

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CÂMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA

DIOGO APARECIDO LOPES SILVA

**LAVADORES VENTURI NA COLETA DE PARTICULADOS FINOS
EMITIDOS COM A QUEIMA DE RESÍDUOS MADEIRÁVEIS:
INFLUÊNCIA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROCESSO NA
EFICIÊNCIA FRACIONÁRIA PARA PARTÍCULAS DE 0 A 10 μ m**

ITAPEVA - SP

JUNHO - 2009

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

DIOGO APARECIDO LOPES SILVA

**LAVADORES VENTURI NA COLETA DE PARTICULADOS FINOS
EMITIDOS COM A QUEIMA DE RESÍDUOS MADEIRÁVEIS:
INFLUÊNCIA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROCESSO NA
EFICIÊNCIA FRACIONÁRIA PARA PARTÍCULAS DE 0 A 10 μ m**

Trabalho de Graduação apresentado
ao Conselho de Curso de
Engenharia Industrial Madeireira do
Campus de Itapeva, Universidade
Estadual Paulista, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do
diploma de Graduação em
Engenharia Industrial Madeireira.

Orientadora: Prof. Dr. Maria Angélica Martins Costa

ITAPEVA - SP

JUNHO – 2009

Silva, Diogo Aparecido Lopes

S586l Lavadores Venturi na coleta de particulados finos emitidos com a queima de resíduos madeiráveis: Influência das principais variáveis de processo na eficiência fracionária para partículas de 0 a 10µm/
Diogo Aparecido Lopes Silva – – Itapeva, 2009
82 f.: il. 30 cm

Trabalho de Graduação do Curso Engenharia Industrial
Madeireira apresentado ao Campus Experimental de Itapeva –
UNESP, 2009

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

Banca examinadora: Prof. Ms. Francisco de Almeida Filho; Eng.
Cosimo Giovanni Rettl.

Inclui bibliografia

1. Ar – Poluição. 2. Controle de poluição – Indústria. 3. I. Título.
II. Itapeva - Curso de Engenharia Industrial Madeireira.

CDD 628.53

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UNESP – Campus Experimental de Itapeva.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
SUMÁRIO	iii
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	viii
NOMENCLATURA	ix
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 BIOMASSA COMO FONTE DE GERAÇÃO DE ENERGIA	4
3.2 POLUIÇÃO DO AR POR PARTICULADOS, EFEITOS SOBRE A SAÚDE HUMANA E MEDIDAS DIRETAS DE CONTROLE	7
3.2.1 Poluição do ar por particulados.....	7
3.2.2 Efeitos dos particulados sobre a saúde humana.....	10
3.2.3 Padrões da qualidade do ar.....	13
3.2.4 Medidas diretas de controle	14
3.3 LAVADOR VENTURI	18
3.3.1 Mecanismos de coleta.....	20
3.3.2 Vantagens e desvantagens dos lavadores Venturi.....	22
3.3.3 Variáveis de processo que influenciam na eficiência de coleta	23
3.3.4 Eficiência teórica de coleta	26
3.3.5 Eficiência real de coleta	29
4 METODOLOGIA	31
4.1 MATERIAL PARTICULADO	31
4.2 APARATO EXPERIMENTAL UTILIZADO	33
4.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	35
4.4 AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA.....	37

4.5 ESTUDOS REALIZADOS	39
5 RESULTADOS	40
5.1 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA FRACIONÁRIA DE COLETA.....	46
5.1.1 Efeito do diâmetro do particulado.....	46
5.1.2 Efeito da velocidade do gás no duto	48
5.1.3 Efeito da vazão de líquido	50
5.1.4 Efeito do comprimento de garganta	53
5.1.5 Efeito da geometria do lavador	55
5.1.6 Efeito do número de orifícios na garganta do lavador	57
5.1.7 Efeito da penetração do jato líquido	60
5.1.8 Comparação com os modelos da literatura	62
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
6.1 CONCLUSÕES	64
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS	66
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Investimentos no setor elétrico brasileiro de 1980 a 2000 (US\$ bilhões) (Fonte: FIESP/CIESP, 2001)	6
Figura 2 – Micrografia de Cenosferas de material particulado (Fonte: ALMEIDA FILHO, 2008).....	8
Figura 3 – Classificação dos particulados em partículas, grossa, fina e ultrafina (Fonte: DONALDSON <i>apud</i> ARBEX et al., 2004).....	9
Figura 4 – Mecanismos hipotéticos pelos quais a inalação de particulados finos e ultrafinos podem levar à morte de um indivíduo (Fonte: ARBEX et al., 2004)	11
Figura 5 – Esquema de um lavador do tipo Venturi em escala piloto	19
Figura 6 – Atomização do jato líquido de lavagem	20
Figura 7 – Ilustração dos principais mecanismos de coleta nos lavadores de gases	21
Figura 8 – Ilustração do jato de líquido na garganta do lavador. (a) jato não atinge o centro formando filme líquido na parede superior. (b) atomização com pouco filme líquido na região central da garganta. (c) jato excessivo com grande presença de filme líquido (Fonte: COSTA (2002)).....	24
Figura 9 – Mecanismo de coleta isocinética (Fonte: ALMEIDA FILHO, 2008).....	29
Figura 10 – Excesso de Material Coletado devido a alta velocidade de coleta (Fonte: ALMEIDA FILHO, 2008).....	30
Figura 11 – Perda de Material coletado devido a baixa velocidade de coleta (Fonte: ALMEIDA FILHO, 2008)	30
Figura 12 – Tabela com a distribuição granulométrica de uma amostra de particulado	32
Figura 13 – Ilustração da curva de distribuição granulométrica para o particulado estudado	33
Figura 14 – Vista geral do aparato utilizado.....	34
Figura 15 – Esquema do lavador Venturi de seção retangular.....	34
Figura 16 – Esquema do lavador Venturi de seção circular	35

Figura 17 – Gerador de pó utilizado no aparato experimental	36
Figura 18 – Gargantas utilizadas nos lavadores Venturi retangular e circular	37
Figura 19 – Sistema de amostragem isocinética	38
Figura 20 – Detalhes da sonda de amostragem utilizada	38
Figura 21 – Efeito do diâmetro do particulado no Venturi circular – garganta de 117mm, 1 orifício e velocidade do gás de 24m/s.....	46
Figura 22 – Efeito do diâmetro do particulado no Venturi retangular – garganta de 117mm, 1 orifício e velocidade do gás de 24m/s.....	47
Figura 23 – Efeito da velocidade do gás no Venturi circular – garganta de 64mm, partículas de 2,5 a 5 μ m e 2 orifícios.....	48
Figura 24 – Efeito da velocidade do gás no Venturi retangular – garganta de 64mm, partículas de 2,5 a 5 μ m e 2 orifícios.....	49
Figura 25 – Efeito da vazão de líquido na garganta do lavador circular – garganta de 117mm, partículas de 2,5 a 5 μ m e 1 orifício	50
Figura 26 – Efeito da vazão de líquido na garganta do lavador retangular – garganta de 117mm, partículas de 2,5 a 5 μ m e 1 orifício	52
Figura 27 – Efeito da vazão de líquido na garganta do lavador circular – garganta de 90mm, partículas de 0 a 2,5 μ m e 2 orifícios.....	53
Figura 28 – Efeito do comprimento da garganta para o lavador circular – velocidade de 20m/s e 1 orifício.....	53
Figura 29 – Efeito do comprimento da garganta para o lavador retangular – velocidade de 20m/s e 2 orifícios.....	54
Figura 30 – Efeito do comprimento da garganta para o lavador circular – 1 orifício e vazão de 0,6L/min.	55
Figura 31 – Efeito da geometria do lavador – garganta de 117mm, partículas de 2,5 a 5 μ m e 1 orifício	56
Figura 32 – Efeito da geometria do lavador – garganta de 117mm, partículas de 2,5 a 5 μ m e 2 orifícios.....	57
Figura 33 – Efeito do número de orifícios na garganta do lavador – garganta de 90mm, partículas de 5 a 10 μ m e vazão de 0,6L/min	58

Figura 34 – Efeito do número de orifícios na garganta do lavador retangular – garganta de 90 mm e vazão de 0,6l/min	59
Figura 35 – Efeito da penetração do jato líquido – velocidade do gás na garganta de 58, 64 e 70m/s e 1 orifício	60
Figura 36 – Efeito da penetração do jato líquido – velocidade do gás na garganta de 58, 64 e 70m/s e 2 orifícios	61
Figura 37 – Eficiência fracionária do Venturi circular comparada com modelos clássicos da literatura - garganta de 90mm, particulado de 2,5 a 5 μ m, velocidade do gás 20 m/s e 2 orifícios	62
Figura 38 – Eficiência fracionária do Venturi retangular comparada com modelos clássicos da literatura - garganta de 90mm, particulado de 2,5 a 5 μ m, velocidade do gás 20 m/s e 2 orifícios	63

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas

C	- Fator de correção de Cunningham (μm)
D	- Diâmetro médio da gota de Sauter (μm)
d_{or}	- Diâmetro do orifício contido na parede da garganta do lavador (mm)
f	- Fator empírico de Calvert
$f_{\text{E(dp)}}$	- Fração de partículas na entrada do lavador de diâmetro “dp”
$f_{\text{S(dp)}}$	- Fração de partículas na saída do lavador de diâmetro “dp”
K	- Fator empírico de Johnstone
ℓ^{**}	- Penetração do jato líquido de lavagem (mm)
L/G	- Relação entre a vazão de líquido utilizado para limpeza do gás e a vazão do gás que está sendo limpo (L^3/L^3)
m_{E}	- Massa de partículas coletadas antes do lavador Venturi (g)
m_{S}	- Massa de partículas coletadas após o lavador Venturi (g)
P	Pressão (Pa)
Q_{L}	- Vazão volumétrica de líquido de lavagem (m^3/s)
Q_{G}	- Vazão volumétrica de gás na garganta do lavador (m^3/s)
V_{G}	- Velocidade do gás na garganta do lavador (m/s)
V_{J}	- Velocidade do jato líquido de lavagem na garganta do lavador (m/s)

Letras gregas

β	- Fator de correção de Leith Cooper para queda de pressão
η_{d}	- Eficiência global de coleta (%)
η_{G}	- Eficiência fracionária de coleta (%)
μ_{G}	- Viscosidade do gás (cp)
μ_{L}	- Viscosidade do líquido (cp)
ρ_{G}	- Densidade do gás (g/cm^3)
ρ_{L}	- Densidade do líquido de lavagem (g/cm^3)
ρ_{p}	- Densidade da partícula em (g/cm^3)
σ	- Tensão superficial (dina/cm^2)
ψ	- Parâmetro de impactação inercial de Johnstone

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Mecanismos pelos quais os poluentes presentes na fumaça gerada na queima de biomassa podem aumentar o risco de doenças	10
Tabela 2 – Limites de emissão de particulados provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de derivados da madeira.....	14
Tabela 3 – Dados para a seleção de equipamentos de remoção de particulados	16
Tabela 4 – Equipamentos utilizados no controle de material particulado.....	17
Tabela 5 – Dimensões do lavador Venturi de seção retangular	35
Tabela 6 – Variáveis envolvidas na avaliação experimental da eficiência fracionária de coleta.....	40
Tabela 7 – Eficiência fracionária de coleta – lavador retangular (1 orifício de injeção de líquido).....	41
Tabela 8 – Eficiência fracionária de coleta – lavador retangular (2 orifícios de injeção de líquido).....	42
Tabela 9 – Eficiência fracionária de coleta – lavador circular (1 orifício de injeção de líquido).....	43
Tabela 10 – Eficiências fracionária de coleta – lavador circular (2 orifícios de injeção de líquido).....	44
Tabela 11 – Eficiência fracionária de coleta calculada pelos modelos matemáticos....	45

“Quem quiser ser líder, deve primeiro ser servidor.
Se você quiser liderar deve servir.”

Jesus Cristo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que sempre me ajudou e me guiou no meu caminho, nas minhas decisões e pela família que me concedeu.

Aos meus pais José Inácio e Maria Helena, que me geraram e criaram da melhor forma que estiveram ao seu alcance, sempre frisando a Honestidade, a Humildade, a Temor a Deus, a Educação e o Trabalho, através de ensinamentos e até “puxões de orelha”, os quais foram e são importantes na minha vida e formação como ser humano.

À orientadora Professora Maria Angélica Martins Costa, um dos grandes pilares na minha graduação. Agradeço por tudo que fez em pró do desenvolvimento do presente trabalho. Saiba que é um exemplo que sempre levarei comigo.

Ao Professor Francisco de Almeida Filho por toda orientação, conselhos e participação no primeiro estágio de minha vida. Saiba que o estágio realizado foi uma experiência valiosa, pois me ajudou a conseguir outras conquistas posteriores.

Ao colega Engenheiro Cósimo Giovanni Retll pela aceitação imediata do convite de fazer parte da minha banca de Trabalho de Graduação, mesmo com toda a carga de trabalho que já possui.

Aos colegas de pesquisa Rômulo, Marcão, Matheus, Tatuí, Glauton, Saulo, Bruno Lima e Bruno Santos, que sempre me ajudaram e guiaram durante os quase 3 anos de Iniciação Científica nesta área.

A todos os professores que tive durante a graduação, pelos conhecimentos assimilados, atividades acadêmicas desenvolvidas e experiências trocadas ao longo de todo este tempo.

Aos amigos pessoais Juscelino (Júnior), Arnaldo (Toco) e Eridson (Angolano) pela amizade verdadeira, confiança e admiração que conquistaram em mim.

Aos colegas de faculdade, pela ajuda e diversão que tivemos ao longo destes 5 anos em Itapeva.

Obrigado a todos e que Deus lhes abençoe!

