumento dos batimentos do sistema de limpeza ocasionado por este excessivo valor de velocidade aumenta a passagem de fuligem através do tecido de filtração, o

que, como consequência, gera maiores quantidades de emissões de dioxinas e furanos, pois estas estão presentes em grande quantidade nas fuligens.

Um ponto importante a ser destacado é a maior eficiência de remoção deste componente da combustão altamente tóxico, como demonstrado na introdução deste trabalho, em temperaturas por volta de 130°C. Nestas condições com a injeção usual de carvão ativado e cal hidratada foram encontrados valores de eficiência de 98% de remoção dos componentes.

Pensando brevemente em termos comparativos, tem-se então a Tabela 5 que fornece para alguns parâmetros entre lavadores de gases e coletor filtro de mangas informações pertinentes para o estudo.

Tabela 5: Comparativo entre lavador de gases e filtro de mangas.

	Lavador De Gases	Filtro de Mangas
Parâmetros de Comparação		
Eficiência de Coleta	98% até 99,5%	99% até 100%
Perda de Carga para os Níveis de Eficiência Exigidos	acima de 250 mmCA	entre 100 mmCA e 150 mmCA
Tamanho da Partícula	acima de 1 micron	acima de 1 micron
Geração de Efluente para Novo Tratamento	Sim	Não
Corrosão do Equipamento	Sim	Não
Frequência de Manutenção	Alta	Baixa

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

3.1 Descrição dos equipamentos e circuito dos gases do sistema de exaustão e filtragem

Para este experimento foi utilizada uma típica instalação de sistema de desempoeiramento e tratamento de gases via seca.

Os gases oriundos do processo (caldeira de queima de biomassa) são transportados através de duto em aço carbono ASTM A 36, que interliga a caldeira ao precipitador do tipo ciclone instalado anteriormente ao coletor do tipo filtro de mangas.

No duto de interligação entre o precipitador e o coletor instalou-se uma válvula controladora de fluxo do tipo damper borboleta (palheta única). Esta válvula era responsável pela proteção do filtro de mangas em caso de excessiva temperatura dos gases do processo, sendo acionada através de um atuador eletromecânico com posicionador no momento em que a leitura da temperatura na entrada do duto de gases do processo atingisse níveis críticos. Neste momento, atuada pelo acionamento, a palheta da válvula atingia abertura suficiente de forma a permitir a entrada de volume de ar ambiente (30°C) no circuito do duto de transporte de gases que resultasse em uma mistura com os gases do processo de temperatura inferior a dos gases provenientes da caldeira. A modulação do damper ocorria de acordo com a leitura do termopar locado na entrada do filtro de mangas.

Sendo conduzidos até o equipamento coletor para remoção de particulado sólido, uso habitual para filtros de mangas como mostra L'offler e Dietrich, (1988), os gases são filtrados e com quantidade de poluentes reduzidos são encaminhados através de dutos pelo uso de ventilador centrífugo para a chaminé do sistema.

Na Figura 29, apresenta-se um fluxograma do sistema, permitindo visualizar o sentido do fluxo percorrido pelos gases no circuito e a disposição dos equipamentos e instrumentação, sendo dois termopares T.1 e T.2 (item 16), a localização e ligação do transmissor de pressão diferencial entre as câmaras de ar limpo (casa de bicos) e sujo (compartimento de filtragem), além do sistema de descarte de particulado representado pelo item 15 (válvulas rotativas) e sistema de limpeza por jato pulsante (itens 8, 9, 10 e 11). Representado pelo item 6, a presença das gaiolas de sustentação internas ao elemento filtrante, com venturi, é fundamental para que se evite o desgaste excessivo do elemento filtrante (item 5) nos esforços provocados pelos constantes disparos dos jatos de limpeza (Ivell, (2011); Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012)).

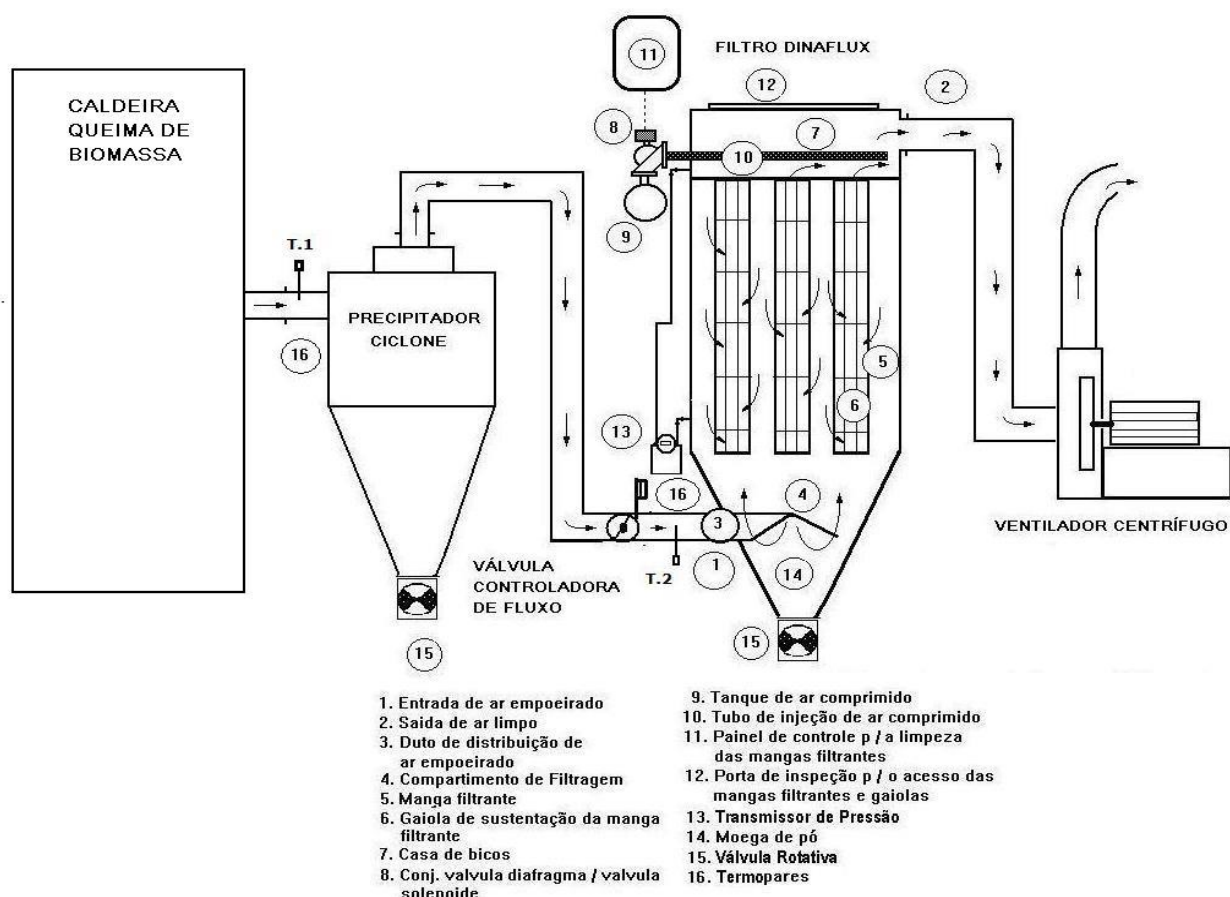


Figura 29: Fluxograma do sistema de tratamento de gases.

O filtro de mangas utilizado é do tipo jato pulsante “on-line” que trabalha com pressão negativa. A Figura 30 mostra foto das instalações utilizadas no experimento localizadas na planta industrial de produção de açúcar e álcool em Olímpia-SP.



Figura 30: Vista geral dos equipamentos utilizados no experimento.

Para a limpeza dos elementos filtrantes foi adotado o sistema de jato pulsante “on-line”, onde válvulas diafragmas de 1 ½” eram acionadas através de solenoides proporcionando um disparo de ar comprimido a grande pressão, que era dissipado ao longo do tubo de injeção de ar que possuía um furo concêntrico ao diâmetro dos elementos filtrantes a cada fileira de gaiolas e mangas. O disparo, como mostra Zhou, R.; Shen, H.; Zhao, M. (2012) apresenta um aumento no diferencial de pressão encontrado, com pressão estática maior na primeira metade do tubo, com o fluxo aumentando a velocidade do ar na segunda metade ao mesmo tempo em que a pressão estática sofre um decréscimo. A alimentação de ar comprimido na pressão correta era garantida pelo tanque reservatório, assim como o tempo e intervalo de disparo das solenoides era controlado pelo painel de controle.

Como já citado, a implantação do projeto piloto em questão foi realizada desviando-se somente parte do fluxo dos gases da caldeira, tendo em vista o caráter experimental do sistema de tratamento de gases.

Este desvio de fluxo foi implementado instalando-se um duto adjacente ao duto de saída de gases do processo.

Como pode se observar pelas Figuras 29 e 30, a colocação do ciclone instalado anteriormente ao filtro de mangas deu-se devido à necessidade de proteção dos elementos filtrantes contra eventuais fagulhas incandescentes provenientes da caldeira, visto que uma única fagulha junto ao material coletado e acumulado na moega do filtro momentos antes da descarga através da válvula rotativa é suficiente para início da combustão, resultando consequentemente na deteriorização do elemento de filtragem que é constituído basicamente de tecido de fibra de vidro e teflon, ambos suscetíveis à queima. Outra precaução importante foi com a utilização de isolamento térmico nos dutos de transporte de gases para evitar queda de temperatura do fluxo de gases e possível condensação de vapor de água dentro do filtro de mangas foi utilizada.

O principal componente deste experimento como já citado é o filtro de mangas, agente responsável pela alta eficiência de filtragem alcançada em sistemas a seco de filtração. Os dados do filtro utilizado estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6: Características do filtro de mangas Dinaflux 8x7-30

<i>Modelo</i>	<i>Dinaflux 8x7-30</i>
Vazão	5.000 m ³ /h
Temperatura de Operação	230° C
Dimensional das Mangas	160 x 3.000 mm
Número de Mangas	56
Velocidade de Filtragem Área Filtrante	58,4 m ³ /m ² .h 85,61 m ²
Velocidade de Ascensão	0,54 m/s
Tecido das Mangas	Goretex (W. L. GORE) Tecido de fibra de vidro com membrana expandida de PTFE (Teflon)

3.2 Modo de operação e coleta de dados

O início de operação do sistema de tratamento de gases ocorreu em maio de 2008, sendo que todos os percalços de ajustes do equipamento foram sanados antes do período efetivo de testes, e em maio de 2010 o sistema passou a trabalhar em regime contínuo.