RESUMO

No setor industrial, destaca-se a queima da biomassa para fins de geração de energia, aquecimento e produção. A queima da biomassa é uma fonte primária geradora de particulados finos, os quais além de poluir a atmosfera causam sérios problemas à saúde humana, pois o trato respiratório é afetado por sua presença. Estas partículas são emitidas pelos queimadores de biomassa e o impacto causado não está limitado apenas em sua emissão, mas também na emissão de uma ampla faixa de componentes tóxicos orgânicos e inorgânicos, emitidos como gases e que podem ainda serem adsorvidos por estas partículas. Visando controlar este tipo de poluição, usualmente utilizam-se equipamentos específicos de despoluição do ar, merecendo destaque o lavador Venturi. Este trabalho objetivou avaliar experimentalmente o desempenho de duas configurações de lavadores Venturi na coleta de particulados provenientes da queima de madeira. Nos estudos, utilizaram-se dois lavadores Venturi, um de geometria retangular e outro circular, sendo que a eficiência de coleta obtida em cada experimento foi analisada para particulados contidos numa faixa granulométrica de 0 a $10\mu\text{m}$ (faixa respirável). O material particulado era de diâmetro médio de $17,30\mu\text{m}$ e densidade de $2,49\text{g/cm}^3$. Analisou-se a eficiência de coleta variando a vazão de líquido entre 0,4, 0,6 e $0,8\text{L/min}$, o comprimento de garganta do lavador entre 64, 90 e 117mm , e as velocidades do gás contaminado por particulados de 20, 22 e 24m/s . Também foi analisado o efeito do número de orifícios de injeção de líquido na garganta do lavador, sendo que neste trabalho foram 1 e 2 orifícios. Por meio de sondas isocinéticas a corrente gasosa era amostrada, e com as amostras de particulado obtidas, calcularam-se as eficiências fracionárias de coleta. Os resultados de eficiência fracionária para partículas de até $2,5\mu\text{m}$ superaram os 90,00% em alguns casos, sendo que o Venturi retangular apresentou os melhores resultados. Os dados de eficiência fracionária de coleta foram comparados com modelos clássicos da literatura, onde foi observada a ineficiência destes modelos na predição dos dados experimentais.

Palavras-chave: Lavador Venturi, material particulado, queima de biomassa.

ABSTRACT

In the industrial sector, includes the burning of waste as wooden chip, sawdust and bark for generation of energy, heating and production. The burning of biomass is a primary source for generating fine particles, which besides polluting the atmosphere cause serious problems to human health, because the respiratory tract is affected by their presence. These fine particles are emitted by the burning of biomass and the impact is not limited only in its issue, but also the issue of a wide range of toxic organic and inorganic components, emitted as gases or adsorbed by particles. To control this type of pollution is usually used to control equipment, with the emphasis Venturi scrubber. This study aimed to experimentally evaluate the performance of two scrubbers in the collection of particles emitted in the burning of biomass. We used two scrubbers Venturi, rectangular and circular sections, and the collection efficiency obtained in each experiment was analyzed for particles in a size range from 0 to $10\mu\text{m}$ (respirable range). The particulate studied came from the burning of wood chips, an industry for energy, presenting diameter equal to $17,3\mu\text{m}$ and density of $2,49\text{g/cm}^3$. The analysis was based three speeds of current gas (20, 22 and 24m/s), three flow rates of liquid in the throat of the scrubbers (0,4; 0,6 and $0,8\text{L/min}$), and three length of the throat scrubber (64; 90 and 117mm). Was also examined the effect of the number of holes of injection of liquid in the throat of the scrubber, which in this study were 1 and 2 holes. Through isokinetic probes located at a point before and another after scrubber Venturi current gas was sampled. With the samples of particulate obtained by gravimetric analysis, it is estimated the fractional collection efficiencies of the scrubbers. The results of fractional for particles of efficiency of collection for particles smaller than $2,5\mu\text{m}$ exceeded the 90,00% in some cases, while the rectangular Venturi showed the best results. The results of fractional efficiency were compared with classical models of literature, which were inefficiency in predicting these experimental data.

Keywords: Venturi scrubber, particulate matter, burning of biomass.

1 INTRODUÇÃO

A poluição do ar consiste na presença ou lançamento de matéria e energia em quantidades que excedam os padrões de qualidade do ar estabelecidos pela legislação ambiental, e que desta forma, possam interferir negativamente no bem estar das pessoas, na vida das plantas e animais, no meio físico e na propriedade. Grande parte dos poluentes do ar provém principalmente da queima de combustíveis, para fins de transporte, aquecimento e produção industrial. Dentre os vários tipos de combustíveis disponíveis para consumo, vem recebendo cada vez maior destaque a utilização da biomassa, como os resíduos agrícolas, madeira e plantas como a cana-de-açúcar. Assim, com a crescente oferta de biomassa como fonte para geração de energia nas mais diversas atividades industriais, também cresce a preocupação das indústrias em investir no monitoramento e controle de suas emissões para a atmosfera, pois durante a queima da biomassa são emitidos além dos gases de combustão, partículas finas incombustas conhecidas como particulados, sendo que estas muito contribuem para o desencadeamento de uma série de doenças, visto que quando sua concentração no ar aumenta, sérios problemas de saúde ao homem acabam ocorrendo, já que seu trato respiratório acaba sendo atingido e seriamente afetado.

Visando o controle da emissão de particulados ao meio ambiente, são encontrados vários tipos de equipamentos de controle, como o lavador Venturi, o qual foi foco do presente trabalho. O lavador Venturi é um equipamento de despoluição do ar de alta eficiência e relativamente simples, tratando-se de um duto de seção transversal retangular ou circular, composto por três partes distintas: a seção convergente, a garganta e a seção divergente. Na seção convergente do lavador, ocorre a entrada do gás contaminado e inicia sua aceleração. Em seguida, o gás adentra na garganta do lavador, onde alcança sua maior velocidade, sendo que neste local normalmente ocorre ainda a injeção do líquido de lavagem através de orifícios localizados em sua parede. Em muitos casos este líquido é água ou outro composto que capture o contaminante do gás. O líquido de lavagem injetado sofre uma atomização na forma de *sprays*, formando gotas, as quais agem como coletoras das partículas poluidoras. Após a garganta do lavador, o gás atinge a seção divergente,

onde sofre a desaceleração e a recuperação parcial da queda de pressão. Logo após percorrer o lavador Venturi, o efluente líquido gerado é retirado do sistema, e o ar teoricamente limpo é emitido ao meio ambiente.

Em contato com as gotas coletoras, os particulados são coletados por vários mecanismos que ocorrem simultaneamente, sendo o mais evidente a impactação inercial, embora também outros possam exercer influência significativa. A maior ou menor influência dos mecanismos de coleta, esta atrelada as condições de processo no sistema, como diâmetro das partículas, velocidade do gás, vazão de líquido, dimensões das gotas e suas velocidades relativas.

Para se conhecer a eficiência de coleta dos lavadores Venturi na captura de particulados, pode-se realizar experimentos, onde através de estudos das variáveis de processo, é possível estimar com precisão a eficiência de coleta. Nesta predição, são consideradas além das referidas condições de processo que afetam os mecanismos de coleta, outras, como a distribuição das gotas no interior do lavador, comprimento da garganta, fração de filme líquido, penetração do jato de lavagem, geometria do lavador e número de orifícios existentes na garganta para entrada do jato líquido de lavagem. Neste trabalho, foram estudadas as seguintes variáveis: diâmetro do particulado, velocidade do gás, vazão de líquido, comprimento da garganta, geometria do lavador, penetração do jato líquido de lavagem e número de orifícios de injeção de líquido na garganta. Estas variáveis foram analisadas de forma ampla e crítica nos experimentos feitos, através de comparações e associações gráficas, no intuito de descobrir quais foram as mais relevantes e as que proporcionaram maiores níveis de eficiência de coleta quando utilizadas. Além da avaliação experimental, também foram feitas comparações entre os dados experimentais com resultados adquiridos mediante modelos matemáticos clássicos da literatura, que servem para prever a eficiência de coleta.

2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar experimentalmente o comportamento de lavadores Venturi de seções retangular e circular na coleta de particulados provenientes da queima de biomassa madeirável, perante o efeito dos principais fenômenos que afetam seu desempenho na coleta das partículas finas dispersas em corrente gasosa, utilizando para isto a amostragem isocinética, focando a eficiência do lavador para as partículas na faixa de 0 a 10 μ m e comparando os resultados experimentais obtidos com modelos teóricos clássicos da literatura.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão bibliográfica, pesquisando na literatura artigos científicos que analisem assuntos correlatos à queima de biomassa para geração de energia, poluição do ar por particulados e sobre lavadores Venturi, justificando desta forma, a importância e relevância do tema escolhido para o presente trabalho;
- Montar e manusear o módulo experimental, garantindo estabilidade nos experimentos realizados, utilizando para isso amostragem isocinética a fim de que o trabalho possa ser representativo;
- Obter as eficiências fracionárias para um lavador Venturi de geometria circular e retangular, para a faixa de particulados compreendidos entre 0 e 10 μ m, para três comprimentos de garganta, três vazões de líquido, três velocidades do gás e injeção de líquido de lavagem através de 1 e 2 orifícios;
- Tratar os dados experimentais de eficiência fracionária de modo a descobrir quais foram as variáveis de processo que mais a afetaram, e conseqüentemente, mais afetaram o desempenho do lavador;
- Tratar os dados obtidos nas análises efetuadas comparando-os com os resultados observados mediante modelos encontrados na literatura.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção mostra uma revisão de literatura referente aos assuntos relacionados à biomassa e geração de energia, poluição do ar por particulados e lavadores Venturi, pois estes temas se complementam e se correlacionam dentro deste trabalho.

3.1 BIOMASSA COMO FONTE DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Considera-se como sendo biomassa toda a matéria orgânica capaz de ao ser queimada, decomposta ou reciclada, gerar direta ou indiretamente alguma forma de energia. Desse modo, resíduos agrícolas, rejeitos animais e dejetos humanos, resíduos urbanos orgânicos e resíduos de plantas como o bagaço de cana e os provenientes dos processos de beneficiamento da madeira, podem ser utilizados como combustível em queimadores de biomassa, através da biodigestão ou outros processos tais como, pirólise, gaseificação ou queima direta (LANDIM *et al.*, 2001).

Em grande parte dos países desenvolvidos, hoje a biomassa já é responsável por mais de 40% do combustível consumido (LANDIM *et al.*, 2007). Segundo GRAUER e KAWANO (2008), no Brasil, o uso atual de biomassa como fonte energética vem se tornando cada vez mais expressivo nas empresas, atingindo cerca de 30% das necessidades energéticas nacionais sob a forma de:

- Lenha para queima direta nas padarias e cerâmicas;
- Carvão vegetal para redução de ferro gusa em fornos siderúrgicos e combustível alternativo nas fábricas de cimento do norte e do nordeste;
- Carburantes para indústrias químicas, onde no sul do país se queima carvão mineral, álcool etílico ou álcool metílico para este fim;
- Biogás, a qual é outra forma de aproveitamento da biomassa, sendo uma fonte abundante, não poluidora e barata de energia;
- Geração de vapor na produção de eletricidade, onde o bagaço de cana e outros resíduos como os madeiráveis, são amplamente utilizados nas usinas de açúcar e álcool e nas indústrias madeireiras, como nas de produção de painéis, serraria e papel e celulose, pois muitas vezes, não necessitam de outro tipo de combustível auxiliar em

seus processos produtivos, pelo contrário, ainda sobram grande parte destes resíduos energéticos para venda no mercado.

Em se tratando de biomassa madeirável, como folhas, cascas, cavaco, costaneiras e serragem, quando recebido o tratamento adequado, pode-se utilizá-la em sistemas de co-geração, como na secagem da madeira serrada, além de também atrair boa parcela dos empresários que buscam diversificação no mercado de energia elétrica. Segundo BRAND (2005), na geração de energia, o Brasil está entre os melhores exemplos de potencialidades que utilizam resíduos madeiráveis em seus processos, sendo que anualmente são gerados cerca de 60 milhões de toneladas. Além da queima direta, existem ainda diversos outros fins para o uso do resíduo da madeira, por exemplo, na França aproximadamente 2 milhões de toneladas são valorizados na forma de briquetes e pellets (BRAND, 2005). A biomassa madeirável pode ainda apresentar-se de forma combinada com outras substâncias químicas, como ocorre nas unidades de produção de papel e celulose, onde através do processo Kraft, é gerado um resíduo altamente combustível denominado licor negro, constituído por resíduos da madeira liberados na polpação química como carboidratos, lignina e extrativos, e por reagentes químicos como a soda e o sulfeto. O licor negro segundo GRAUER e KAWANO (2008), apresenta interessantes perspectivas para a produção combinada de energia elétrica e calor útil, tendo em vista seu alto desempenho energético, e a possibilidade de recuperação dos reagentes de polpação, quando este resíduo é queimado nas caldeiras de recuperação química.

No Brasil, sabe-se que ainda hoje a predominância energética existente é de origem hídrica. Contudo, a implantação de novas hidrelétricas nas bacias existentes carecem de altos investimentos (Figura 1), excessivo tempo de construção e implicam em promover impactos ambientais significativos que não devem ser negligenciados. Segundo relatório publicado pela Federação das Indústrias do Estado de São Paulo/Centro das Indústrias do Estado de São Paulo – FIESP/CIESP (2001), devido a estes empecilhos decorrentes, no país existe hoje uma força a favor do uso da biomassa como fonte de energia, pela sua vantagem de geração descentralizada

próxima aos pontos de carga, pelo interessante desempenho energético e pelos benefícios ambientais decorrentes da sua utilização.

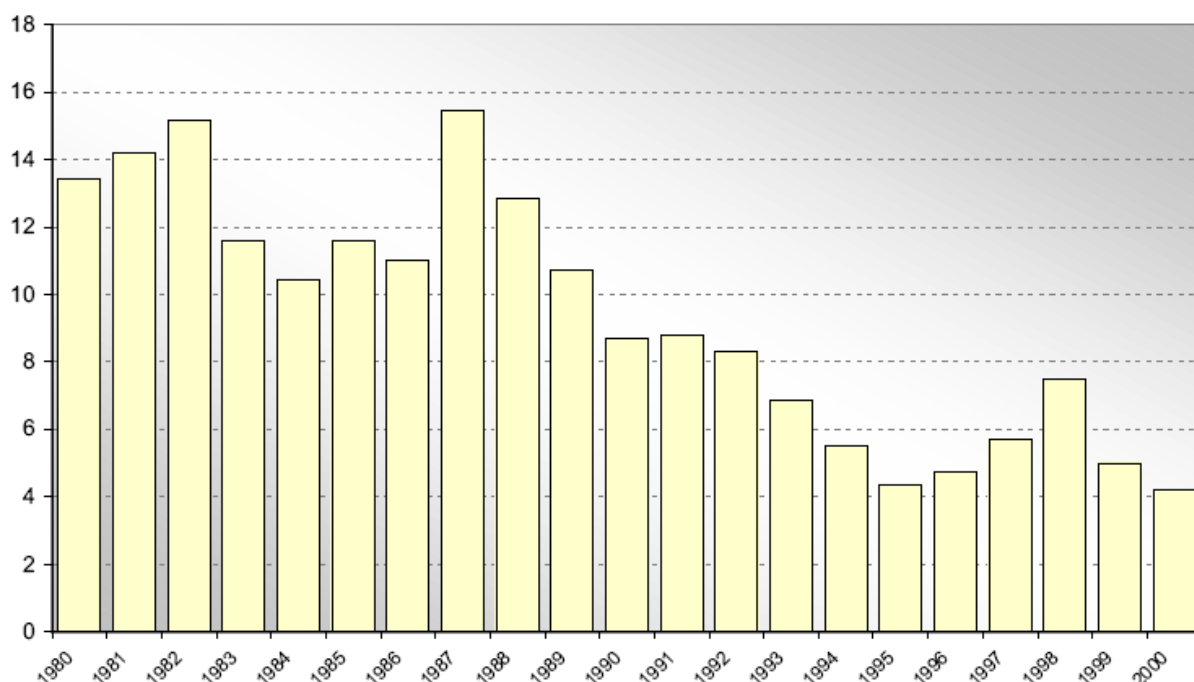


Figura 1 – Investimentos no setor elétrico brasileiro de 1980 a 2000 (US\$ bilhões) (Fonte: FIESP/CIESP, 2001)

Na Figura 1, é possível notar claramente o alto nível de investimento necessário na construção de hidrelétricas, sendo que nos últimos anos, os investimentos nestas construções diminuíram. Entretanto, apesar da notória queda de investimentos em hidrelétricas mostrada na Figura 1, atualmente novos projetos de expansão neste setor têm surgido, tendo em vista que apenas 24% do potencial hídrico brasileiro é utilizado. No Brasil o uso de biomassa como fonte alternativa para geração de energia elétrica ainda tem se mostrado inviável economicamente muitas vezes, o que tem dificultado investimentos neste setor, como afirmado pela própria Ministra da Casa Civil, Dilma Rousseff em 2006, durante palestra em Frankfurt na Alemanha, para empresários alemães e brasileiros durante conferência sobre investimentos em infra-estrutura e logística. A ministra afirma que: “As energias limpas têm prioridade para nós, mas não vamos prescindir de outras fontes. O Brasil volta a construir hidrelétricas, porque é a forma de energia mais barata” (HOFFMAN, 2006). Apesar da prioridade na construção hidrelétricas, a ministra diz que o investimento em usinas de biomassa são a segunda prioridade da matriz energética brasileira, e que somente com políticas mais

favoráveis de incentivo ao uso de biomassa e investimentos fortes em infra-estrutura é que este atual quadro energético poderá sofrer modificações mais significativas.

Em comparação com os combustíveis à base de petróleo, GRAUER e KAWANO (2008) mostraram que a utilização de resíduos de madeira para geração de energia tanto elétrica como em forma de vapor, em caldeiras ou fornos, apresenta algumas vantagens como:

- Baixo custo de aquisição;
- Não emite dióxido de enxofre;
- Cinzas menos agressivas ao meio ambiente que as de combustíveis fósseis;
- Menor corrosão dos equipamentos (caldeiras, fornos);
- Menor risco ambiental;
- Recurso renovável.

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

3.2 POLUIÇÃO DO AR POR PARTICULADOS, EFEITOS SOBRE A SAÚDE HUMANA E MEDIDAS DIRETAS DE CONTROLE

3.2.1 Poluição do ar por particulados

A Terra é coberta por uma camada de ar de aproximadamente 800 quilômetros de espessura, sendo que neste cobertor de ar vive o homem, o qual o respira cerca de 22

mil vezes por dia. Sabe-se que se este cobertor de ar fosse removido, o homem não sobreviveria mais do que cinco minutos (GALVÃO FILHO, 1989). Entretanto, atualmente o homem vem utilizando cada vez mais este recurso precioso para descartar a maioria dos seus resíduos ou contaminantes. Se esses contaminantes tiverem efeitos adversos, tais como interferir negativamente no bem estar das pessoas, na vida das plantas e animais, no meio físico ou na propriedade, estes são denominados poluentes de origem antrópica. Dentre os vários tipos de poluentes antropogênicos existentes destacam-se os gasosos, como particulados e gases de efeito estufa (CO , CO_2 , SO_2 , etc), pois podem percorrer centenas de quilômetros da sua emissão original, interagindo ainda com outros poluentes no caminho.

TIMOTHY e SEEN (2005) relata sobre os queimadores de biomassa, pois durante o processo de combustão, emitem finas partículas incombustas conhecidas como particulados ou *particulate matter* (PM), que são classificados segundo LORA (2002), como qualquer substância à exceção da água pura que existe em suspensão na atmosfera, com dimensões microscópicas ou submicroscópicas, porém maiores que as moleculares. Os particulados incluem poeiras, fumos, nevoeiro, aspersão e cerração (LORA, 2002). Estes poluentes são normalmente caracterizados como Cenosferas, partículas esféricas e geralmente ocas (Figura 2).

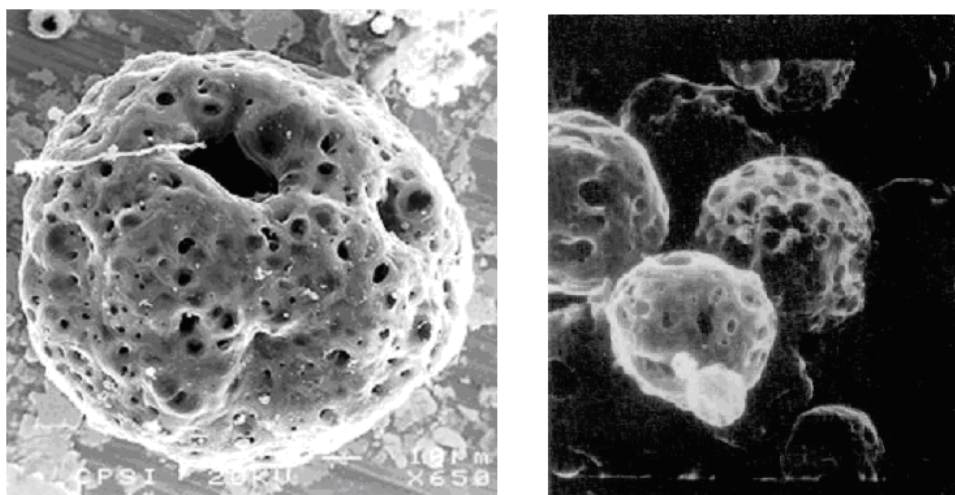


Figura 2 – Micrografia de Cenosferas de material particulado (Fonte: ALMEIDA FILHO - modificado, 2008)

A composição dos particulados é complexa e altamente variável, dependendo da natureza das fontes de emissão. Podem ser compostas por carbono, hidrocarbonetos derivados do carvão, cinzas inorgânicas produzidas pela combustão de combustíveis

sólidos, sulfato de amônio (pela conversão de dióxido de enxofre), emissões industriais de óxido de ferro (procedentes de siderúrgicas) ou poeira de cimento (pedreiras) (HOLLAND *et al.*, 1979 *apud* DUCHIADE, 1992). Entretanto, na queima dos resíduos madeiráveis, os particulados formados apresentam uma alta relação de carbono e hidrogênio, sendo conhecidos como *black Carbon*. A constituição básica do *black Carbon* é um núcleo de carbono elementar, onde podem agregar-se uma ampla faixa de componentes tóxicos orgânicos e inorgânicos, o que contribui deste modo ainda mais para a nocividade da emissão deste efluente gasoso ao ambiente. REBELATTO (2005) diz que o *black Carbon* é também de grande importância no estudo climático, pois pode atuar direta ou indiretamente. Alguns de seus efeitos diretos são: ausência de nuvens, retorno da luz solar para o espaço, redução dos movimentos convectivos e outros efeitos ocorrentes devida às propriedades específicas destas partículas, as quais influenciam nas mudanças climáticas, inclusive na intensificação do efeito estufa.

Ainda uma maior atenção deve ser dada à emissão dos particulados inferiores a 10µm de tamanho, que são os denominados finos e ultrafinos. A Figura 3 mostra a variação diametral dos particulados segundo DONALDSON (2001) *apud* ARBEX *et al.* (2004), classificando-os em partículas grossa, fina e ultrafina.

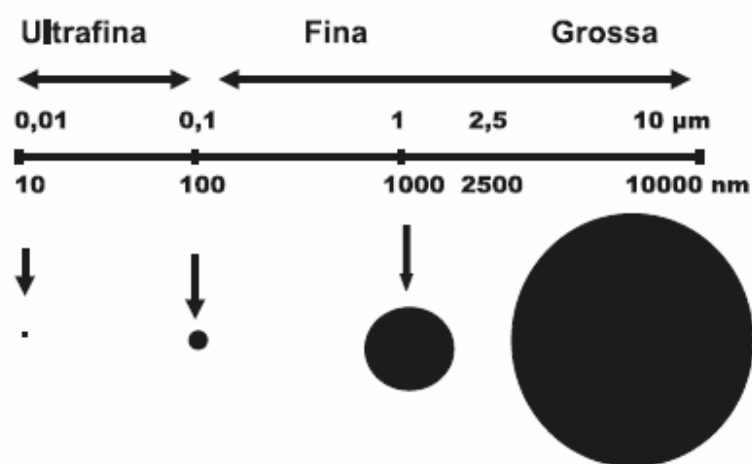


Figura 3 – Classificação dos particulados em partículas, grossa, fina e ultrafina (Fonte: DONALDSON *apud* ARBEX *et al.*, 2004)

As partículas acima de 10µm (grossas) são conhecidas como "poeiras" ou "grãos sedimentáveis" e costumam ser depositadas próximas à sua fonte de emissão,

normalmente indústrias; as partículas menores (fina e ultrafina), também denominadas de "fumo" ou "fumaça", possuem velocidade desprezível e podem, portanto, serem inaladas, sendo assim mais relevantes na etiologia de problemas respiratórios. As partículas finas e ultrafinas podem penetrar profundamente nos pulmões, com o risco de ali se acumularem, provocando diversos problemas de saúde nos seres vivos (ARBEX et al., 2004).

3.2.2 Efeitos dos particulados sobre a saúde humana

Quando a concentração de particulados aumenta na atmosfera, sérios problemas de saúde ao homem acabam ocorrendo, pois o trato respiratório é afetado. Segundo ARBEX et al. (2004), os particulados quando inalados pelo ser humano causam problemas como irritações, inflamações, exacerbação de crises de asma brônquica, infecções, entre outros (Tabela 1).

Tabela 1 – Mecanismos pelos quais os poluentes presentes na fumaça gerada na queima de biomassa podem aumentar o risco de doenças

Poluentes	Mecanismos	Efeitos potenciais a saúde
- Material Particulado (PM): partículas menores que 10µm, e sobretudo as menores que 2,5µm de diâmetro.	- Agudo: irritação, inflamação e aumento de reatividade brônquica. - Redução do transporte muco-ciliar. - Redução das respostas dos macrófagos e redução da imunidade local. - Reação fibriótica. - Descontrole autonômico, atividade pró-coagulante, stress oxidativo.	- Sibilos, exacerbação de crises de asma brônquica. - Infecções respiratórias. - DPOC (doença pulmonar obstrutiva crônica). - Exacerbações de DPOC.

Fonte: ARBEX et al. (2004)

Considerando a relação entre o diâmetro das partículas e sua precipitação nos alvéolos pulmonares, sabe-se que as partículas grossas (maiores que 10µm) são

depositadas na região nasal por impactação nos cabelos do nariz e nos desvios nas passagens nasais. Partículas finas e ultrafinas passam através da região nasal e são depositadas na traquéia bronquial e regiões pulmonares. A Figura 4 exibe uma representação esquemática de eventos hipotéticos que ocorrem no corpo humano após exposição às partículas finas e ultrafinas, levando a morte do indivíduo.