Todo o sistema foi monitorado por instrumentação, que inclui sensores termopar, um posicionado na entrada do duto adjacente na captação de gases da caldeira e outro locado no duto de interligação entre ciclone e filtro, logo após a válvula reguladora de fluxo, filtro que contava também com transmissor de pressão diferencial fazendo a leitura entre a câmara de gases sujos (câmara de filtragem) e a câmara de gases limpos (casa de bicos), como mostrado na Figura 29.

O particulado retido no ciclone e filtro de mangas era descartado continuamente através de válvulas rotativas (acionamento por moto redutor de 0,75 kW), ambas localizadas na parte inferior das moegas. A especificação e quantitativos da instrumentação estão dispostos a seguir:

- ✓ Dois (02) sensores termopar do tipo K – sinal após transmissor analógico de 4 a 20 mA;
- ✓ Um (01) transmissor de pressão diferencial modelo LD 301 (SmaR) – FAIXA: 0~500 mmCA – sinal analógico 4 a 20 mA;
- ✓ Dois (02) sensores de nível alto modelo ICOT Rotativo – Haste 500 mm – alarme por contato mecânico da palheta;

O controle do sistema foi efetuado via controlador lógico programável (C.L.P.), onde foi realizada a coleta de dados para os parâmetros citados durante todo o período de funcionamento, possuindo o C.L.P. um disco rígido para armazenamento dos dados.

O sistema de tratamento de gases foi operado todo o tempo de forma usual para sistemas a seco, sendo seus parâmetros base de funcionamento inseridos no C.L.P. Para o início de operação do sistema de limpeza jato

pulsante alimentado por linha de ar comprimido com pressão de 6 bar, que American Conference of Governmental Industrial Hygienists – Committee on Industrial Ventilation (2001); Simon, et al, (2007) e Ivell, (2011) mostram ser valor usual, levava-se em conta o aumento excessivo da queda de pressão através do filtro de mangas, baseando-se na leitura do transmissor de pressão diferencial.

Após aproximadamente dois meses em funcionamento, período utilizado para alcançar o nível de saturação suficiente dos elementos filtrantes de acordo com Mesquita, A.L.S.; Guimarães, F.A.; Nefussi, N. (1977), que mostra que para filtros de tecidos sem utilização (eficiência de coleta da ordem de 60%) a eficiência de coleta aumenta para valores acima de 90% tão logo material particulado seja depositado, os dados de pressão e temperatura passaram a ser coletados diariamente, considerando a situação ideal de filtração.

Complementar aos dados de pressão e temperatura coletados que serão apresentados adiante, também foram efetuadas medições de efluentes no duto de entrada do filtro de mangas e na descarga de ar limpo deste ao final do período de testes (cinco meses de operação).

A coleta dos gases utilizados para análise dos efluentes foi feita com sistema para amostragens isocinéticas, e foram realizadas de forma simultânea na entrada e saída do filtro de mangas para que pudessem gerar comparações plausíveis com os dados obtidos. A retirada de elementos filtrantes para análise também foi realizada. Na Figura 31 temos o esquema do coletor.

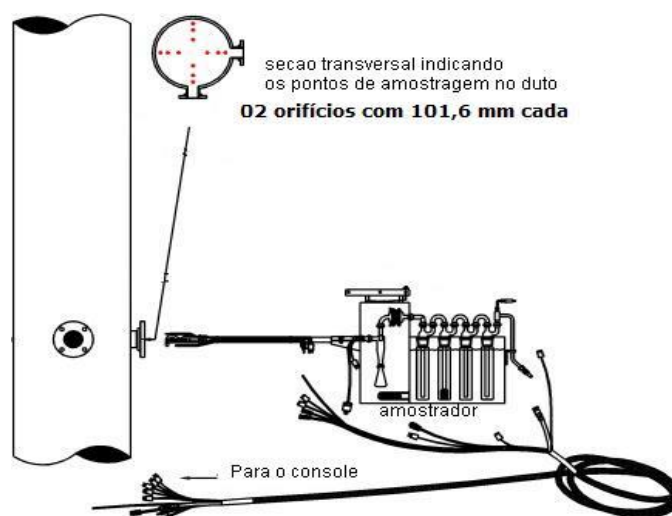


Figura 31: Esquema de utilização do coletor isocinético.

Nas Tabelas 7 e 8 apresentam-se as informações a respeito dos métodos de coleta tanto para medições de efluentes quanto para análise dos elementos filtrantes utilizados neste trabalho.

Tabela 7: Método de medições de efluentes.

Local de Coleta	-Duto de Entrada do Filtro de Mangas (Gases com Particulado) -Duto de Descarga do Filtro de Mangas (Gases Limpos)
Análises Realizadas	-Emissão de Material Particulado -Emissão de Óxidos de Nitrogênio
Sistema de Coleta	- Sistema para Amostragens Isocinéticas instalado em luva de 4" para acesso ao duto de gases, tendo o gasômetro seco, placa de orifício e tubo de Pitot-S calibrados; - Armazenagem dos gases em sacos de coletas de gases (tipo Tedlar);

Tabela 8: Método de coleta do elemento filtrante.

Local de Coleta da Manga Filtrante	-Filtro Dinaflux 8x7-30
Características da Manga	-Tecido de fibra de vidro com gramatura de 750 g/m ² e membrana expandida de PTFE com fixação por anel de aço mola
Sistema de Coleta	-Retirada de amostra de manga aleatória do compartimento de gases através da porta de inspeção superior;

As análises assim como as coletas foram realizadas pela empresa JAPH - Serviços Analíticos, especializada e credenciada. Para análise dos elementos filtrantes o próprio fabricante, a empresa GORE, foi o agente realizador dos testes.

3.3 Metodologia de obtenção dos resultados e tratamento dos dados

Os dados de pressão e temperatura aferidos e armazenados diariamente no C.L.P. foram coletados em visitas semanais em campo ao equipamento, onde além da eventual coleta já citada, o acompanhamento da

operação do sistema de tratamento de gases na data da visita era realizado com inspeção do funcionamento correto dos equipamentos (alimentação de ar comprimido com isenção de umidade e na pressão correta, sistema de descarga por válvula rotativa sem travamento mecânico, tensão de alimentação das solenoides dentro do padrão, conexão do transmissor de pressão ao filtro sem obstrução, interligações elétricas aos termopares sem quebra) e checagem dos dados coletados para verificação de possíveis alarmes indicativos de pressão, temperatura ou nível alto de particulado nas moegas, que implicassem em funcionamento inadequado do sistema.

Para a análise dos dados de temperatura e pressão coletados neste caso específico, o tratamento matemático através de uma média aritmética mostrou-se suficiente, o que é facilmente justificado pelo fato de que somente valores excessivos de temperatura e pressão mostrar-se-iam prejudiciais ao objetivo de demonstrar a possibilidade de utilização do equipamento para o propósito previsto. Dessa forma então, dados de pico acima dos ideais estipulados para este tipo de sistema em ambos os valores citados somente seriam representativos se ocorressem em demasia, o que certamente seria demonstrado ao se aplicar uma média aritmética simples.

As Equações (1) e (2) representam as relações aplicadas para os dados de temperatura e pressão em cada dia.

$$T_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (1)$$

$$\Delta P_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (2)$$

A equação (1) foi aplicada para gerar a média das temperaturas no trecho entre caldeira e ciclone e na entrada do filtro para cada dia da semana anterior a coleta, podendo-se desta forma traçar através da média diária das temperaturas a curva da tendência da semana, mesmo procedimento aplicado com a equação (2) para os dados de pressão diferencial no filtro. Os dados eram armazenados a cada quinze minutos no C.L.P..

A coleta dos gases seguiu as normativas do Manual de Normas Técnicas da CETESB (Anexos 1 a 7), em que através de metodologia analítica foram determinados os pontos de coleta em função das dimensões do duto. Os testes de vazamento foram realizados no início e no final de cada coleta, tendo estas a duração de uma (1) hora, sendo que no decorrer do teste foram retiradas três (3) amostras de gás, as quais foram estocadas em sacos tedlar, para sua posterior análise pela técnica de Orsat, a fim de se determinar a massa molecular seca.

Os seguintes materiais, equipamentos e reagentes foram utilizados para amostragem do material particulado:

- Solução de Acetona/Água destilada 50% v/v;
- Filtro de Fibra de vidro;
- Vidraria corrente de Laboratório;
- Balanças semi-analítica e analítica;
- Equipamento de Orsat;
- Sílica gel;
- Saco de coletas de gases (tipo Tedlar);
- Sistema para Amostragens Isocinéticas, tendo o gasômetro seco, placa de orifício e tubo de Pitot-S calibrados.

Os procedimentos de amostragem de material particulado foram realizados conforme o descrito nas normativas CETESB (Anexos 1 a 7). Aos dois (2) primeiros frascos borbulhadores foram adicionados 100 ml de água em cada um, mantendo-se o terceiro vazio. O quarto frasco borbulhador foi preenchido com sílica gel.

Ao final da amostragem, os borbulhadores foram pesados para se obter a massa de água condensada. A sonda e o ciclone foram lavados com uma mistura acetona/água destilada 50% v/v, a qual foi evaporada para a quantificação de material particulado. O filtro foi retirado, guardado em placa de petri, dessecado sob sílica gel para posterior pesagem. Foram geradas as seguintes amostras:

- Amostra: Solução de lavagem;
- Amostra: Placa de petri com filtro.

Dessa forma, através da pesagem do material retido no filtro, sonda e ciclone determinou-se a quantidade de material particulado.

Para a amostragem de óxidos de nitrogênio os seguintes materiais, equipamentos e reagentes foram utilizados:

- Coluna de Mercúrio;
- Solução Absorvedora de NOx;
- NaOH 6,0 mol/L;
- Solução Ácido Fenoldissulfônico;
- Hidróxido de Amônio;
- Ácido Sulfúrico PA;
- Soluções padrões;
- pHmetro;
- Espectrofotômetro UV;

Assim como para a determinação do material particulado, os procedimentos de amostragem de óxidos de nitrogênio foram realizados conforme o descrito nas normativas CETESB (Anexos 1 a 7). Colocou-se em cada balão de vidro 25 ml da solução absorvedora, e em seguida foram feitas as coletas dos gases gerados. Após o tempo de repouso do gás no balão, este foi recolhido em frasco de polietileno, sofrendo a correção do pH para valores entre 9 e 12 e tendo o seu volume aferido. Foi gerada então a seguinte amostra:

- Amostra: Frasco de polietileno com pH corrigido.

Para essa determinação da quantidade de óxidos de nitrogênio, aplicou-se então o método colorimétrico, utilizando-se espectrofotômetro UV.

Finalmente, para a quantificação dos teores de oxigênio, dióxido de carbono e nitrogênio dos gases emitidos, coletados nos sacos de tedlar citados, utilizou-se como meio a dosagem volumétrica pela técnica de Orsat.

Complementar às análises já apresentadas neste estudo, como citado na Tabela 8, a análise do elemento filtrante após a finalização do período de testes foi realizada para os seguintes parâmetros:

- Gramatura;
- Permeabilidade;
- Resistência à tração;
- Alongamento;
- Análise visual;

A Figura 32 mostra o elemento filtrante escolhido aleatoriamente para os testes.



Figura 32: Elemento filtrante alvo dos testes.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tanto a análise dos gases quanto do elemento filtrante, juntamente ao acompanhamento dos dados de temperatura e pressão obtidos com o C.L.P. do sistema de tratamento de gases, permitiram chegar a uma série de conclusões e ponderações sobre o desempenho alcançado pelo filtro de mangas. O enfoque evidenciado neste trabalho sobre o coletor justifica-se pelo fato de o processo gerador dos gases ser comumente desempoeirado via úmida, possuindo a composição dos gases oriundos da caldeira alta umidade e altíssima geração de fagulhas incandescentes, fatores extremamente prejudiciais em filtrações via seca com elementos filtrantes em tecido.

4.1 Resultados de temperatura e pressão

Um dos principais fatores para que se possa atestar a possibilidade de utilização deste tipo de equipamento no tratamento de gases deste processo, são os valores de queda de pressão alcançados durante a operação em regime normal contínuo. Os valores de temperatura e pressão coletados durante o período de testes no sistema estão na Figura 33, onde T1 é a temperatura no trecho entre caldeira e ciclone, T2 é a temperatura na entrada do filtro e ΔP é a queda de pressão no equipamento (valores calculados são as médias aritméticas dos dados citados, dos dias da semana em que se realizou a coleta de dados).

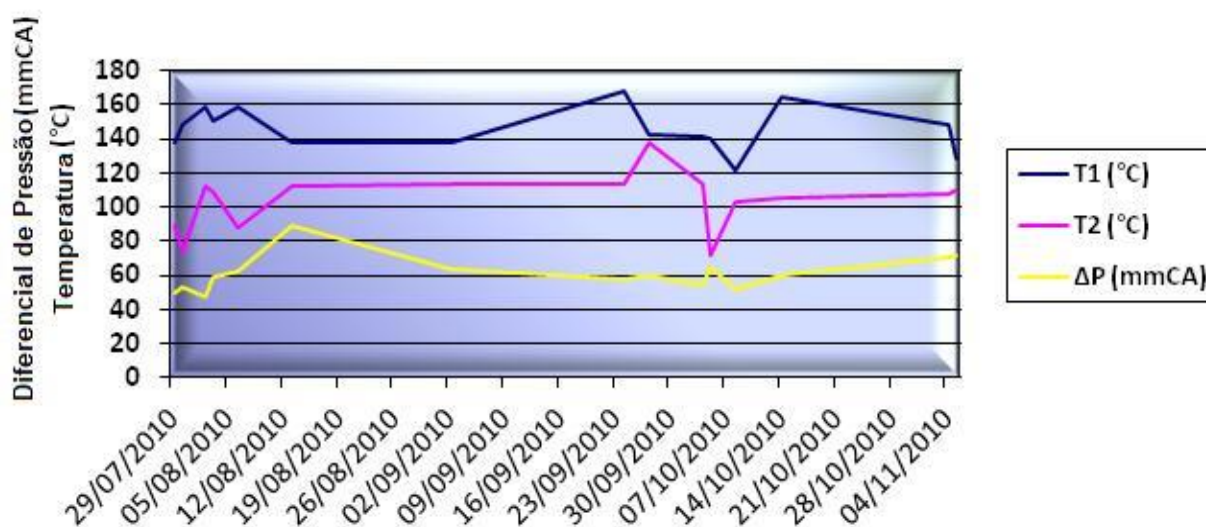


Figura 33: Dados coletados de pressão e temperatura.

Como pode ser observado, os valores de temperatura monitorados não apresentaram picos suficientes para que houvesse o acionamento da válvula de controle de fluxo para entrada de ar de diluição (ar ambiente) no fluxo de gases do circuito, visto que a temperatura máxima de projeto permitida no filtro de mangas era de 230°C. A variação nas temperaturas obtidas é justificada com a variação do combustível de alimentação da caldeira, ora alimentada com bagaço com maior teor de umidade ora com menor teor de umidade, alternando ainda entre bagaços com mistura possuindo menor poder calorífico ou maior.

Os valores das pressões monitorados foram mantidos, de acordo com a Figura 33, sempre abaixo de 90 mmCA, demonstrando uma das características principais dos coletores desta categoria, em acordo com trabalhos apresentados no capítulo 2, e que mostram ser uma queda de pressão não excessiva no equipamento.

Estes valores de queda de pressão viabilizam então a possibilidade de uma instalação com menor potência instalada, pois a perda de carga final do circuito (dutos, ciclone, filtro de mangas, duto de descarga) a ser suprida pelo ventilador centrífugo será também menor. Pode-se concluir então diante destes dados de queda de pressão coletados, que os valores de velocidade de ascensão dos gases na câmara suja e velocidade de filtração considerados são adequados para a aplicação em estudo, pois geraram em conjunto condições suficientes para o correto funcionamento do equipamento em detrimento da carga de pó a ser filtrada.

4.2 Níveis de eficiência alcançados

Analizado o funcionamento do filtro de mangas pelo âmbito dos dados de temperatura e pressão encontrados, é conveniente e necessário que se verifique a eficiência alcançada, fator preponderante para a boa operação de um equipamento de tratamento de gases, tendo como base o funcionamento demonstrado.

Para filtros de tecidos, que American Conference of Governmental Industrial Hygienists – Committee on Industrial Ventilation , (2001), mostra ter eficiência de mais de 99% para material particulado acima de 1 micron, uma das principais características é justamente os valores baixíssimos de emissão alcançados na saída do equipamento diante das crescentes requisições dos órgãos ambientais.

Nas Tabelas 9 e 10 estão dispostos os valores encontrados na coleta na entrada do filtro de mangas, enquanto que nas Tabelas 11 e 12 encontram-se os dados coletados na saída do equipamento.

A diferença presente entre as amostragens 1 e 2 para a concentração de particulado tem como causa a variação no combustível da caldeira, como citado para o caso da temperatura, possuindo este misturas de bagaço que no processo de combustão possam gerar maior ou menor quantidade de particulado.

Tabela 9: Análise dos gases e material coletado na entrada do filtro de mangas.

<i>Parâmetro</i>	<i>Amostragens</i>		<i>Média</i>
	<i>1</i>	<i>2</i>	
Concentração Condições Normais Base Seca (mg/Nm ³)	6.781	2.242	4.511
Concentração Corrigida a 7% O ₂ (mg/Nm ³)	10.432	3.375	6.904
Concentração Corrigida a 8% O ₂ (mg/Nm ³)	9.687	3.134	6.410
Concentração Corrigida a 11% O ₂ (mg/Nm ³)	7.452	2.410	4.931
Concentração nas Condições da Chaminé (mg/m ³)	3.431	1.137	2.284
Taxa de Emissão (kg/h)	21,63	7,15	14,39
Vazão Gases Condições Normais Base Seca (Nm ³ /h)	3.190	3.189	3.190
Vazão Gases nas Condições da Chaminé (m ³ /h)	6.304	6.289	6.297
Temperatura dos Gases (°C)	176	174	175
Isocinéticas Média (%)	100	97,5	98,8
Velocidade Média dos Gases (m/s)	26,5	26,5	26,5
Umidade dos Gases na Base Volumétrica Seca (%)	13,2	13,4	13,3
Teor de Dióxido de Carbono na Base Volumétrica Seca (%)	5,1	5,3	5,2
Teor de Oxigênio na Base Volumétrica Seca (%)	11,9	11,7	11,8
Teor de Nitrogênio na Base Volumétrica Seca (%)	83	83	83

Tabela 10: Análise de óxidos de nitrogênio na entrada do filtro de mangas.

Amostragem	Concentração	Concentração Corrigida de O ₂			Vazão do Gás nas	Taxa de
	Condições Normais	(mg/Nm ³)			Condições Base	Emissão
	Base Seca (mg/Nm ³)	7%	8%	11%	Seca (Nm ³ /h)	(kg/h)
1	204,4	314,5	292,1	224,7	3.190	0,652
2	237,7	365,6	339,5	261,2	3.190	0,758
3	191,1	293,9	272,9	209,9	3.190	0,609
4	268,9	413,8	376	289,2	3.190	0,858

Tabela 11: Análise dos gases e material coletado na saída do filtro de mangas.

Parâmetro	Amostragens		Média
	1	2	
Concentração Condições Normais Base Seca (mg/Nm ³)	21,94	10,98	16,46
Concentração Corrigida a 7% O ₂ (mg/Nm ³)	46,54	26,50	36,52
Concentração Corrigida a 8% O ₂ (mg/Nm ³)	43,22	24,61	33,91
Concentração Corrigida a 11% O ₂ (mg/Nm ³)	33,24	18,93	26,09
Concentração nas Condições da Chaminé (mg/m ³)	14,10	7,20	10,65
Taxa de Emissão (kg/h)	0,077	0,039	0,058
Vazão Gases Condições Normais Base Seca (Nm ³ /h)	3.519	3.555	3.537
Vazão Gases nas Condições da Chaminé (m ³ /h)	5.471	5.448	5.460
Temperatura dos Gases (°C)	101	102	101
Isocinéticas Média (%)	98,6	98,9	98,7
Velocidade Média dos Gases (m/s)	16,74	16,67	16,71
Umidade dos Gases na Base Volumétrica Seca (%)	6,54	4,89	5,72
Teor de Dióxido de Carbono na Base Volumétrica Seca (%)	3,20	2,7	2,95
Teor de Oxigênio na Base Volumétrica Seca (%)	14,4	15,2	14,8
Teor de Nitrogênio na Base Volumétrica Seca (%)	82,4	82,1	82,3

Tabela 12: Análise de óxidos de nitrogênio na saída do filtro de mangas.

Amostragem	Concentração	Concentração Corrigida de O ₂			Vazão do Gás nas Condições Base Seca (Nm³/h)	Taxa de Emissão (kg/h)
	Condições Normais Base Seca (mg/Nm³)	(mg/Nm³)				
		7%	8%	11%		
1	86,8	184,1	171	131,5	3.519	0,305
2	123,8	262,5	243,8	187,5	3.519	0,436
3	102,9	218,3	202,8	156	3.519	0,362
4	107,3	227,6	240,5	185	3.519	0,378

Para todas as considerações das amostragens nas Tabelas 9, 10, 11 e 12 os valores calculados são baseados em condições normais na base seca, os quais por não sofrerem correções fundamentadas em altitude local, densidade dos gases e porcentagem de O_2 presente devido ao excesso injetado para combustão dos resíduos na caldeira, proporciona maior precisão no cálculo da eficiência do filtro, sendo o cálculo da taxa de emissão (kg/h) orientado por esses valores.