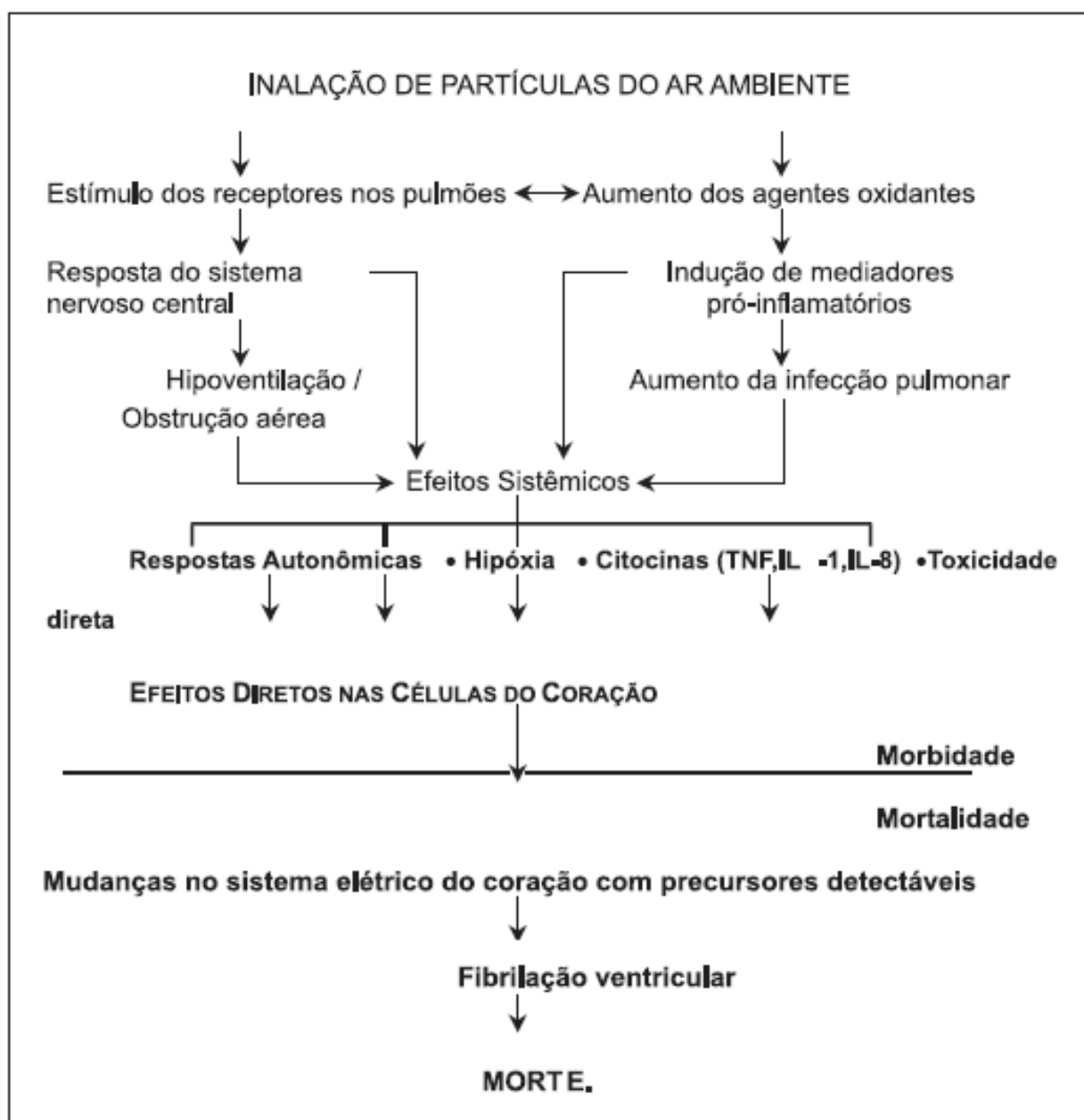


Figura 4 – Mecanismos hipotéticos pelos quais a inalação de particulados finos e ultrafinos podem levar à morte de um indivíduo (Fonte: ARBEX et al., 2004)

Conforme a Figura 4, quando os particulados finos e ultrafinos são inalados, estes são conduzidos pelo ar até as vias aéreas internas, podendo atingir em função de

seu diâmetro as vias mais profundas do sistema respiratório, os bronquíolos, intensificando a ocorrência de obstruções e infecções nesta região pulmonar. Os bronquíolos retendo estes materiais dificultam sua eliminação, o que desencadeia uma série de problemas respiratórios graves, podendo inclusive levar a morte do indivíduo através da fibrilação ventricular, a qual se trata de batimentos cardíacos irregulares.

Estudos de ABURTO e ROMIEU (1997) no México e CARVACHO *et al.* (2003) no Chile, revelaram que no período dos anos 80 e 90 os efeitos causados a saúde dos seres vivos pela emissão de particulados aumentavam o risco de ocorrência de doenças respiratórias crônicas e crises agudas respiratórias, além de hipertensão, problemas cardiovasculares e cancerígenos.

PREUTTHIPAN (2004) *apud* ALMEIDA FILHO (2008), mostra que quando os níveis de emissão de particulados inaláveis (PM10) ultrapassaram o permitido pelo padrão nacional de emissão em Bangkok, mais crianças asmáticas apresentaram coriza, espirros e congestão nasal, e mais crianças não asmáticas relataram algum dos sintomas. SALTHAMMER (2008) *apud* ALMEIDA FILHO (2008) comenta que: “um corredor de provas de resistência respira de duas a três vezes mais que o normal, com volumes totais cerca de quatro a seis vezes maiores. Respirando pela boca sem filtro nasal, os poluentes podem penetrar mais profundamente nas regiões do pulmão”. Este fato entre outros levou o Governo Chinês a propor uma trégua de emissão de poluição atmosférica durante a realização dos jogos olímpicos em 2008.

GOUVEIA *et al.* (2006), pesquisando sobre as hospitalizações por causa de doenças respiratórias e cardiovasculares associadas a contaminação atmosférica em São Paulo, em seus resultados mostra que as médias de PM10 e NO₂ ultrapassaram os padrões anuais de qualidade do ar no período estudado. Em relação às internações registradas, pôde-se observar que as doenças circulatórias em idosos vêm em primeiro lugar, seguidas das doenças respiratórias em crianças. As internações respiratórias em crianças corresponderam a cerca de 30% do total de internações observadas, enquanto as hospitalizações por doença isquêmica do coração em idosos representaram aproximadamente 14% das internações observadas nesse grupo. Verificou-se que um aumento de 10µg/m³ no nível diário de PM10 esteve associado a um aumento de 2,4% nas internações de crianças menores de 5 anos por doenças respiratórias, de 2,1% por

pneumonia e de 4,6% por asma. Um aumento de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ nos níveis de PM_{10} esteve associado a um incremento nas hospitalizações em idosos da ordem de 2,2% para doenças respiratórias e de 4,3% para DPOC (doença pulmonar obstrutiva crônica). Outros estudos foram desenvolvidos em diversas cidades como Curitiba e São José dos Campos, e a mesma relação entre doenças respiratórias, internações e a poluição do ar por particulados foram observadas.

3.2.3 Padrões da qualidade do ar

No Brasil os padrões da qualidade do ar definem legalmente o limite máximo para a concentração de um poluente na atmosfera. Os padrões nacionais foram estabelecidos pelo IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e aprovados pelo CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente, sendo que no estado de São Paulo, a CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental é a agência responsável pelo controle, fiscalização, monitoramento e licenciamento de atividades geradoras de poluição.

Os objetivos dos padrões de qualidade do ar visam:

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

No âmbito dos particulados, segundo a Resolução N°. 382 de 26 de Dezembro de 2006 que estabelece os padrões de emissão para processos de geração de calor e conversão de energia térmica, destaca-se as atividades de combustão externa de derivados da madeira, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites de emissão de particulados provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de derivados da madeira

Potência Térmica Nominal (MW)	MP ⁽¹⁾
Menor que 10	730
Entre 10 e 30	520
Entre 30 e 70	260
Maior que 70	130

Fonte: CONAMA RESOLUÇÃO Nº. 382, DE 26 DE DEZEMBRO DE 2006, Anexo IV.

Na Tabela 2, (1) diz que os resultados devem ser expressos na unidade de concentração (mg/Nm^3), em base seca e 8% de excesso de oxigênio (O_2 de referência). O termo derivados da madeira a qual a tabela se refere, no caso engloba madeira em forma de lenha, cavacos, serragem, pó de lixamento, casca, aglomerado, compensado ou MDF e assemelhados, que não tenham sido tratados com produtos halogenados, revestidos com produtos polimerizados, tintas ou outros revestimentos. Na tabela é mostrado que quanto maior a potência térmica nominal do queimador de biomassa, maiores são as restrições quanto a emissão de particulados ao meio ambiente, pois pressupõem-se que quanto maior a potência do equipamento, maior deverá ser o nível de desenvolvimento tecnológico do mesmo, e portanto, a combustão deverá ser mais eficiente, ou o mais completa possível, estando menos passível de geração de incombustos como os particulados.

Segundo a CETESB (2006), os padrões da qualidade referentes à emissão de particulados, não pode ultrapassar a média diária de $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ambiente, sendo que acima disto, o nível de qualidade não é aceitável, merecendo atenção e cabendo medidas corretivas de segurança. Acima de $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ o nível de qualidade do ar é tido como péssimo, estando em situação de emergência, sendo que toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Também pode ocorrer aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

3.2.4 Medidas diretas de controle

Diante do conteúdo apresentado até aqui, sobre as causas e os efeitos da emissão de particulados, não é difícil entender o porquê que o controle da poluição do ar tornou-se um tema de grande repercussão mundial nos dias de hoje, sendo centro de discussões e turbulência entre órgãos públicos, organizações especializadas no estudo do meio ambiente, empresas e também pela sociedade em geral, transformando-se dessa forma em objeto de amplos estudos quanto às medidas mais cabíveis de serem aplicadas para se controlar a emissão destes poluentes. Na óptica industrial, hoje não é mais possível se pensar em desenvolvimento sustentável sem citar a sustentabilidade dos recursos naturais, e entre eles o ar. Portanto, pensando no ar como recurso natural a ser zelado, observam-se cuidados e medidas usualmente adotadas por empresas no controle da emissão de particulados, como através da busca e implantação de tecnologias limpas, e adequando-se as exigências da legislação ambiental vigente. A indústria deve estar ciente de que precisa interferir positivamente em seu sistema de emissão de gases. Assim, uma das formas de controlar a emissão de particulados, está na adoção de medidas diretas, como a instalação de equipamentos capazes de reter o máximo, se não a totalidade dos poluentes antes destes serem emitidos ao ar.

Há muitos tipos e variações de equipamentos disponíveis para o controle da emissão de particulados, como ciclones, filtros de mangas, precipitadores eletrostáticos, lavadores Venturi, e outros. Segundo LORA (2002) estes equipamentos de controle são classificados primeiramente em função do estado físico do poluente a ser considerado. Em seguida, a classificação envolve diversos outros parâmetros como mecanismo de controle, uso ou não de água ou outro líquido, eficiência de coleta requerida pelo equipamento na remoção do poluente, etc, sendo que dentre estas características, a principal que irá influenciar na seleção do tipo de equipamento a ser escolhido, será a eficiência de coleta requerida, visando adaptar a emissão do poluente ao meio externo, segundo aspectos da legislação ambiental. Por outro lado, além da eficiência do equipamento, fatores como espaço requerido, consumo de água, consumo de energia, simplicidade ou complexidade de construção e operação, requisitos de manutenção, flexibilidade do sistema, aspectos de segurança, vida média, temperatura máxima de operação, limitação quanto à umidade, materiais de construção requeridos, disponibilidade no mercado, disponibilidade e qualidade da assistência técnica e

aspectos econômicos em geral, são todas variáveis também de grande relevância, que devem ser levadas em conta na efetuação da escolha do melhor equipamento a ser utilizado.

Também é comum a emissão de particulados junto aos gases tóxicos. Neste caso, além do controle da emissão dos particulados ao meio ambiente, deve existir a preocupação quanto à emissão destes gases poluidores. Os gases tóxicos representam a categoria de maior dificuldade de controle, devido à solubilidade dos agentes químicos no ar. Entretanto, grande parte dos equipamentos utilizados para o controle da emissão de particulados, também servem para controlar a emissão de gases tóxicos.

A Tabela 3 expõe valores usuais das eficiências de coleta e quedas de pressões de alguns equipamentos controladores da poluição do ar, em função das dimensões das partículas poluidoras consideradas no efluente gasoso.

Tabela 3 – Dados para a seleção de equipamentos de remoção de particulados

Equipamento	Dimensões das partículas (µm)	Queda de pressão (mm H₂O)	Grau de limpeza esperado	Eficiência global (%)
Ciclones	>10	25-75	80% em partículas < que 20 µm e mais de 95% para partículas > 50 µm.	85
Torres de nebulização	>3	50-175	98% em partículas > 5 µm e 50% para partículas < 3 µm.	95
Lavadores Venturi	0,3-1,0	375-750	90-95% para partículas < 5 µm.	99
Filtros de mangas	0,5-1,0	25-250	95-99% para partículas < 5 µm.	99
Precipitadores eletrostáticos	>0,001	6-12	De 80% até 99,9% para partículas < 5µm.	99

Fonte: LORA (2002)

A Tabela 4 mostra os principais tipos de equipamentos de controle de particulados subdivididos em dois grupos: os coletores secos e úmidos. Neste trabalho, o enfoque dado foi para o grupo dos coletores úmidos, pois estes englobam os equipamentos ditos Lavadores de Gases. Os lavadores de gases recebem grande destaque na literatura não somente pelo seu ótimo desempenho no controle da emissão de particulados, mas por poderem controlar simultaneamente poluentes particulados e gasosos.

Tabela 4 – Equipamentos utilizados no controle de material particulado

Coletores Secos	Coletores Úmidos
• Coletores mecânicos inerciais e gravitacionais • Coletores centrífugos • Precipitadores eletrostáticos secos • Precipitadores dinâmicos secos	• Lavadores com pré-atomização • Lavador com atomização pelo gás • Lavador de leito empacotado • Lavadores com enchimento • Precipitadores eletrostáticos úmidos • Precipitadores dinâmicos úmidos

Fonte: LORA (2002)

Os coletores úmidos como o próprio nome sugere, são os que operam com algum tipo de auxílio líquido, sendo em geral a água. Estes equipamentos recebem grande atenção por parte da indústria, pela facilidade de coleta do material poluente através do uso de líquido, e pela possibilidade de recuperação/reaproveitamento do poluente através da filtragem do efluente líquido, por exemplo, via floculação e/ou decantação dependendo do caso.

Segundo GUERRA (2009), os lavadores ou *scrubbers*, constituem uma classe de equipamentos muito importante dentro do grupo dos coletores úmidos, com ampla variedade de unidades disponível no comércio, como pode ser listado abaixo, conforme classificação realizada por THEODORE e BUONICORE (1988) e CALVERT (1984) *apud* LORA (2002).

Para THEODORE e BUONICORE (1988) *apud* LORA (2002), os lavadores podem ser classificados em três grandes grupos:

- Torres de nebulização;
- Instalações de leito empacotado;
- Lavadores Venturi.

Já para CALVERT (1984) *apud* LORA (2002), esta classificação pode ser detalhada da seguinte forma:

- Lavadores de bandeja;
- Lavadores com recheio mássico;
- Lavadores com recheio fibroso;
- *Sprays* pré-formados;
- *Sprays* nebulizados pelo gás;
- Lavadores centrífugos;
- Lavadores de chicanas e fluxo secundário;
- Lavadores de impacto;
- Lavadores acionados mecanicamente;
- Lavadores de leito em movimento.