Observa-se também pelos dados apresentados, que com a queda da temperatura ocorre uma correspondente queda da porcentagem de umidade presente nos gases com a condensação de parte do vapor d' água, o que demonstra situação já citada neste trabalho sobre a importância do isolamento térmico, de forma que o ponto de orvalho não seja atingido durante o circuito, e principalmente no filtro de mangas.

Esta situação traria como consequência a presença de água no estado líquido no tecido das mangas em quantidades acima do suportado, saturando o elemento filtrante e dificultando a passagem dos gases, resultando finalmente em uma maior queda de pressão no equipamento.

Para este caso específico, devido ao fato de que o equipamento opera em regime de 24 horas/07 dias por semana, e sofre paradas para manutenção a cada três meses, a preocupação em se atingir o ponto de orvalho mostra-se irrelevante visto que as temperaturas de operação ficam entre 70°C e 140°C.

Sendo a eficiência de um filtro de mangas, para coleta do material que se quer filtrar, definida como a diferença entre os valores de emissões de entrada e saída, dividida pelo valor da emissão de entrada, com base nos valores encontrados de emissão tanto para material particulado quanto para óxidos de nitrogênio é possível estimar os valores de eficiência alcançados pelo filtro de mangas durante a operação de filtração.

Nas Tabelas 13 e 14 são apresentados os resultados obtidos para as eficiências seguindo a premissa descrita.

Tabela 13: Eficiência do filtro de mangas para material particulado.

<i>Parâmetro</i>	<i>Amostragem 1</i>	<i>Amostragem 2</i>	<i>Média</i>
Taxa de Emissão (kg/h) - Entrada Filtro	21,63	7,15	14,39
Taxa de Emissão (kg/h) - Saída Filtro	0,077	0,039	0,058
Eficiência Filtro de Mangas (%)	99,64	99,45	99,55

A tabela 13 mostra claramente que o filtro de mangas utilizado, objeto de estudo deste trabalho, alcançou a eficiência típica para este tipo de coletor, demonstrando que os parâmetros de dimensionamento utilizados foram adequados, resultando entre outros fatores na formação da camada externa de pó na manga (torta) suficiente para que se atingisse a eficiência almejada com a menor queda de pressão possível, em acordo com Saleem e Krammer, (2007) e Saleem, et all, (2012).

Em outra frente, na Tabela 14, pode-se observar que a eficiência da filtragem para óxidos de nitrogênio é muito menor, porém os requisitos de emissões para este componente também são muito menores.

Tabela 14: Eficiência do filtro de mangas para óxidos de nitrogênio.

<i>Parâmetro</i>	<i>Amostragens</i>				<i>Média</i>
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	
Taxa de Emissão (kg/h) - Entrada Filtro	0,652	0,758	0,609	0,858	0,734
Taxa de Emissão (kg/h) - Saída Filtro	0,305	0,436	0,362	0,378	0,370
Eficiência Filtro de Mangas (%)	53,16	42,56	40,57	56,00	48,28

Atualmente a resolução CONAMA n° 382 de 26/12/2006 (Anexo 8) estabelece como limite de emissão para material particulado o valor de 200 mg/Nm³ e como limite de emissão para óxidos de nitrogênio o valor de 350 mg/Nm³, valores estes que não foram ultrapassados como pode ser visualizado nas Tabelas 11 e 12.

4.3 Análise do elemento filtrante

De forma a fornecer base de comparação entre as especificações técnicas do tecido e suas condições posteriores ao uso, a análise do elemento filtrante foi realizada em dois estados após a retirada da amostra do equipamento, sendo o primeiro com o tecido nas condições anteriores ao ciclo de limpeza do sistema jato pulsante e o segundo com o tecido nas condições após a atuação do sistema jato pulsante. Os resultados das análises dos elementos filtrantes encontram-se nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15: Resultados das análises dos elementos filtrantes (parte 1).

Especificação Técnica	Gramatura (g/m²)	Espessura (mm)	Permeabilidade (l/min.dm² à 20 mmCA)	Resistência à Tração Longitudinal (daN)	Resistência à Tração Transversal (daN)
	750	0,8	37	155	155
Resultados dos Ensaio					
Manga - Suja	787	1,05	17,2	123	167
Manga-Limpa	780	1,02	20,3	123	167

Tabela 16: Resultados das análises dos elementos filtrantes (parte 2).

Especificação Técnica	Alongamento Longitudinal (%)	Alongamento Transversal (%)
	10	10
Resultados dos Ensaio		
Manga - Suja	12	17
Manga - Limpa	12	17

Esta abordagem foi possível ao se realizar a simulação em laboratório do sistema de limpeza por jato pulsante através do uso de válvula diafragma de 1 ½" atuada por solenoide.

Com o auxílio dos dados das Tabelas 15 e 16 é possível atestar a formação da camada externa de pó (torta) com espessuras entre 0,25 mm e 0,22 mm, que Saleem e Krammer, (2007) e Saleem, et al, (2012), mostram estar dentro dos padrões normais para filtros de mangas. Verificaram-se valores coerentes de gramatura em decorrência da presença da membrana expandida de teflon (PTFE), que promove um menor acúmulo de particulado depositado sobre a superfície filtrante da amostra analisada devido à facilidade de desprendimento do pó.

Ao analisar-se a correspondência entre os resultados de gramatura, espessura e permeabilidade, é possível visualizar valores maiores de gramatura e espessura para as condições de manga suja com menor permeabilidade, e valores menores de gramatura e espessura com decorrente aumento da permeabilidade do tecido, mostrando claramente a atuação do sistema de limpeza. Os dados vão de encontro ao usual para aplicações com coletores tipo filtro de mangas, e são avaliados pelo teste de permeabilidade que demonstrou resultados dentro do esperado para meios filtrantes com membrana, atestando assim o uso de velocidade de filtração coerente a aplicação.

Os dados de resistência à tração e alongamento apontam boa resistência mecânica do tecido demonstrando a não ocorrência de modificações de ordem química e estrutural neste, situação esperada em um sistema que apresente o correto funcionamento. Outro ponto que pode ser notado são os valores maiores de alongamento transversal e resistência à tração transversal, atingidos após o uso do elemento filtrante no experimento, o que evidencia a fadiga do material causada pelo sistema de limpeza jato pulsante, atuante com vetor na direção transversal.

A análise visual, onde se confirmou a não presença de danos estruturais no tecido e particulado na face interna do elemento filtrante, em conjunto a todas as demais análises do elemento filtrante corroboram os resultados e dados obtidos a respeito de eficiência do equipamento e seu correto funcionamento.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- O Sistema de Filtragem a Seco mostrou-se viável tecnicamente, apresentando baixa pressão diferencial de 90 mmCA no filtro de mangas com eficiência de coleta acima de 99% para partículas acima de 1 micron. Observa-se que o menor valor de perda de pressão em relação ao sistema de filtragem via úmida com lavadores, proporciona a possibilidade de implantação de um sistema com menor potência instalada para as mesmas condições de volume de gases a serem tratados, mantendo os níveis de eficiência dentro das necessidades impostas pelos órgãos ambientais.
- Fatores como temperatura e composição dos gases mostraram-se compatíveis com a utilização do elemento filtrante escolhido, visto que este não apresentou alterações de ordem química ou física prejudiciais ao seu desempenho.
- A gaiola de sustentação com Venturi utilizada demonstrou estar dentro dos padrões e necessidades do filtro de mangas, proporcionando o resguardo à integridade física do elemento filtrante e atuando de forma a auxiliar e complementar o sistema de limpeza, realizando o papel relatado nos estudos do capítulo 2.
- Os valores de velocidade de ascensão e filtragem adotados com base em ensaios preliminares, demonstraram estar dentro do aceitável, pois observou-se formação da torta dentro do usual e funcionamento adequado do filtro no quesito coleta de particulado.
- Mostrando-se viável a utilização do sistema a seco para a aplicação requerida, outra importante observação é sobre a vantagem do

equipamento testado, que ao contrário do sistema úmido não gera efluentes líquidos que exigem posterior tratamento para que se chegue ao resíduo gerado de forma direta pelo sistema a seco, além de trabalhar com perda de pressão inferior ao sistema úmido como demonstra a Tabela 5.

É evidente que a regulação da caldeira influencia diretamente no equipamento de tratamento de gases, porém o sistema mostra-se funcional. Para aplicação em escala industrial, recomenda-se a adoção de parâmetros de dimensionamento e de proteção que previnam falhas na descarga de material acrescido de sistema de combate a incêndio. O Sistema de Filtragem a Seco, assim projetado, irá apresentar altas eficiências de filtragem.

Para esta mesma aplicação outros tipos de tecidos para os elementos filtrantes podem ser testados, visando novas possibilidades com custos e resultados diferentes dos deste trabalho. Os limites máximos das velocidades de ascensão e filtragem para que o filtro de mangas mantenha parâmetros de operação aceitáveis também podem ser verificados em trabalhos futuros, implementando-se um inversor de frequência no ventilador centrífugo para operação com valores de fluxo de gases variados no equipamento.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS – COMMITTEE ON INDUSTRIAL VENTILATION, “Industrial Ventilation: a manual of recommended practice”, 24a Edição, Cincinnati, Ohio, 2001.

BARBOSA, M.G.; TANAKA, R.M.; SILVA, C.L.; “Eficiência de Equipamentos de Tratamento de Gases em Caldeiras de Queima de Resíduos Sólidos - Estudo de Caso”. Artigo publicado no 7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, São Luis do Maranhão- Brasil, 2012.

BARBOSA, M.G.; SILVA, C.L.; “Eficiência de um Filtro de Mangas no Tratamento de Gases Oriundos de Caldeira de Queima de Biomassa Sólida”. Artigo publicado no 9º Fórum Ambiental - Alta Paulista, UNESP, Tupã- Brasil, 2013.

CAVASSENO, V.; “Industrial Air Pollution Engineering”. ”. [S.1.: s.n.], 1980.

CERON, L.P.; “Têxteis para a Construção de Elementos Filtrantes”.www.rennertextil.com.br, agosto 2009.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resoluções do CONAMA: resoluções vigentes publicadas entre julho de 1984 e novembro de 2008 – 2. ed. / Conselho Nacional do Meio Ambiente. – Brasília: Conama, 2008.

DASKALOPOULOS, E.; BADR, O.; PROBERT, S. D., Economic and Environmental Evaluations of Waste Treatment and Disposal Technologies for Municipal Solid Waste, Applied Energy, 1997.