A idéia da confecção de um lavador de gás surgiu com a observação de que a chuva podia limpar o ar poluído das cidades através da agregação de suas gotas às partículas tóxicas (GONÇALVES, 1997). Na prática industrial, os tipos de lavadores mais utilizados são os lavadores de bandejas e as diferentes variantes existentes dos lavadores Venturi, como os *sprays* pré-formados e os nebulizados pelo gás (GUERRA, 2009).

3.3 LAVADOR VENTURI

Um dos lavadores mais utilizados industrialmente no tratamento de efluentes gasosos é o lavador tipo Venturi. Este lavador de gás é um equipamento industrial que

visa limpar a corrente gasosa dos contaminantes, antes de sua emissão externa, trabalhando com um aumento da velocidade da corrente de ar em sua garganta, a fim de aumentar sua eficiência na coleta (COSTA, 2002).

O lavador Venturi é exigido em casos onde a eficiência deve ultrapassar 90% para partículas finas. A composição deste lavador consiste num duto de seção transversal circular ou retangular, distinto em três partes: a seção convergente, a garganta e a seção divergente (ou difusor) como mostrado na Figura 5.

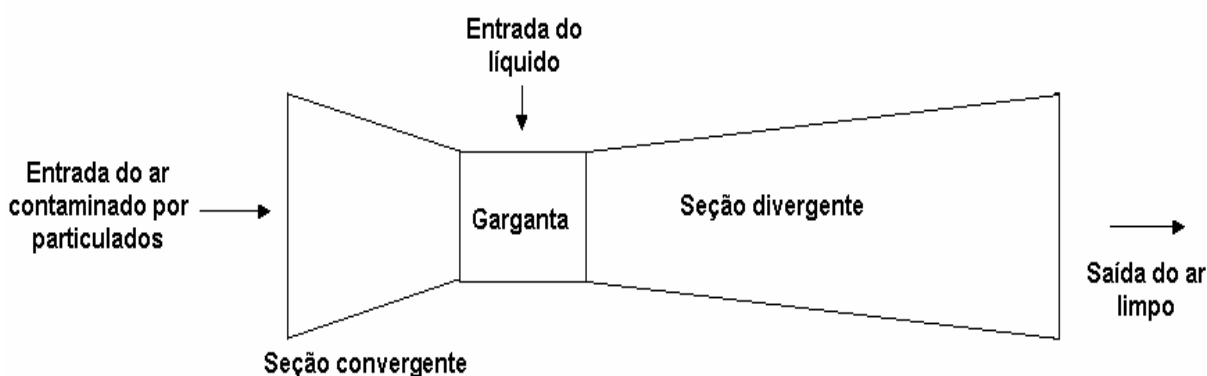


Figura 5 – Esquema de um lavador do tipo Venturi em escala piloto

A seção convergente fica no início do equipamento, e é por onde ocorre a entrada do gás contaminado por particulados e sua aceleração. Logo após a seção convergente, o gás adentra na garganta do equipamento, onde alcança sua maior velocidade podendo variar de 30 a 150m/s, sendo que neste local normalmente ocorre a injeção do líquido de lavagem através de orifícios localizados em sua parede. Em muitos casos este líquido é água ou outro composto que capture o contaminante do gás, como óleos ou soluções básicas, dependendo da natureza e afinidade do contaminante (GUERRA, 2009). Na seção divergente do lavador, sai o líquido de lavagem com o particulado coletado e o ar teoricamente limpo, desacelerado e com sua queda de pressão parcialmente recuperada. Após a seção divergente, um ciclone é utilizado para separar as gotas da corrente de ar, porém, este equipamento em nada afeta a eficiência de coleta do lavador Venturi (JOHNSTONE, 1954 *apud* COSTA, 2002).

Com a energia cinética do fluxo gasoso, o líquido de lavagem injetado atomiza-se na garganta do lavador na forma de *sprays*, como mostrado na Figura 6.

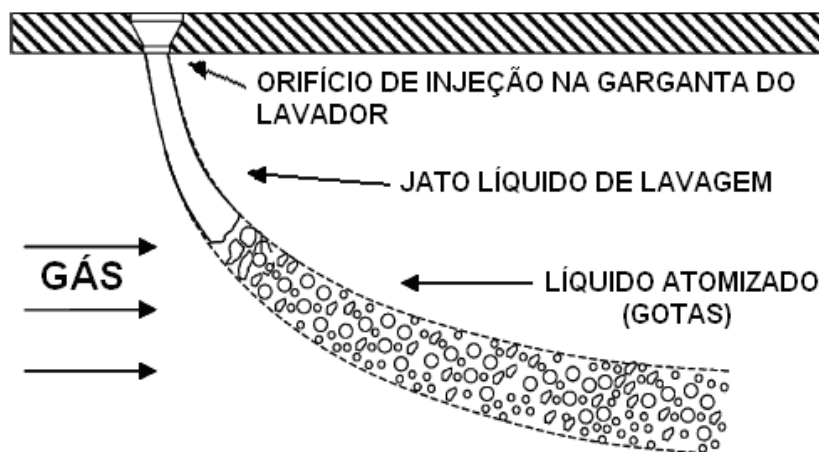


Figura 6 – Atomização do jato líquido de lavagem

Segundo ROBERTS e HILL (1983) *apud* COSTA (2002), a atomização do líquido de lavagem ocorre primeiramente com a formação de filamentos de gotas, devido ao descascamento e desintegração do jato líquido. Em seguida, ocorre a formação das gotas que podem ter dimensões entre 10 e 500 μ m (COSTA, 2005). Na atomização, pela turbulência do escoamento e alta velocidade do gás, ocorre um significativo aumento da área superficial do líquido de lavagem, o que faz com que haja um favorecimento da transferência de massa entre as fases gasosa e líquida, assim como, a coleta dos particulados pelas gotas (GUERRA, 2009).

3.3.1 Mecanismos de coleta

Segundo PLACEK e PETERS (1981) *apud* COSTA (2002), a coleta das partículas pelas gotas na garganta do Venturi é resultado de alguns mecanismos básicos: a impactação inercial, a interceptação direta, a difusão browniana e a gravidade (Figura 7), sendo que este último é pouco observado no estudo de lavadores Venturi pela alta velocidade do gás na garganta do lavador. Os particulados são coletados pelas gotas com a ação destes mecanismos ocorrendo simultaneamente, sendo o mais evidente a impactação inercial, e os efeitos da difusão e da interceptação direta sendo considerados de segunda ordem na maioria das aplicações dos lavadores Venturi. Para GUERRA (2009), a difusão é eficaz com partículas menores que 0,1 μ m, quando a velocidade relativa entre a partícula e a gota coletora é desprezível.

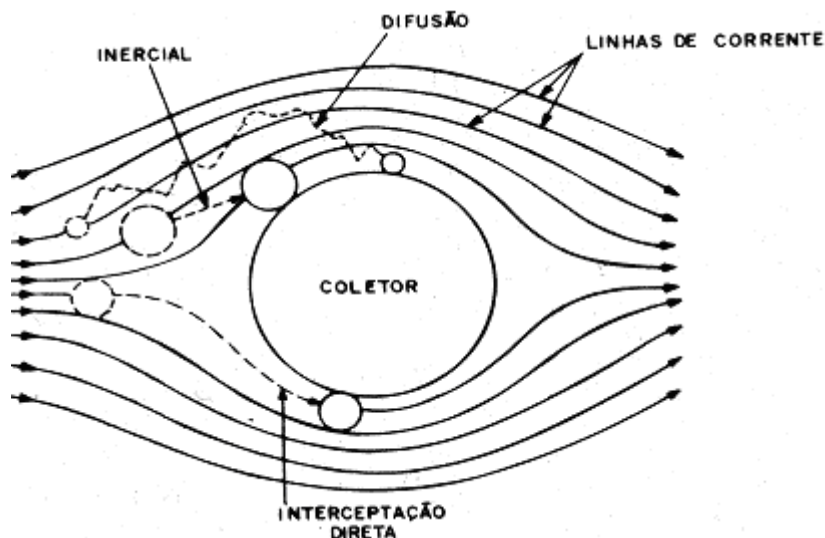


Figura 7 – Ilustração dos principais mecanismos de coleta nos lavadores de gases

Impactação inercial: É o fenômeno que ocorre quando a partícula poluidora em movimento no fluxo gasoso não consegue desviar junto à corrente gasosa e acaba se colidindo com a gota coletora, sendo assim absorvida pela mesma. Esse tipo de fenômeno ocorre com maior frequência com partículas relativamente maiores, e portanto, de maior inércia e também aumentando da velocidade do gás.

Interceptação direta: Resulta quando a partícula seguindo a linha de corrente é coletada devido ao seu centro passar pela superfície da gota. Esse mecanismo de coleta ocorre comumente quando a partícula em movimento tangencia a gota coletora.

Difusão browniana: Ocorre efetivamente para as partículas menores, caracterizando-se por movimentos aleatórios realizados pelas partículas, as quais não seguem as linhas de corrente, e assim, são coletadas eventualmente pelas gotas. Neste caso, as partículas poluidoras obedecem apenas o sentido do escoamento gasoso.

Gravidade: Pode alterar a trajetória normal das partículas nas linhas de corrente e deste modo fazer com que estas entrem em contato com as gotas. Este último mecanismo é identificado para baixas velocidades do gás, principalmente na garganta do lavador, fato este de ocorrência incomum em lavadores Venturi, o que torna deste modo pouco evidente a ação deste mecanismo.

Sobre mecanismos de coleta, são observados na literatura parâmetros utilizados para cálculos teóricos de eficiência de coleta de lavadores Venturi, como os números de Stokes, Peclet, Cunningham e Knudsen detalhados no trabalho de COSTA (2002), e que também serão revistos à frente neste trabalho.

3.3.2 Vantagens e desvantagens dos lavadores Venturi

Lavadores Venturi são aplicados no controle da emissão de particulados procedentes das indústrias químicas de produtos minerais, polpa e papel, alumínio, ferro e outros tipos de resíduos sólidos de origem tóxica, abrasiva, corrosiva e até mesmo explosiva (GUERRA, 2009). Também após caldeiras termoelétricas alimentadas com carbono, madeira e resíduos líquidos o lavador Venturi pode ser empregado. De acordo com GALVÃO FILHO (1989), em indústrias metalúrgicas nas operações de fundição, estes lavadores são largamente adotados, pois um problema sério na siderurgia em termos de poluição do ar e de saúde pública são as emissões das unidades de coqueificação e de recuperação de subprodutos coqueificados, em especial o benzeno, agente altamente tóxico. Portanto, pela versatilidade deste tipo de lavador de gás, são observadas muitas vantagens na aplicação industrial, como:

- Alta eficiência na coleta de partículas finas e ultrafinas (respiráveis);
- É compacto, exigindo menor espaço físico na sua instalação nas indústrias;
- Pode-se trabalhar com particulados explosivos, inflamáveis, pegajosos e aderentes, pelo fato de operar como coletores úmidos;
- Pode-se trabalhar com a limpeza simultânea de gases tóxicos e particulados;
- Possibilita o reaproveitamento do efluente líquido gerado, por trabalhar num sistema fechado;
- Pode operar no tratamento de gases a altas temperaturas e altas umidades.

Já algumas desvantagens são:

- Pode necessitar de um sistema de tratamento de efluentes líquidos;
- O material é coletado a úmido dificultando a sua reutilização;

- Mais suscetível a problemas de corrosão;
- Perda de carga alta para altas eficiências de coleta;
- Pode apresentar problemas de incrustação.

3.3.3 Variáveis de processo que influenciam na eficiência de coleta

A eficiência de coleta dos lavadores Venturi tem grande variabilidade com parâmetros de controle operacional do equipamento como:

- Diâmetro das partículas;
- Razão líquido gás (L/G);
- Dimensões e distribuição das gotas no interior do lavador;
- Comprimento da garganta do lavador;
- Fração de filme líquido que se deposita na parede do equipamento;
- Penetração do jato de líquido de lavagem;
- Geometria do lavador;
- Número de orifícios na garganta do lavador e outras.

Dentre todas as variáveis acima citadas, para muitos autores as mais relevantes seriam a vazão de líquido e a velocidade do gás, pois estas afetam diretamente a razão líquido/gás ou L/G, a qual é a relação entre a vazão de líquido utilizado para limpeza do gás e a vazão do gás que está sendo limpo (LORA, 2002).

PETERS e PLACEK (1981), VISWANATHAN (1997) e FATHIKALAJAHI et al. (1996) *apud* COSTA (2000) mostraram em seus trabalhos que aumentando a velocidade do gás na garganta a eficiência de coleta também aumenta. Este fato é devido ao aumento do número de gotas, ou seja, ao aumento da atomização do jato líquido de lavagem, o que eleva o contato das gotas com as partículas.

Nos estudos de GUERRA (2009), verificou-se que a vazão de líquido influencia significativamente no tamanho das gotas, sendo que vazões maiores geram jatos mais penetrantes na garganta, e ocasionam na maior interação entre o jato e a corrente de gás em alta velocidade, favorecendo a formação de gotas menores, o que em termos de

eficiência de coleta não é tão interessante, pois gotas menores captam menos particulado, e além disso, podem sofrer difusão browniana.

Quanto ao efeito do comprimento da garganta sobre a eficiência de coleta do lavador, sabe-se que a coleta por impactação inercial (principal mecanismo de coleta) ocorre na região de alta velocidade relativa gás-gota, ou seja, na garganta do lavador. OLIVEIRA e COURRY (1996) citam que existe um aumento da eficiência com o aumento do comprimento da garganta e que este aumento é função da vazão de líquido, sendo que quanto maior a vazão de líquido, menor o efeito do comprimento da garganta.