FUJII, T.; MURAKAWA, T.; MAEDA, N.; KONDO, M.; NAGAI, K.; HAMA, T.; OTA, K.; “Removal technology of PCDDs/PCDFs in flue gas from MSW incinerators by fabric bag filter and SCR system”, Chemosphere Vol. 29, Nos. 9-11, pp. 2067-2070, 1994.

HOLANDA, M. R.; Perspectivas da Cogeração com Resíduos Sólidos Municipais sob a Ótica da Gestão Ambiental, Tese doutorado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, 2003.

INNOCENTINI, M. D. et all. "Permeability Optimization and Performance Evaluation of Hot Aerosol Filters Made using Foam incorporated Alumina Suspension", Journal of Hazardous Materials, v. 162, p. 212-221, 2009.

IVELL, D. M.; "The use of bag filters in a DAP plant", 1st International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry – SYMPHOS, Procedia Engineering 46 (2012) 83-88, 2011.

L'OFFLER, F.; DIETRICH, H.W. , Flatt, Dust Collection with Bag Filters and Envelope Filters, Friedr. Vieweg & Sons, Braunschweig/Wiesbaden, Germany, 1988.

LORA, E. E. S., Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte, Brasília, Aneel, 2000.

MANUAL DE NORMAS TÉCNICAS CETESB, Normas L9.210 – Análise dos Gases de Combustão Através do Aparelho Orsat , L9.221 – Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias – Determinação de Pontos de Amostragens, 1990.

MANUAL DE NORMAS TÉCNICAS CETESB, Normas L9.222 – Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias – Determinação da Velocidade e Vazão dos Gases, L9.223 – Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias – Determinação da Massa Molecular Seca e do Excesso de Ar do Fluxo Gasoso, L9.229 – Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias – Determinação de Óxidos de Nitrogênio, 1992.

MANUAL DE NORMAS TÉCNICAS CETESB, Norma L9.224 – Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias – Determinação da Umidade dos Efluentes, 1993.

MANUAL DE NORMAS TÉCNICAS CETESB, Norma L9.225 – Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias – Determinação de Material Particulado, 1995.

MACINTYRE, A.J.. “Ventilação Industrial”, 2ª Edição, Rio de Janeiro, LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1990.

MCINNES, R.; ROYEN, R.V. Desulfurizing fluegases. Chemical Engineering, 1990.

MCINNES, R.; JAMESON, K.; AUSTIN, D., Scrubbing Toxic Inorganics, Chemical Engineering, 1992.

MESQUITA, A.L.S.; GUIMARÃES, F.A.; NEFUSSI, N. “Engenharia de Ventilação Industrial”, 1ª Edição, São Paulo, Edgard Blucher Ltda, 1977.

POLETTTO, J.A.. Viabilidade Energética e Econômica da Incineração de Resíduo Sólido Urbano Considerando a Segregação para Reciclagem., Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, 2008.

SALEEM, M.; KRAMMER, G.. “Effect of filtration velocity and dust concentration on cake formation and filter operation in a pilot scale jet pulsed bag filter”, Journal of Hazardous Materials, 144 (2007) 677–681, 2007.

SALEEM, M.; KRAMMER, G.; KHAN, R.U.; TAHIR, M.S.; “Influence of operating parameters on cake formation in pilot scale pulse-jet bag filter”, Powder Technology 224 (2012) 28-35, 2012.

SANTOS, E. L.; Avaliação do “Conceito Bolha” Como Critério de Compensação Ambiental em Atividades Poluidoras de Ar Atmosférico – Estudos de Caso no Estado de São Paulo. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de São Carlos, 2004.

SCHNEIDER, V. E., REGO, R. de C.E., CALDART, V., Manual de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde. São Paulo: CLR Balieiro, 2001.

SEVILLE, J. et al; “Patchy Cleaning of Rigid Gas Filters”. Chemical Engineering Science, v.52, p. 153-164, 1997.

SICARI, M.P., Apostila Controle de Poluição do Ar – Gestão Ambiental, Apoio Projetos, 2003.

SILVA, C.L., Apostila de Tratamento Térmico de Resíduo Sólido, FEB - DEM UNESP, 1998.

SILVA, C.L., Tratamento Térmico de Resíduos, FEB - DEM UNESP, 1998.

SIMON, X.; CHAZELET, S.; THOMAS, D.; BÉMER, D.; RÉGNIER, R.; “Experimental study of pulse-jet cleaning of bag filters supported by rigid rings”, Powder Technology 172 (2007) 67-81, 2007.

STRAUSS, W.; “Industrial Gas Cleaning”. [S.1.]: Pergamon Press, Oxford, 1975.

TIENI, R. F.; “Filtração de Gases: Estudo do Fenômeno da Limpeza por Blocos”. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de São Carlos, 2005.

ZHOU, R.; SHEN, H.; ZHAO, M.; “Simulation studies on protector of pulse-jet cleaning filter”, International Conference on Future Energy, Environment and Materials, Energy Procedia 16 (2012) 426-431, 2012.

ANEXOS

- Anexo 1 – Parte da Norma CETESB L9.210
- Anexo 2 – Parte da Norma CETESB L9.221
- Anexo 3 – Parte da Norma CETESB L9.222
- Anexo 4 – Parte da Norma CETESB L9.223
- Anexo 5 – Parte da Norma CETESB L9.224
- Anexo 6 – Parte da Norma CETESB L9.225
- Anexo 7 – Parte da Norma CETESB L9.229
- Anexo 8 – Parte da Resolução CONAMA 382

Anexo 1



NORMA TÉCNICA

L9.210

Out/1990
5 PÁGINAS

Análise dos gases de combustão através do aparelho Orsat:
método de ensaio

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Avenida Professor Frederico Hermann Jr., 345
Alto de Pinheiros CEP 05459-900 São Paulo SP
Tel.: (11) 3133 3000 Fax.: (11) 3133 3402

[http: // w w w . c e t e s b . s p . g o v . b r](http://www.cetesb.sp.gov.br)

CETESB	ANÁLISE DOS GASES DE COMBUSTÃO ATRAVÉS DO APARELHO ORSAT Método de ensaio	L9.210 OUT/90
--------	---	----------------------

SUMÁRIO	Pág.
1 Objetivo.....	1
2 Norma complementar.....	1
3 Definições.....	1
4 Aparelhagem e reagentes.....	1
5 Execução do ensaio.....	2
6 Resultados.....	5

1 OBJETIVO

Esta Norma prescreve o método de ensaio para análise dos gases de combustão através do aparelho Orsat.

2 NORMA COMPLEMENTAR

Na aplicação desta Norma é necessário consultar a seguinte Norma CETESB:

- E17.010 - Aparelho Orsat para análise de gases de combustão.

3 DEFINIÇÕES

As definições necessárias à utilização desta Norma são as constantes da Norma CETESB E17.010.

4 APARELHAGEM E REAGENTES

4.1 Aparelhagem

4.1.1 Na aplicação deste método é necessária a utilização do aparelho Orsat (ver Figura 1), conforme norma E17.010.

4.2 Reagentes

4.2.1 Os seguintes reagentes são requeridos:

- a) para análise do dióxido de carbono - Frasco G₁:

- solução aquosa de hidróxido de potássio com concentração de 400 g/L. O poder de absorção desta solução de hidróxido de potássio é da ordem de 40 mL de dióxido de carbono por mililitro de solução;

Nota: Esta solução é preferida ao hidróxido de sódio por

que tem menos ação química sobre o vidro e não aumenta o carbono precipitado.

b) para análise do oxigênio - Frasco G_2 :

- solução aquosa de pirogalol com concentração de 400 g/L;
- solução aquosa de hidróxido de potássio com concentração de aproximadamente 360 g/L.

A solução da absorção do oxigênio é obtida misturando 75 mL da primeira solução com 125 mL da segunda ou na proporção de 3:5;

c) para análise do monóxido de carbono - Frasco G_3 :

- solução alcalina de cloreto cuproso. Dissolver 100 g de cloreto cuproso p.a. e 35 g de cloreto de amônio em 435 mL de água em um frasco de 1 litro. Adicionar 350 mL de solução de hidróxido de amônio ($d=0,88$), fechar o frasco e agitar vigorosamente até que a dissolução se complete. Armazenar a solução do frasco G_3 e adicionar aparas de cobre à garrafa e fechá-la bem. A exposição da solução ao ar deve ser a mínima possível.

Nota: Se o cloreto cuproso não se apresentar incolor, suspendê-lo na água e reduzi-lo borbulhando dióxido de enxofre através da suspensão; filtrar, lavar e secar, evitando o contato com o ar;

d) líquido confinante:

- solução de ácido sulfúrico (2N aproximadamente), contendo algumas gotas de alaranjado de metila ou outro indicador adequado.

5 EXECUÇÃO DO ENSAIO

5.1 Preparação da aparelhagem

5.1.1 Lavar e enxaguar cuidadosamente todos os componentes de vidro.

5.1.2 Montar o aparelho na moldura como mostrado na Figura 1, conectando seus componentes com tubos flexíveis inertes.

5.1.3 Conectar a mangueira do frasco nivelador A à extremidade do aparelho.

5.1.4 Lubrificar as torneiras, tomando cuidado para que não entre lubrificante nos capilares ou furos das torneiras. Não deve ser usa

da graxa de silicone.

5.1.5 Abrindo as torneiras F_1 , F_2 , F_3 e D, e retirando a rolha da parte posterior dos frascos G_1 , G_2 e G_3 , encher cada frasco de absorção com reagente apropriado até aproximadamente 60% de sua capacidade. Encher também o frasco A com aproximadamente 150 mL do líquido confinante.

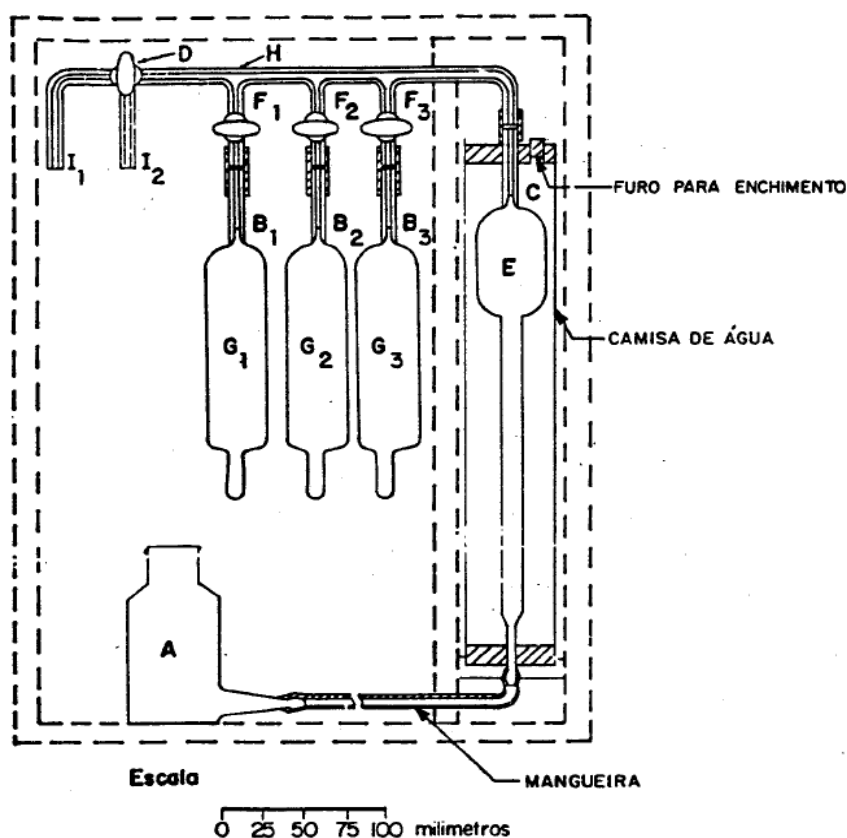


FIGURA 1 - Esquema do aparelho Orsat

5.1.6 É essencial manter os reagentes fora de contato com o ar. Um saco flexível contendo nitrogênio deve ser fixado na abertura da parte posterior dos frascos para fechá-los.

5.1.7 Fechar as torneiras F_1 , F_2 e F_3 , e encher a bureta E com líquido confinante até a marca C, movimentando adequadamente o frasco nivelador A. Em seguida, fechar a torneira D.

5.1.8 Com o nível do líquido do frasco A coincidindo com o nível do líquido da bureta E na marca C, abrir a torneira F_1 e abaixar vagaro

maneira constante e anotar então o valor do volume final absorvido.

5.3.3 Oxigênio - Transferir o gás para o frasco de absorção G_2 , abrindo a torneira F_2 , e repetir o procedimento igual ao de 5.3.2.

5.3.4 Monóxido de carbono - Transferir o gás para o frasco G_3 , abrindo a torneira F_3 , e repetir o procedimento de 5.3.2.

Nota: Quando a absorção do gás por um dos reagentes tornar-se lenta, substituí-lo.

5.3.5 Anotar os dados num formulário, como o da Figura 2.

Gás	Volume (mL)		
	Inicial	Após absorção	Diferença
CO_2	100		
O_2 (A)			
CO (B)			

(A) Volume inicial é o volume após absorção de CO_2 .

(B) Volume inicial é o volume após absorção de O_2 .

FIGURA 2 - Modelo de formulário

6 RESULTADOS

6.1 Calcular a porcentagem, em volume, dos componentes CO_2 , O_2 e CO, como segue:

$$\text{Porcentagem do componente} = V_2 - V_1$$

onde:

V_1 = leitura da bureta (mL), antes da remoção do componente

V_2 = leitura da bureta (mL), depois da remoção do componente.

6.2 Por diferença, calcular a porcentagem de N_2 .

6.3 Expressar a porcentagem de cada componente, com aproximação de 0,1%.

Anexo 2



NORMA TÉCNICA

L9.221

Jul/1990
7 PÁGINAS

Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação dos pontos de amostragem: procedimento

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Avenida Professor Frederico Hermann Jr., 345
Alto de Pinheiros CEP 05459-900 São Paulo SP
Tel.: (11) 3133 3000 Fax.: (11) 3133 3402

[http: // w w w . c e t e s b . s p . g o v . b r](http://www.cetesb.sp.gov.br)

CETESB	DUTOS E CHAMINÉS DE FONTES ESTACIONÁRIAS DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM Procedimento	L9.221 JUL/90
--------	---	------------------

SUMÁRIO	Pág.
1 Objetivo.....	1
2 Definições.....	1
3 Condições gerais.....	2
4 Condições específicas.....	3

1 OBJETIVO

1.1 Esta Norma fixa as condições exigíveis para a determinação de pontos de amostragem numa seção transversal de duto ou chaminé de fonte estacionária.

1.2 Esta Norma não é aplicável quando:

- a) o sentido do fluxo dos gases não é conhecido;
- b) o fluxo dos gases é ciclônico;
- c) o duto ou a chaminé têm seção transversal com menos de 0,070 m²;
- d) não for possível encontrar uma seção transversal que, entre dois distúrbios de fluxo sucessivos, fique depois de dois ou mais diâmetros do primeiro e antes de 0,5 ou mais diâmetros do segundo no sentido do fluxo. Caso o duto ou chaminé tenha seção retangular, o diâmetro aqui referido será o diâmetro equivalente (3.1).

Nota: Casos especiais terão seus resultados validados após estudo e aprovação pelo órgão oficial de defesa do meio ambiente.

2 DEFINIÇÕES

Para os efeitos desta Norma são adotadas as definições de 2.1 a 2.3.

2.1 Fluxo ciclônico

Aquele no qual as linhas de fluxo não são paralelas ao eixo longitudinal do duto ou chaminé.

2.2 Pitot

Instrumento constituído de 2 tubos paralelos com duas tomadas de pressão, uma no mesmo sentido do fluxo e a outra em sentido contrário (Ver Figura 1).

2.3 Boquilha

Componente móvel da sonda, por onde é captado o material a ser analisado (Ver Figura 2).

3 CONDIÇÕES GERAIS

3.1 Seleção da seção transversal

Para chaminés ou dutos de seção circular escolher uma seção transversal que fique a pelo menos 8 diâmetros internos a jusante e a pelo menos 2 diâmetros internos a montante de qualquer distúrbio de fluxo, tal como o causado por curva, expansão, contração, chama visível, entrada ou desvios. Caso isto seja impraticável, deve ser selecionada uma seção transversal que esteja a pelo menos 2 diâmetros internos a jusante e 0,5 diâmetro interno a montante de qualquer distúrbio de fluxo.

No caso da chaminé ou duto ter seção retangular, substitui-se o diâmetro interno pelo diâmetro equivalente D_{eq} , calculado como segue:

$$D_{eq} = \frac{2 \cdot c \cdot l}{c + l}$$

onde:

D_{eq} = diâmetro equivalente, em m

c = comprimento, em m

l = largura, em m

3.2 Ocorrência de fluxo ciclônico

Para verificação da ocorrência de fluxo deve-se:

- conectar um Pitot a um manômetro. Nivelar e zerar o manômetro;
- posicionar o Pitot em cada ponto da seção transversal. Considerar como referência 0° (zero graus) a posição em que os planos das aberturas forem perpendiculares à seção transversal;
- ler a indicação do manômetro. Se indicar 0 (zero), anotar o valor do ângulo (0°). Se der indicação diferente de 0 (zero), girar o Pitot até obter leitura nula no manômetro e anotar o ângulo de giro com aproximação de 1° ;
- calcular a média dos valores absolutos de todos os ângulos, incluindo aqueles onde a rotação não foi necessária (ângulo igual a zero). Se a média for maior que 10° , a condição é de fluxo ciclônico.

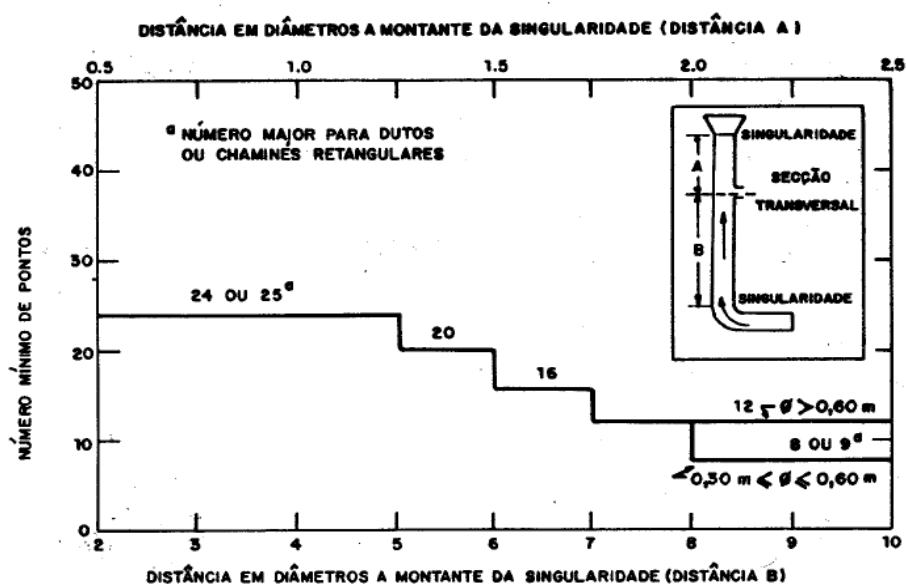


FIGURA 3 - Número mínimo de pontos para amostragem de material particulado

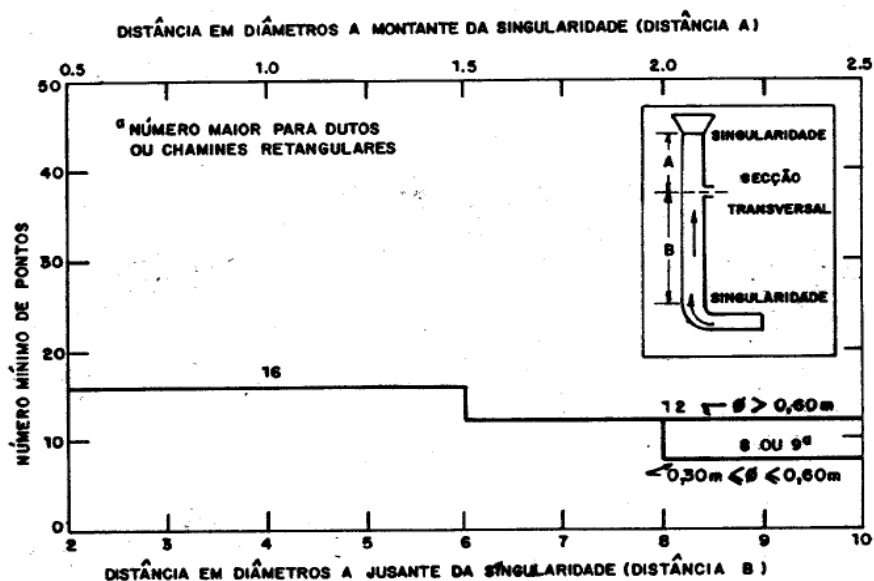


FIGURA 4 - Número mínimo de pontos para determinação de velocidade ou de vazão

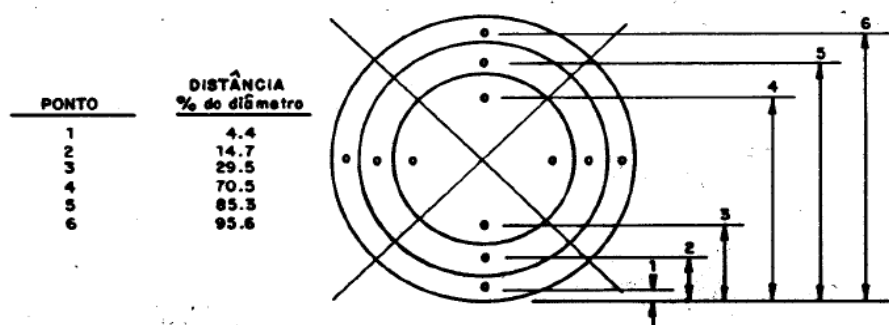


FIGURA 5 - Seção circular dividida em 12 áreas iguais, com a localização dos pontos



NORMA TÉCNICA

L9.222

Mai/1992
7 PÁGINAS

Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação da velocidade e vazão dos gases: método de ensaio

CETESB	DUTOS E CHAMINÉS DE FONTES ESTACIONÁRIAS DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE E VAZÃO DOS GASES Método de ensaio	L9.222 MAI/92
--------	--	----------------------

SUMÁRIO	Pág.
1 Objetivo.....	1
2 Normas complementares.....	1
3 Definições.....	1
4 Aparelhagem.....	2
5 Execução do ensaio.....	2
6 Resultados.....	4

1 OBJETIVO

1.1 Esta Norma prescreve o método de determinação da velocidade média e da vazão volumétrica média do fluxo gasoso em duto e chaminé de fonte estacionária, através do tubo Pitot.