Para a penetração do jato líquido, ou seja, a distância em que o líquido penetra na corrente gasosa antes da atomização, COSTA (2002) afirma que jatos curtos ou muito longos, insuficientes ou excessivos na garganta, ocasionam eficiência de coleta deficiente, além da formação de filmes líquidos na parede do lavador, os quais são ineficientes para a coleta das partículas, e propiciam uma maior perda de carga durante o escoamento do gás. É preciso que esta penetração esteja dentro do limite da garganta do Venturi, o quão mais próximo possível de seu centro. A Figura 8 mostra três exemplos de penetração do líquido na garganta de um Venturi através de 1 orifício.

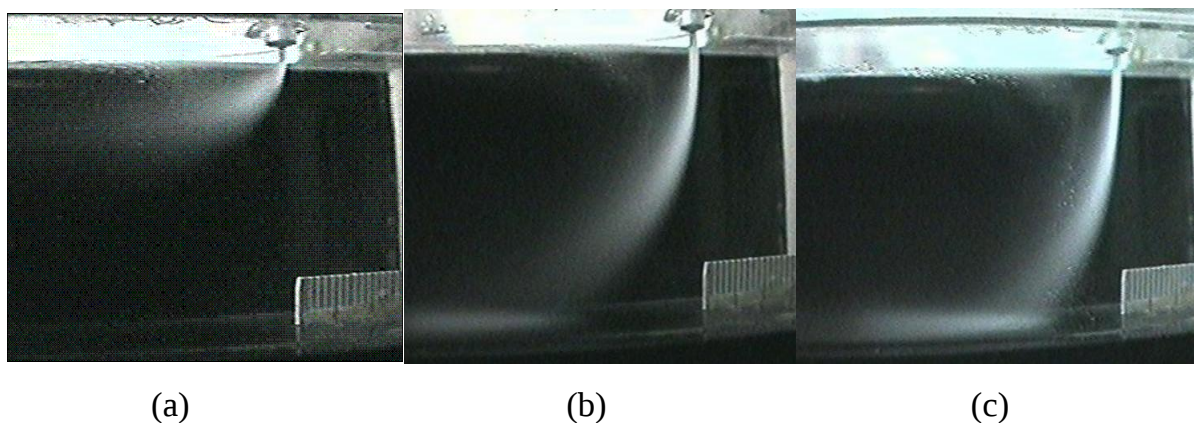


Figura 8 – Ilustração do jato de líquido na garganta do lavador. (a) jato não atinge o centro, formando filme líquido na parede superior. (b) atomização com pouco filme líquido na região central da garganta. (c) jato excessivo com grande presença de filme líquido (Fonte: COSTA (2002))

Ainda sobre a penetração do jato, o mecanismo pelo qual este se transforma em gotas é muito complexo e a ruptura pode ocorrer de inúmeras formas. Isso depende de vários fatores, tais como: a geometria do orifício, a velocidade relativa entre o jato

líquido e a corrente de gás no qual ele é injetado e as propriedades físicas do gás e do líquido (RAMAN, 1977 *apud* VISWANATHAN et al., 1983). Uma das formas de se medir a penetração do jato líquido de lavagem no interior do lavador é através de estimativas matemáticas, como mostrado a seguir. VISWANATHAN et al. (1983) desenvolveu seu modelo baseando-se no estudo realizado por ADELBERG (1967).

$$\frac{\ell^{**}}{d_{or}} = 0,1145 \frac{\rho_L \times V_J}{\rho_G \times V_G} \quad (1)$$

onde ℓ^{**} é a penetração do jato em mm, d_{or} o diâmetro do orifício contido na parede da garganta do lavador em mm, ρ_L a densidade do líquido em g/cm³, ρ_G a densidade do gás em g/cm³, V_J a velocidade do jato líquido na garganta em m/s e V_G a velocidade do gás na garganta em m/s.

Como mostrado na Figura 8, durante o processo de atomização do líquido, nem todas as gotas geradas contribuem na eficiência de coleta do equipamento, visto que, uma fração destas gotas deposita-se nas paredes do lavador formando um filme líquido. A presença de filme líquido nas paredes do lavador além de causar a diminuição da quantidade de líquido disponível para coleta de contaminantes, faz com que ocorra aumento na perda de carga dentro do lavador durante o escoamento do gás, devido ao atrito entre o gás e a superfície rugosa do filme. Esta perda de carga faz com que haja um aumento do custo operacional do lavador Venturi (GUERRA, 2009). Assim, o desempenho do lavador Venturi é diretamente afetado por este parâmetro de processo. Apesar disso, apenas um número limitado de autores estudaram e quantificaram este fenômeno, como VISWANATHAN et al (1984), VISWANATHAN et al (1997); VISWANATHAN (1998); GONÇALVES (2000) e COSTA (2002). São poucos os estudos que incluem os efeitos do filme líquido em modelos para lavadores Venturi. O motivo está na dificuldade em se descrever matematicamente este fenômeno (GUERRA, 2009).

Outras duas variáveis que vêm sendo bastante estudadas por autores na literatura são a distribuição e o tamanho das gotas formadas durante a atomização. Quanto mais

uniforme a distribuição das gotas no interior do Venturi, melhor tende a ser a eficiência de coleta, e gotas maiores, coletam maior quantidade de material particulado do que as gotas menores, sendo que as gotas podem variar até cerca de 500 μ m de tamanho (COSTA, 2002). Para GUERRA (2009), medir o tamanho das gotas através de métodos seguros é difícil, pois trata-se da medição do tamanho de gotas em *sprays*. Estas dificuldades incluem o grande número de gotas no *spray* formado, a alta velocidade das gotas, a ampla escala de tamanho das gotas e a mudança no tamanho delas com o tempo devido a certos fenômenos como a própria evaporação das mesmas. Assim, todos estes fatores devem ser levados em conta durante a escolha do método para medir os tamanhos das gotas coletoras.

Além das variáveis acima discutidas, existem outras variáveis associadas ao desempenho de lavadores Venturi as quais aqui não foram discutidas. A quantidade de orifícios contidos na garganta do lavador Venturi é uma delas, a qual ainda é pouco considerada nos trabalhos da área na literatura, porém, hoje sabe-se de sua influência significativa sobre a eficiência de coleta como mostrado no trabalho de GUERRA (2009), onde o autor afirma que o número de orifícios de injeção de líquido é um fator relevante no tamanho das gotas, pois o tamanho das gotas aumentam com o aumento do número de orifícios em funcionamento. Neste trabalho, a influência desta variável de processo no desempenho do lavador Venturi foi analisada criticamente, além dos efeitos da velocidade do gás, vazão de líquido, comprimento da garganta, geometria do lavador e diâmetro das partículas.

3.3.4 Eficiência teórica de coleta

Existem vários modelos matemáticos designados para a previsão da eficiência de coleta de lavadores Venturi, entre estes estão presentes os modelos de JOHNSTONE *et al.* (1954), CALVERT *et al.* (1977) e de LEITH E COOPER (1980) *apud* COSTA *et al.* (2004) cujos foram analisados na realização deste trabalho. Estes modelos foram propostos considerando apenas o parâmetro da impactação inercial como mecanismo relevante e desconsideraram variáveis como: não uniformidade do tamanho e distribuição das gotas, comprimento da garganta do lavador, filme líquido nas paredes

do equipamento, geometria do lavador e outros fatores de influência hoje provada como significativa.

Nos estudos de JOHNSTONE *et al.* (1954) *apud* COSTA *et al.* (2004) sobre lavadores Venturi foi obtida a seguinte equação para predizer a eficiência do lavador:

$$E = 1 - \exp.\left(-k \cdot \frac{Q_L}{Q_G} \cdot \sqrt{\psi}\right) \quad (2)$$

onde k é um fator empírico de Johnstone de valor entre 0,20 e 0,27, Q_L é a vazão de líquido de lavagem em m^3/s , Q_G a vazão de gás na garganta do lavador em m^3/s e ψ é o parâmetro de impactação inercial calculado por:

$$\psi = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot V_G \cdot C}{18 \cdot \mu_G \cdot D} \quad (3)$$

sendo ρ_p a densidade da partícula em g/cm^3 , d_p o diâmetro da partícula em μm , C o fator de correção de Cunningham em μm , μ_G a viscosidade do gás em cp e D o diâmetro médio da gota de Sauter em μm .

O fator de correção de Cunningham (C) é dado por:

$$C = 1 + \left(\frac{1,65 \cdot 10^{-7}}{d_p} \right) \quad (4)$$

Já para o diâmetro médio de Sauter (D) tem-se:

$$D = \frac{58600}{V_G} \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0,5} + 597 \cdot \left(\frac{\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma}} \right)^{0,45} \cdot \left(1000 \cdot \frac{Q_L}{Q_G} \right)^{1,5} \quad (5)$$

sendo σ a tensão superficial em $dina/cm^2$ e μ_L a viscosidade do líquido em cp .

CALVERT *et al.* (1977) *apud* COSTA *et al.* (2004) apresentaram novos modelos para predizer a eficiência do Venturi. Em suas análises consideraram que a eficiência

de coleta é uma função do parâmetro de impactação inercial (ψ) igual a metade do número de Stokes. A partir desta consideração, foi proposta a seguinte equação para prever a eficiência de coleta:

$$E = 1 - \exp \left[\frac{2 \cdot Q_L \cdot V_G \cdot \rho_L \cdot D}{55 \cdot Q_G \cdot \mu_G} F(\psi, f) \right] \quad (6)$$

sendo

$$F(\psi, f) = \frac{1}{2\psi} \cdot \left[-0,7 - 2\psi + 1,4 \ln \left(\frac{2\psi f + 0,7}{0,7} \right) + \left(\frac{0,49}{0,7 + 2\psi f} \right) \right] \quad (7)$$

Calvert utilizou f como uma variável que desempenha a função de um fator empírico de ajuste, cujo valor encontra-se entre 0,25 e 0,4.

Tratando matematicamente a teoria da penetração e a queda de pressão utilizada por Calvert, LEITH E COOPER (1980) *apud* COSTA *et al.* (2004) propuseram o seguinte modelo de eficiência de coleta:

$$E = 1 - \exp \left[-0,124 \left(\frac{f^2}{\beta} \right) N \right] \quad (8)$$

sendo

$$N = \frac{C \cdot \rho_p \cdot d_p^2 \cdot P \Delta_G}{18 \cdot \mu_G^2} \quad (9)$$

$$\Delta P_G = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_G^2}{\beta} \cdot \rho_L \cdot \frac{Q_L}{Q_G} \quad (10)$$

onde ΔP_G é a queda de pressão na garganta do Venturi e β o fator de correção para ΔP_G .

Além dos três modelos matemáticos citados, existem outros modelos mais completos como os de AZZOPARDI E GOVAN (1984), o de VISWANATHAN

(1984) e o de GONÇALVES (2000) *apud* COSTA (2002), onde foram acrescentadas outras variáveis relevantes, e elevado o nível de complexidade em termos de cálculos. O modelo de Calvert na indústria, pela sua menor complexidade em termos de cálculos, ainda é bastante utilizado (LORA, 2002).

3.3.5 Eficiência real de coleta

A eficiência real de coleta pode ser obtida baseando-se em testes experimentais. Nestes experimentos, um procedimento aceitável e representativo perante normas técnicas e comunidade científica é a chamada Amostragem Isocinética. Segundo ALMEIDA FILHO (2008), a amostragem isocinética de particulados consiste na coleta de uma fração do volume de gás em movimento confinado, seja em dutos ou chaminés, de forma a obter uma fração representativa do fluxo total. O coletor desta amostra é uma sonda, de área de coleta dimensionada de acordo com as características do fluxo gasoso a ser medido, e que opera em conjunto a um controlador de fluxo de amostragem, de forma a se obter um valor de velocidade de amostragem igual a velocidade do gás no confinamento. Sendo assim, defini-se amostragem isocinética como a situação onde a coleta do particulado é feita sem alterar a velocidade do gás confinado, de forma a ter uma amostra que será composta de material cuja trajetória coincida com a área de coleta, de acordo com a figura que segue.

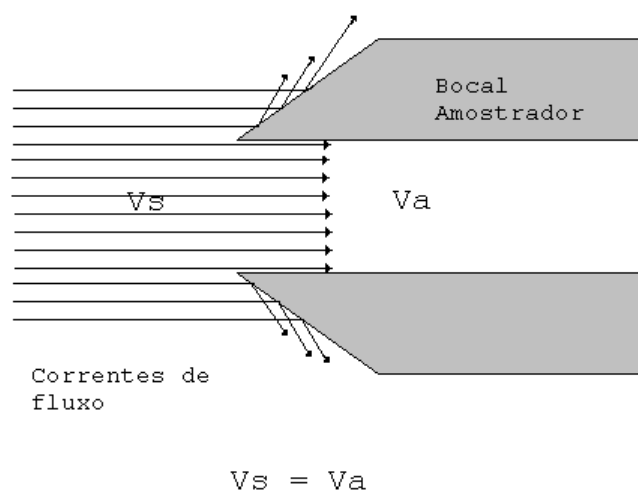


Figura 9 – Mecanismo de coleta isocinética (Fonte: ALMEIDA FILHO, 2008)

Entretanto, durante a amostragem de particulados é possível ocorrer outras duas situações distintas a amostragem isocinética, sendo estas indesejáveis:

Velocidade de coleta maior que a velocidade do gás confinado: em virtude da velocidade de amostragem ser maior, esta tende a forçar parte dos particulados cuja trajetória no duto seria para fora do diâmetro de coleta, a entrar no bocal amostrador. Assim, a massa coletada de partículas tende a ser maior que o normal.

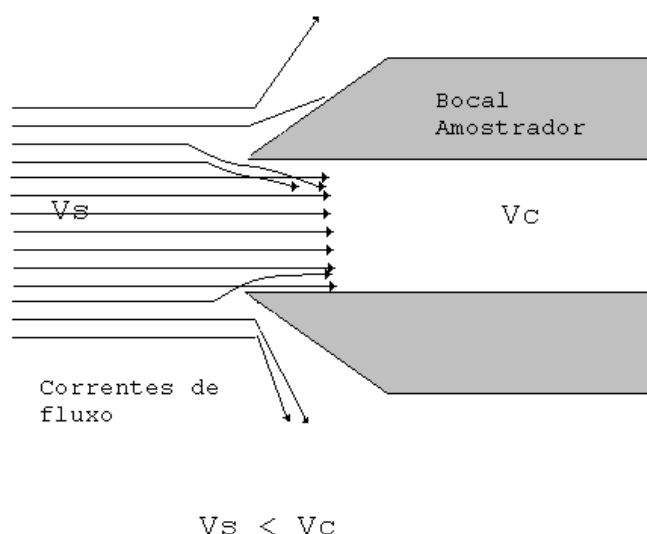


Figura 10 – Excesso de Material Coletado devido a alta velocidade de coleta (Fonte: ALMEIDA FILHO, 2008)

Velocidade de coleta menor que a velocidade do gás confinado: com uma velocidade de coleta abaixo da normal no duto, existe tendência de fuga de particulados para fora do diâmetro de coleta, promovendo uma coleta menor do que a real e também, um resultado em massa de particulados menor que a real.

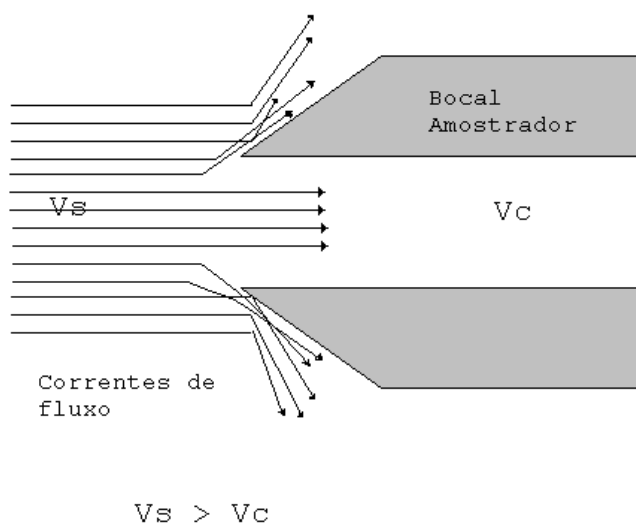


Figura 11 – Perda de Material coletado devido a baixa velocidade de coleta (Fonte: ALMEIDA FILHO, 2008)

Com as amostras de particulado obtidas pelo método da Amostragem Isocinética, a eficiência real de coleta do lavador pode ser calculada por análise gravimétrica, como será mostrado posteriormente. Quando utiliza-se a gravimetria para analisar a eficiência de coleta, esta é denominada de eficiência global de coleta. Com a eficiência global, é possível ainda calcular a eficiência fracionária de coleta, de acordo com faixas de distribuição granulométrica específicas. Isto permite ter uma noção mais detalhada sobre a eficiência do lavador perante a variação diametral das partículas poluidoras, permitindo assim, descobrir os limites operacionais do mesmo. É claro, que para tanto, o particulado amostrado deve passar por uma análise granulométrica minuciosa, em aparelhos específicos para este fim, os quais fornecerão estas distribuições granulométricas em faixas ou classes específicas, sob a forma de tabelas e/ou histogramas. Neste trabalho, focou-se o cálculo da eficiência fracionária de coleta para particulados na faixa entre 0 e $10\mu\text{m}$, pois esta faixa é respirável pelos seres humanos.

4 METODOLOGIA

4.1 MATERIAL PARTICULADO

Para realização deste trabalho experimental, utilizaram-se resíduos provenientes da combustão de biomassa florestal de uma indústria madeireira da região de Itapeva-SP. Este resíduo foi captado por um ciclone presente na indústria. Como todo equipamento desta classe, os ciclones captam particulados de elevada granulometria (particulados grossos), por isso, para garantir a representatividade deste estudo que visa avaliar o lavador Venturi como coletor de partículas finas, a primeira etapa deste trabalho consistiu exclusivamente no tratamento deste resíduo.

No tratamento do particulado grosso, realizou-se primeiramente sua moagem num moedor de café, e depois, o peneiramento em peneiras vibratórias com pratos de 100, 200 e 300mesh cada, até que fosse obtido um material de granulometria mais fina possível, a qual foi de $17,30\mu\text{m}$ de diâmetro médio para o sistema adotado. A

densidade do particulado tratado foi obtida mediante análise de picnometria por gás hélio, sendo está de 2,49g/cm³.

O diâmetro médio do particulado foi determinado no equipamento Malvern Mastersizer, por onde obteve-se a distribuição granulométrica do particulado, na forma de histogramas. Para esta análise granulométrica, foi utilizado o aparelho Malvern Mastersizer da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), onde este encontrava-se disponível no Departamento de Engenharia Química. Abaixo, a Figura 12 exibe uma tabela com a distribuição granulométrica de uma amostra de particulado analisada no aparelho, e a Figura 13 mostra o histograma gerado com os dados.

Result: Analysis Table							
ID: TT12Bpto1a1		Run No: 58		Measured: 17/8/06 14:37			
File: ANGELICA		Rec. No: 86		Analysed: 17/8/06 14:37			
Path: C:\SIZERMP\DATA\				Source: Analysed			
Sampler: Internal				Measured Beam Obscuration: 15.3 %			
Presentation: 5OHD		Analysis: Polydisperse		Residual: 0.376 %			
Modifications: None							
Conc. = 0.0215 %Vol		Density = 2.490 g/cm ³		S.S.A.= 0.6718 m ² /g			
Distribution: Volume		D[4, 3] = 17.31 um		D[3, 2] = 3.59 um			
D(v, 0.1) = 4.32 um		D(v, 0.5) = 15.03 um		D(v, 0.9) = 33.57 um			
Span = 1.946E+00		Uniformity = 6.029E-01					
Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.05	0.05	0.58	0.11	6.63	4.10	76.32	0.00
0.06	0.09	0.67	0.10	7.72	5.04	88.91	0.00
0.07	0.13	0.78	0.13	9.00	6.01	103.58	0.00
0.08	0.15	0.91	0.17	10.48	6.92	120.67	0.00
0.09	0.16	1.06	0.23	12.21	7.67	140.58	0.00
0.11	0.17	1.24	0.30	14.22	8.18	163.77	0.00
0.13	0.18	1.44	0.39	16.57	8.44	190.80	0.00
0.15	0.19	1.68	0.48	19.31	8.52	222.28	0.00
0.17	0.22	1.95	0.59	22.49	7.74	258.95	0.00
0.20	0.25	2.28	0.72	26.20	6.60	301.68	0.00
0.23	0.28	2.65	0.89	30.53	5.22	351.46	0.00
0.27	0.28	3.09	1.14	35.56	3.79	409.45	0.00
0.31	0.26	3.60	1.48	41.43	2.46	477.01	0.00
0.36	0.21	4.19	1.94	48.27	1.37	555.71	0.00
0.42	0.17	4.88	2.53	56.23	0.57		
0.49	0.14	5.69	3.25	65.51	0.00		
0.58		6.63		76.32			

Figura 12 – Tabela com a distribuição granulométrica de uma amostra de particulado

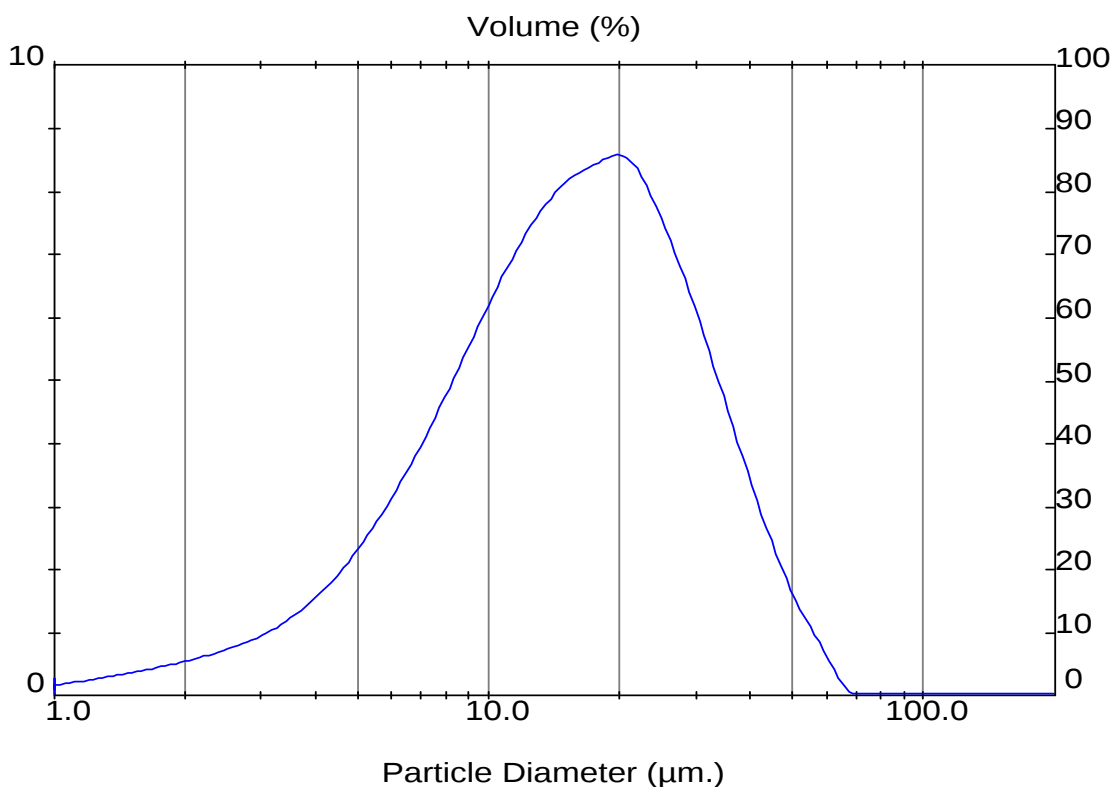


Figura 13 – Ilustração da curva de distribuição granulométrica para o particulado estudado

Todas as amostras obtidas durante os testes experimentais realizados (inclusive réplicas e tréplicas) foram analisadas no Malvern Mastersizer, para que assim, fosse possível calcular a eficiência fracionária em cada teste.

4.2 APARATO EXPERIMENTAL UTILIZADO

Os testes experimentais foram feitos no lavador Venturi que se apresentava disponível no laboratório de Química da Universidade Estadual Paulista, na unidade experimental de Itapeva-SP.

Neste estudo foram montados dois sistemas, um com dutos e lavador Venturi retangular e outro com dutos e lavador circular, sendo ambos constituídos por soprador, gerador de pó, garganta ajustável, ciclone, sistema de injeção de líquido formado por uma caixa d'água de 20 litros, rotâmetro e bomba helicoidal, e por último, um sistema de amostragem isocinética, constituído por medidor de fluxo, sonda isocinética e bomba a vácuo. As eficiências fracionárias calculadas neste

trabalho foram efetuadas a partir de estudos realizados no aparato experimental mostrado na Figura 14.

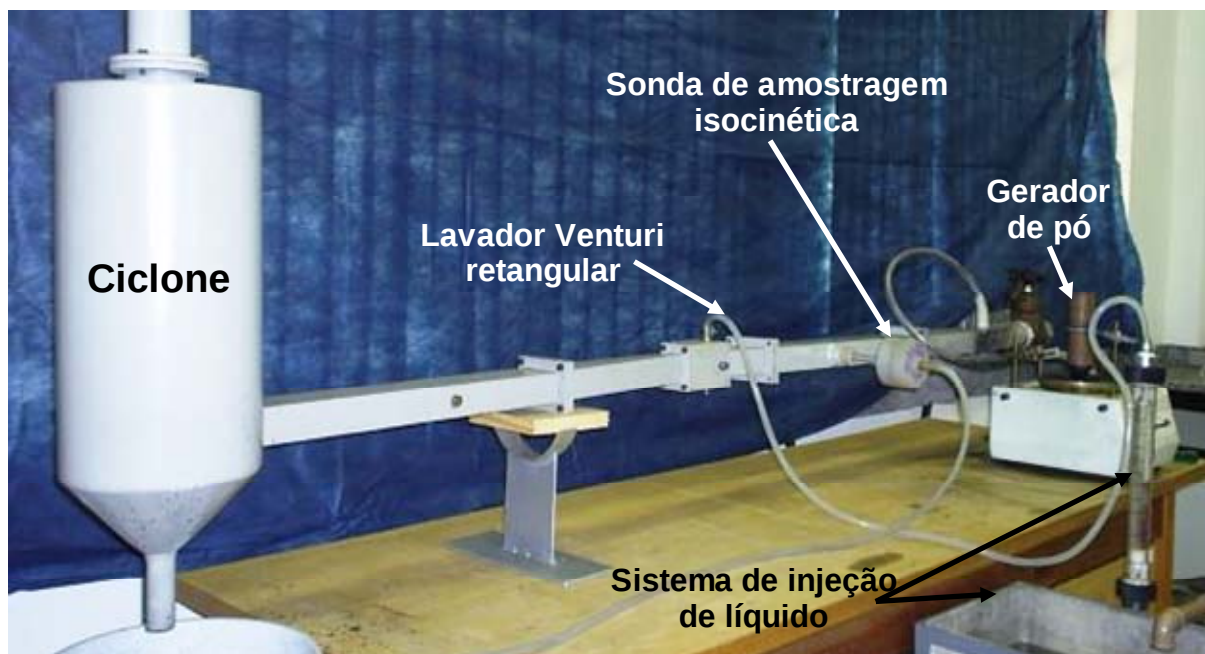


Figura 14 – Vista geral do aparato utilizado

A Figura 14 ilustra apenas o lavador Venturi de seção retangular e os principais itens que compõem o aparato experimental. Na Figura 15 e Tabela 5 são mostrados respectivamente, os detalhes do lavador Venturi retangular e suas dimensões de geometria.