1.2 Esta Norma não se aplica nos casos previstos na seção 1.2 da Norma L9.221.

Nota: Em casos especiais, ou quando se utilizam outros equipamentos, os resultados da medição devem ser validados pelo órgão oficial de defesa do meio ambiente.

2 NORMAS COMPLEMENTARES

Na aplicação desta Norma é necessário consultar as Normas CETESB:

- L9.221 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação dos pontos de amostragem.
- L9.223 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da massa molecular seca e do excesso de ar do fluxo gasoso.
- L9.224 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da umidade dos gases.
- E16.030 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Calibração dos equipamentos utilizados na amostragem de efluentes.

3 DEFINIÇÕES

Para os efeitos desta Norma são adotadas as definições de 3.1 a 3.4.

3.1 Pressão de velocidade

Pressão produzida pelo deslocamento de um fluido. Esta pressão é exercida

cida no mesmo sentido da velocidade do fluido. Também chamada pressão cinética.

3.2 Velocidade média

Média aritmética das velocidades numa seção transversal de um duto ou chaminé, medidas nos pontos de amostragem.

3.3 Vazão volumétrica média

Volume de um gás que passa através da seção transversal de um duto ou chaminé por unidade de tempo.

3.4 Condição normal (dos gases numa chaminé ou duto)

Temperatura de 0°C e pressão de 101 325 Pa (760 mmHg).

4 APARELHAGEM

A aparelhagem necessária compreende:

- a) tubo Pitot;
- b) medidor de pressão diferencial capaz de acusar uma variação de pressão de 12,7 Pa (1,3 mm c.a) ou micromanômetro para os casos em que as pressões encontradas forem inferiores;
- c) termômetro capaz de acusar uma variação menor ou igual a 1,5% da temperatura absoluta mínima da chaminé;
- d) manômetro capaz de acusar uma variação inferior ou igual a 333 Pa (34 mm c.a);
- e) barômetro de mercúrio, ou equivalente, capaz de acusar uma variação inferior ou igual a 333 Pa (2,5 mmHg).

5 EXECUÇÃO DO ENSAIO

5.1 Preparo do equipamento

5.1.1 Montar a aparelhagem conforme a Figura 1, e calibrá-la conforme E16.030.

5.1.2 Fazer o seguinte ensaio para verificar a existência de vazamentos:

- a) injetar ar através das aberturas do tubo de impacto até que o manômetro registre uma pressão de velocidade de pelo menos 745 Pa (76 mm c.a) e fechar a abertura de impacto. A pressão deve permanecer estável durante 15 segundos;
- b) adotar o mesmo procedimento do lado da pressão estática, só que succionando para obter a pressão de pelo menos 745 Pa (76 mm c.a).



NORMA TÉCNICA

L9.223

Jun/1992
6 PÁGINAS

Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação da massa molecular seca e do excesso de ar do fluxo gasoso: método de ensaio

CETESB	DUTOS E CHAMINÉS DE FONTES ESTACIONÁRIAS DETERMINAÇÃO DA MASSA MOLECULAR SECA E DO EXCESSO DE AR DO FLUXO GASOSO Método de ensaio	L9.223 JUN/92
--------	---	----------------------

SUMÁRIO	Pág.
1 Objetivo.....	1
2 Normas complementares.....	1
3 Definições.....	1
4 Aparelhagem.....	1
5 Execução do ensaio.....	2
6 Resultados.....	5

1 OBJETIVO

1.1 Esta Norma prescreve o método de determinação da massa molecular seca e do excesso de ar do fluxo gasoso de dutos e chaminés de fontes estacionárias, que contenham produtos de combustão.

Nota: Casos especiais terão seus resultados validados após estudo e aprovação pelo órgão oficial de defesa do meio ambiente.

2 NORMAS COMPLEMENTARES

2.1 Na aplicação desta Norma é necessário consultar:

- L9.210 - Análise de gases de combustão através do aparelho Orsat
- E17.030 - Aparelho Orsat para análise de gases de combustão.

3 DEFINIÇÕES

Para os efeitos desta Norma são adotadas as definições de 3.1 e 3.2.

3.1 Massa molecular base seca (de uma mistura de gases)

Somatório do produto da fração molar de cada componente pela respectiva massa molecular.

3.2 Excesso de ar

Quantidade de ar que excede a quantidade estequiométrica necessária para combustão completa.

4 APARELHAGEM

4.1 Amostragem integrada

4.1.1 Trem de amostragem para vazões de 500 e 1 000 cm³/min, compos

to basicamente de:

- a) sonda, conforme 4.1.1;
- b) condensador, capaz de reter a umidade sem remover O_2 , CO_2 , CO e N_2 ;
- c) válvula de agulha;
- d) bomba de vácuo;
- e) medidor de vazão, com fundo de escala na faixa de 500 a 1000 cm^3/min ; e
- f) saco impermeável aos gases, com capacidade de 5 a 10 litros.

4.1.2 Manômetro, capaz de medir pressões diferenciais de até 2 746 Pa (280 mm c.a.).

4.1.3 Vacuômetro com fundo de escala de 101 325 Pa (760 mmHg).

4.1.4 Aparelho de Orsat, conforme E17.010.

4.2 Amostragem instantânea

4.2.1 Sonda de material compatível com a corrosividade e temperatura do meio, equipada com filtro de lã de vidro, para retenção de material particulado.

4.2.2 Pera de borracha.

4.2.3 Aparelho de Orsat, conforme E17.010.

4.2.4 Condensador, capaz de reter a umidade sem remover CO_2 , CO e N_2 .

5 EXECUÇÃO DO ENSAIO

5.1 Amostragem integrada

5.1.1 Montar o equipamento como mostra a Figura 1 e verificar se todas as conexões estão livres de vazamento.

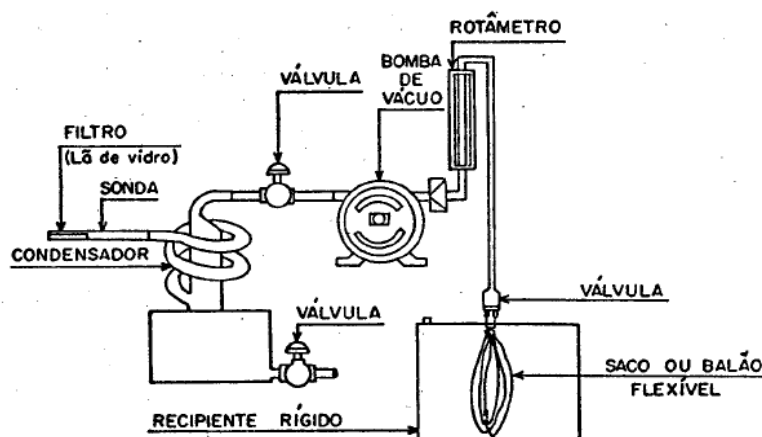


FIGURA 1 - Esquema do trem para amostragem integrada



NORMA TÉCNICA

L9.224

Ago/1993
14 PÁGINAS

Dutos e chaminés estacionárias - determinação da umidade dos efluentes: método de ensaio

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Avenida Professor Frederico Hermann Jr., 345
Alto de Pinheiros CEP 05459-900 São Paulo SP
Tel.: (11) 3133 3000 Fax.: (11) 3133 3402

[http: // w w w . c e t e s b . s p . g o v . b r](http://www.cetesb.sp.gov.br)

CETESB	DUTOS E CHAMINÉS DE FONTES ESTACIONÁRIAS	
	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DOS EFLUENTES	L9.224
	Método de ensaio	AGO/93

SUMÁRIO

- 1 Objetivo
- 2 Normas complementares
- 3 Definições
- 4 Aparelhagem
- 5 Execução do ensaio
- 6 Resultados

1 OBJETIVO

1.1 Esta Norma prescreve o método de determinação da umidade dos efluentes em dutos e chaminés de fontes estacionárias de poluição do ar.

1.2 Esta Norma prescreve quatro variantes do método: método de referência, método de fluxo saturado ou com gotículas, método aproximado, e método de bulbo úmido e bulbo seco. Devem ser escolhidos de acordo com as características do fluxo e/ou necessidades de precisão na informação.

1.2.1 O método de referência deve ser utilizado quando o fluxo não está saturado e/ou não contém gotículas.

1.2.2 O método de fluxo saturado ou com gotículas deve ser utilizado quando o fluxo está saturado e/ou contém gotículas.

1.2.3 O método aproximado pode ser utilizado nos casos em que se deseja uma informação prévia, sem muita precisão, como, por exemplo, para o estabelecimento das condições de amostragem. Este método só se aplica para fluxo não saturado e que não contém gotículas.

1.2.4 O método de bulbo úmido e bulbo seco pode ser utilizado nos casos em que se deseja uma informação prévia, sem muita precisão, como, por exemplo, para o estabelecimento das condições de amostragem.

Nota: Casos especiais terão seus resultados validados após estudo e aprovação pelo órgão oficial de defesa do meio ambiente.

Anexo 6



NORMA TÉCNICA

L9.225

Mar/1995
15 PÁGINAS

Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação de material particulado: método de ensaio

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Avenida Professor Frederico Hermann Jr., 345
Alto de Pinheiros CEP 05459-900 São Paulo SP
Tel.: (11) 3133 3000 Fax.: (11) 3133 3402

<http://www.cetesb.sp.gov.br>

CETESB	DUTOS E CHAMINÉS DE FONTES ESTACIONÁRIAS DETERMINAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO Método de ensaio	L9.225
		MAR/95

SUMÁRIO

- 1 Objetivo
- 2 Normas complementares
- 3 Definição
- 4 Aparelhagem
- 5 Execução do ensaio
- 6 Resultados

ANEXO A - Seleção de boquilha

ANEXO B - Cálculo da constante de proporcionalidade "K"

1 OBJETIVO

1.1 Esta Norma prescreve o método de determinação do material particulado no fluxo gasoso em dutos e chaminés de fontes estacionárias.

Nota: Casos especiais terão seus resultados validados após estudo e aprovação pelo órgão oficial de defesa do meio ambiente.

1.2 Esta Norma é complementar ao Decreto Estadual nº 8468, artigo 28, de 8/9/76.

2 NORMAS COMPLEMENTARES

Na aplicação desta Norma é necessário consultar:

- L9.221 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação de pontos de amostragem
- L9.222 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da velocidade e vazão dos gases
- L9.223 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da massa molecular seca e do excesso de ar do fluxo gasoso
- L9.224 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da umidade dos efluentes
- E16.030 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Calibração dos equipamentos utilizados na amostragem de efluentes.

3 DEFINIÇÃO

Para os efeitos desta Norma é adotada a definição 3.1.

3.1 Amostragem isocinética

Amostragem realizada em condições tais que o fluxo de gás na entrada do equipamento de amostragem tenha a mesma velocidade que o fluxo de gás que se pretende analisar.

4 APARELHAGEM

Para a execução do ensaio é necessária a aparelhagem descrita a seguir:

4.1 Aparelhagem para amostragem

4.1.1 Conjunto de boquilhas de aço inoxidável com bordas finas e cônicas, devendo serem aferidas e calibradas.

4.1.2 Sonda de material compatível com a corrosividade e temperatura do meio, provida de Pitot, de termopar e de sistema de aquecimento que evite a condensação de vapor durante a coleta.

4.1.3 Ciclone com Erlenmeyer.

4.1.4 Porta-filtro de material compatível com a corrosividade e temperatura do meio.

4.1.5 Sistema de aquecimento capaz de manter a temperatura de $120 \pm 10^\circ\text{C}$ no porta-filtro durante todo o período da coleta.

4.1.6 Condensador composto de quatro borbulhadores do tipo Greenburg-Smith ligados em série com conexões de vidro ou de outro material não contaminante, provido de termômetro na saída do quarto borbulhador, com menor divisão de 1°C . Os dois primeiros borbulhadores devem conter volumes conhecidos de água, o terceiro deve estar vazio e o quarto deve conter sílica-gel.

4.1.7 Banho de gelo picado ou outro sistema de resfriamento equivalente.

4.1.8 Sistema de medição e controle composto basicamente de:

- a) vacuômetro;
- b) válvulas de agulha para controle do fluxo;
- c) bomba de vácuo;
- d) gasômetro seco, provido de termômetros na entrada e saída com menor divisão de 1°C ;
- e) placa de orifício;
- f) dois manômetros diferenciais com fundo de escala de 2452 Pa (250 mmH₂O);
- g) barômetro com menor divisão de 266,6 Pa (2 mmHg);
- h) termômetro com menor divisão de 1°C , e cujo elemento sensível ou termopar é aquele acoplado à sonda (ver 4.1.2);
- i) cronômetro.

4.2 Aparelhagem para preparação e análise da amostra

4.2.1 Escova com comprimento um pouco maior que o da sonda.

4.2.2 Duas pissetas.

4.2.3 Frasco de vidro de borossilicato ou de polietileno.

4.2.4 Placas de Petri.

4.2.5 Cilindro graduado e balança, com precisão de 1 mL e 0,5 g, respectivamente.

4.2.6 Frasco para armazenar a sílica-gel.

4.2.7 Vidro de relógio.

Anexo 7



NORMA TÉCNICA

L9.229

Out/1992
10 PÁGINAS

Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação de
óxidos de nitrogênio: método de ensaio

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Avenida Professor Frederico Hermann Jr., 345
Alto de Pinheiros CEP 05459-900 São Paulo SP
Tel.: (11) 3133 3000 Fax.: (11) 3133 3402

[http: // www.cetesb.sp.gov.br](http://www.cetesb.sp.gov.br)

CETESB	DUTOS E CHAMINÉES DE FONTES ESTACIONÁRIAS DETERMINAÇÃO DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO Método de ensaio	L9.229 OUT/92
--------	---	------------------

SUMÁRIO	Pág.
1 Princípio e objetivo.....	1
2 Documentos complementares.....	1
3 Aparelhagem.....	2
4 Execução do ensaio.....	4
5 Resultados.....	9

1 PRINCÍPIO E OBJETIVO

1.1 Princípio do método

Os óxidos de nitrogênio são coletados em um frasco contendo uma solução de absorção de ácido sulfúrico diluído e peróxido de hidrogênio. Os óxidos de nitrogênio, com exceção do óxido nitroso (N_2O), são determinados por colorimetria, usando o método do ácido fenoldissulfônico.

1.2 Objetivo

1.2.1 Esta Norma prescreve o método de determinação de óxidos de nitrogênio no fluxo gasoso em dutos ou chaminés de fontes estacionárias.

1.2.2 A amplitude do método é de 2 a 400 miligramas de NO_x (como NO_2) por normal metro cúbico base seca, sem diluição da amostra.

Nota: Casos especiais terão seus resultados validados após estudo e aprovação pelo órgão oficial de defesa do meio ambiente.

2 DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

Na aplicação desta Norma é necessário consultar:

- L9.221 - Determinação de pontos de amostragem em duto ou chaminé de fontes estacionárias - Procedimento
- L9.222 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da velocidade e vazão dos gases - Método de ensaio
- L9.223 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da massa molecular seca e do excesso de ar do fluxo gasoso - Método de ensaio
- L9.224 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da umidade dos efluentes - Método de ensaio

Anexo 8



**MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE**

RESOLUÇÃO Nº 382, DE 26 DE DEZEMBRO DE 2006

Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.

O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, no uso das competências que lhe são conferidas pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto nº 99.274, de 6 de julho de 1990, e tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, anexo à Portaria nº 168, de 10 de junho de 2005, e

Considerando o disposto na Resolução CONAMA nº 05, de 15 de junho de 1989, que estabelece o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar-PRONAR;

Considerando os altos níveis de poluição atmosférica já alcançados, principalmente nas regiões metropolitanas, e seus reflexos negativos sobre a saúde, o meio ambiente e a economia;

Considerando a crescente industrialização de várias regiões do país com o conseqüente aumento do nível de emissões atmosféricas e da degradação da qualidade do ar;

Considerando a necessidade de compatibilização do desenvolvimento econômico-social com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico;

Considerando a necessidade de se estabelecer base de referência nacional sobre limites de emissão de poluentes atmosféricos, visando coibir excessos não condizentes com a defesa do meio ambiente;

Considerando a necessidade de se estabelecer estratégias para o controle e recuperação da qualidade do ar e a prevenção de sua degradação;

Considerando a necessidade de se estabelecer critérios orientadores para definição dos limites de emissão de poluentes atmosféricos e prover os órgãos ambientais de instrumentos adequados para análise de processos e licenciamento de empreendimentos;

Considerando que a poluição deve ser controlada na fonte, seja por meio de equipamentos de controle do tipo “fim de tubo”, seja utilizando processos menos poluidores, em razão do Princípio de Prevenção à Poluição;

Considerando que existem tecnologias disponíveis para a redução da emissão de poluentes para diversos processos produtivos;

Considerando que os estados possuem níveis diferenciados de industrialização e de poluição do ar, cabendo aos órgãos ambientais estaduais e locais estabelecerem, quando for o caso, limites de emissão mais restritivos;

Considerando que o atendimento aos limites de emissões de poluentes atmosféricos objetiva minimizar os impactos sobre a qualidade do ar e, assim, proteger a saúde e o bem-estar da população;

Considerando que a determinação de limites nacionais de emissão atmosférica deve também levar em conta seu custo e o impacto deste nas economias regionais, resolve:

Art. 1º Estabelecer limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.

Parágrafo único. Os limites são fixados por poluente e por tipologia de fonte conforme estabelecido nos anexos desta Resolução.

ANEXO III

Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de bagaço de cana-de-açúcar.

1. Ficam aqui definidos os limites de emissão de poluentes atmosféricos gerados em processos de geração de calor a partir da combustão de bagaço de cana-de-açúcar.

2. Para aplicação deste anexo devem ser consideradas as seguintes definições dos termos:

a) bagaço de cana de açúcar: subproduto da moagem da cana;

b) capacidade nominal: condição máxima de operação da unidade de geração de calor para a qual o equipamento foi projetado, determinada em termos de potência térmica, com base no poder calorífico inferior (PCI), calculada a partir da multiplicação do PCI do combustível pela quantidade de combustível queimado por unidade de tempo;

c) condições típicas de operação: condição de operação da unidade de geração de calor que prevalece na maioria das horas operadas;

d) plena carga: condição de operação em que é utilizada pelo menos 90% da capacidade nominal;

e) processo de geração de calor por combustão externa: processo de queima de bagaço de cana-de-açúcar, realizado em qualquer forno ou caldeira cujos produtos de combustão não entram em contato direto com o material ou produto processado.

3. Ficam estabelecidos, na tabela a seguir, os seguintes limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor, a partir da combustão externa de bagaço de cana-de-açúcar:

Potência térmica nominal (MW)	MP ⁽¹⁾	NOx ⁽¹⁾ (como NO ₂)
Menor que 10	280	N.A.
Entre 10 e 75	230	350
Maior que 75	200	350

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

N.A. - Não aplicável.

3.1. Em teste de desempenho de novos equipamentos, o atendimento aos limites estabelecidos deverá ser verificado nas condições de plena carga.

3.2. Na avaliação periódica, o atendimento aos limites estabelecidos poderá ser verificado em condições típicas de operação, a critério do órgão ambiental licenciador.

3.3. Para sistemas com potência de até 10 MW, poderá o órgão ambiental licenciador aceitar o monitoramento periódico apenas de monóxido de carbono, sendo que, neste caso, o limite máximo de emissão para este poluente será o estabelecido na seguinte tabela.

Potência térmica nominal (MW)	CO ⁽¹⁾
Até 0,05	6500
Entre > 0,05 e ≤ 0,15	3250
Entre > 0,15 e ≤ 1,0	1700
Entre > 1,0 e ≤ 10	1300

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