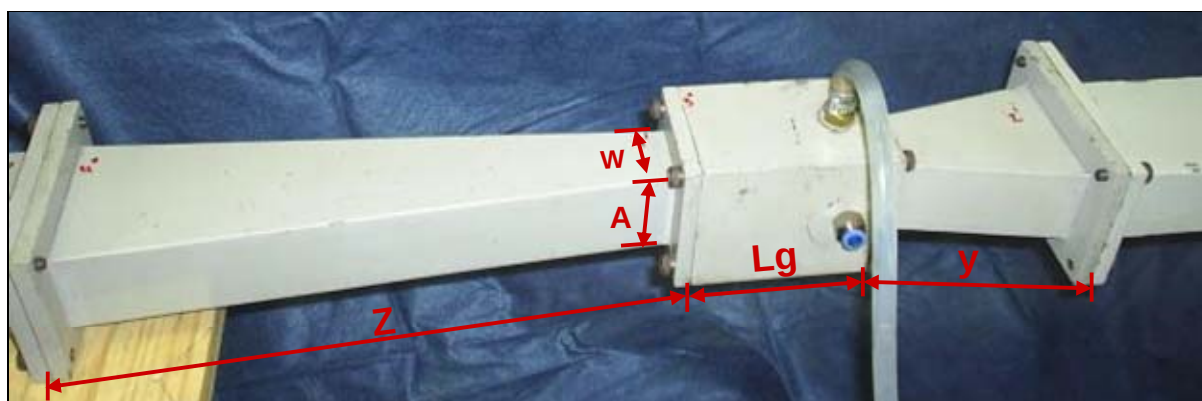


Figura 15 – Esquema do lavador Venturi de seção retangular

Tabela 5 – Dimensões do lavador Venturi de seção retangular

Legenda	Dimensão (m)	Legenda	Dimensão (m)
Lg	0,064	A	0,035
	0,090	Z	0,280
	0,117	Y	0,099
		W	0,023

Para o lavador circular utilizou-se a mesma área transversal do retangular, o que garante o mesmo fluxo de ar, ou seja, a mesma vazão de gás no interior do duto. A Figura 16 mostra o lavador circular adotado neste trabalho.

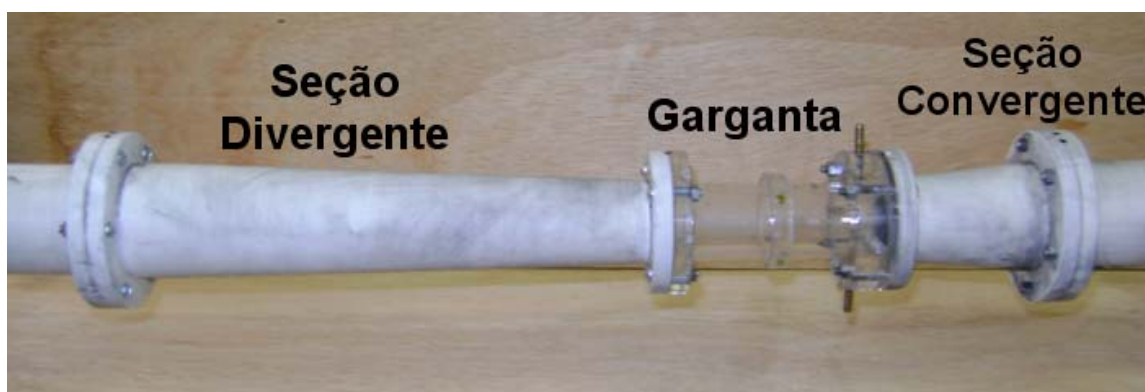


Figura 16 – Esquema do lavador Venturi de seção circular

Tanto o Venturi retangular quanto o circular, operavam horizontalmente e com injeção de líquido através de 1 e 2 orifícios de aproximadamente 1mm de diâmetro distribuídos nos extremos da garganta do Venturi, de modo paralelo um ao outro. Estes orifícios foram utilizados individualmente e simultaneamente nos testes experimentais realizados, ou seja, foram feitos testes com injeção do líquido de lavagem por apenas 1 orifício, e também utilizando os 2 orifícios ao mesmo tempo.

4.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A corrente de ar limpo foi gerada por um soprador radial e inserida no interior do duto. A contaminação desta corrente de ar foi efetuada através da dispersão do material particulado, utilizando ar comprimido e um gerador de pó tipo prato rotativo,

o qual inseria as partículas na corrente gasosa, conforme exhibe a Figura 17. Controlou-se a velocidade da corrente gasosa confinada e a variação de pressão do lavador fazendo uso de um tubo de Pitot acoplado a um manômetro analógico, sendo que os valores destas variáveis foram mantidos constantes durante os testes realizados. As velocidades da corrente gasosa no interior do duto foram de 20, 22 e 24 m/s. Na garganta dos dois lavadores Venturi, estas atingiam respectivamente, 58, 64 e 70 m/s.



Figura 17 – Gerador de pó utilizado no aparato experimental

O líquido de lavagem utilizado foi água comum de torneira, a qual era armazenada na caixa d'água. A bomba helicoidal então bombeava a água através do rotâmetro, e posteriormente esta atingia os orifícios da garganta do lavador, por onde penetrava no Venturi. Pelo rotâmetro, foram controladas as vazões de líquido desejadas, as quais foram de 0,4; 0,6 e 0,8L/min. Estas vazões de líquido adotadas são valores baixos, os quais justamente foram estabelecidos no intuito da obtenção de eficiência de coleta elevada na remoção de particulados e ainda, com economia do recurso de água. É importante destacar aqui que os valores destas vazões de líquido representam os valores totais utilizados, porém, para a situação de injeção de líquido via 2 orifícios ao mesmo tempo, estas vazões se reduzem à metade, ou seja, 0,2; 0,3 e 0,4L/min em cada orifício da garganta.

A garganta de cada Venturi utilizado era variável e neste trabalho foram analisados os comprimentos de 64, 90 e de 117mm. Na figura abaixo são mostradas todas as gargantas, tanto para o Venturi retangular quanto para o circular.

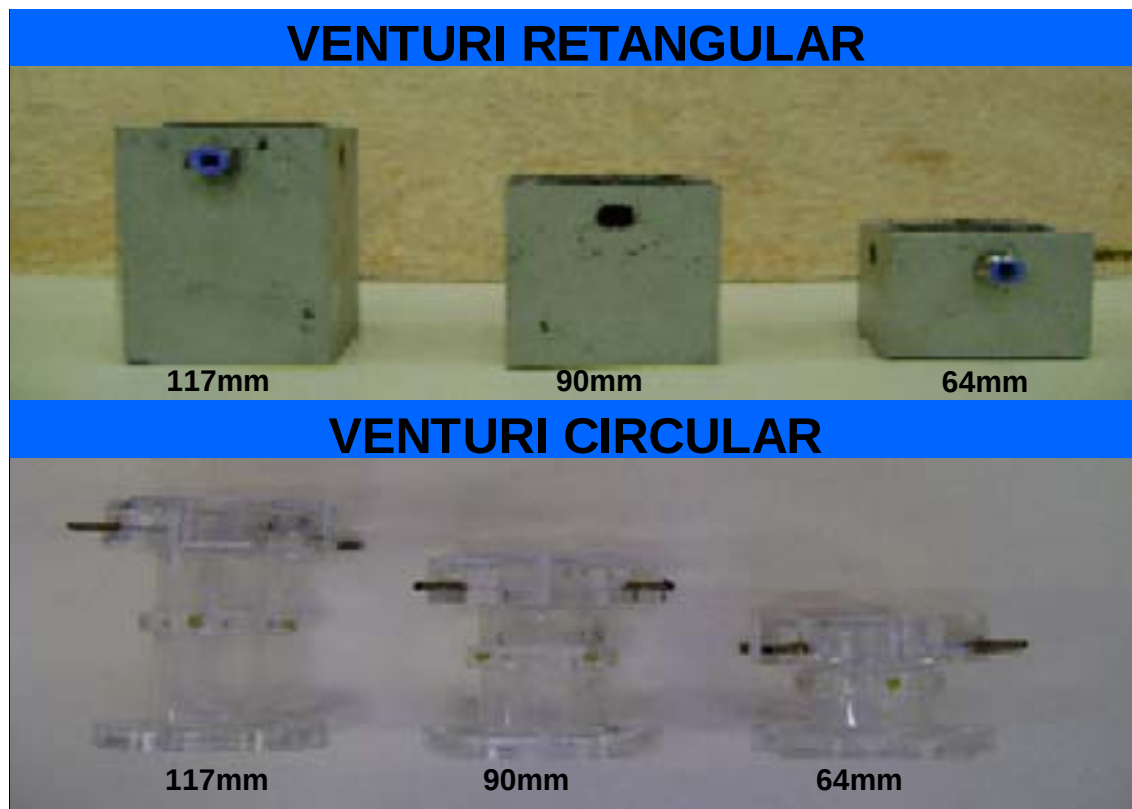


Figura 18 – Gargantas utilizadas nos lavadores Venturi retangular e circular

4.4 AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA

A corrente de ar contaminada foi amostrada durante os testes em dois pontos fixos, um antes do lavador e outro após o ciclone, através de um sistema de amostragem isocinética mostrado na Figura 19. A amostragem seguiu as normas exigidas, ou seja, utilizando sondas isocinéticas para que as análises fossem representativas.

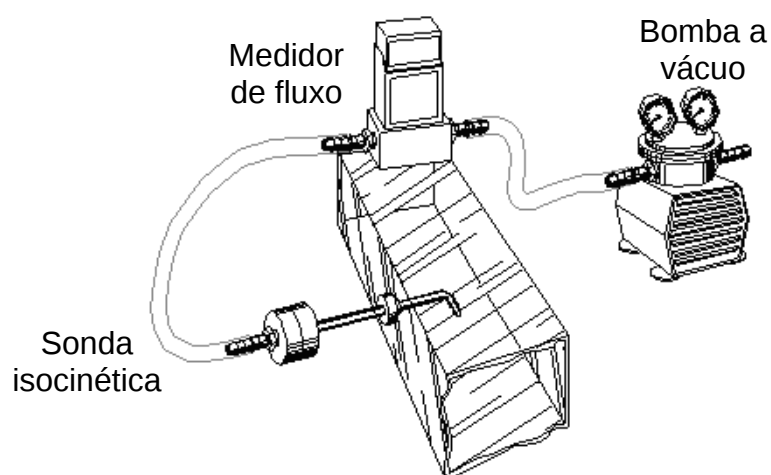


Figura 19 – Sistema de amostragem isocinética

As partículas eram succionadas pela sonda localizada no centro do duto através de uma bomba à vácuo, e o particulado era retido numa membrana filtrante dentro da sonda para análise. O ar limpo então era emitido pelo ciclone que eliminava a água contaminada com o particulado pela sua extremidade inferior. A Figura 20 mostra detalhadamente o esquema da sonda utilizada.

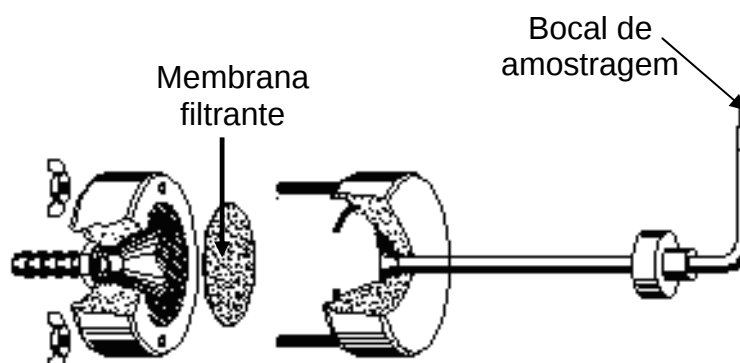


Figura 20 – Detalhes da sonda de amostragem utilizada

Com as membranas filtrantes contendo o particulado coletado antes e após o lavador, calculou-se primeiramente a eficiência global pela equação:

$$\eta_G = \frac{m_E - m_S}{m_E} \quad (11)$$

onde η_G é a eficiência de coleta global em %, m_E a massa de partículas coletadas antes do lavador e m_S a massa de partículas coletada após o lavador.

Para cálculo da eficiência fracionária, as membranas filtrantes com particulado eram armazenadas, até que as amostras pudessem ser levadas ao Departamento de Engenharia Química da UFSCar para análise no Malvern Mastersizer. Então de posse da distribuição granulométrica do particulado amostrado, as eficiências fracionárias foram calculadas através da equação:

$$\eta_d = 1 - \frac{(1 - \eta_G) \times f_{S(dp)}}{f_{E(dp)}} \quad (12)$$

sendo η_d a eficiência de coleta fracionária em %, $f_{S(dp)}$ a fração de partículas de diâmetro “dp” na saída do lavador e $f_{E(dp)}$ a fração de partículas na entrada do lavador. Ressalta-se que para obtenção de $f_{E(dp)}$ e $f_{S(dp)}$, foram estabelecidas faixas granulométricas específicas de 0 a 2,5 μ m, 2,5 a 5 μ m e 5 a 10 μ m, e assim, foram somados os valores dos volumes de partículas compreendidas nestas faixas, com base nas tabelas de distribuição granulométrica emitidas pelo Malvern Mastersizer.

4.5 ESTUDOS REALIZADOS

Neste trabalho, foram estudadas as variáveis diâmetro do particulado, velocidade do gás, vazão de líquido, comprimento da garganta, penetração do jato líquido, geometria do lavador e número de orifícios na garganta. Estas foram analisadas de forma ampla e crítica nos experimentos feitos, através de comparações e associações gráficas produzidas no programa Microsoft Excel. O intuito foi o de analisar o efeito destas variáveis sobre a eficiência de coleta do lavador, em especial, sobre a eficiência fracionária para a faixa de partículas compreendidas entre 0 e 10 μ m. A Tabela 6 lista as variáveis envolvidas nas análises experimentais.

Tabela 6 – Variáveis envolvidas na avaliação experimental da eficiência fracionária de coleta

Variáveis	
Diâmetro de interesse do particulado (μm)	0 a 10 μm
Geometria do lavador	retangular e circular
Número de orifícios para a injeção do líquido de lavagem	1 e 2
Comprimento da garganta do lavador (mm)	64, 90 e 117
Velocidade da corrente gasosa (m/s)	20, 22 e 24
Vazão de líquido na garganta (L/min)	0,4; 0,6 e 0,8

Além da avaliação experimental, também foram feitas comparações entre os dados experimentais com resultados adquiridos mediante modelos matemáticos clássicos da literatura, como o de JOHNSTONE *et al.* (1954), CALVERT *et al.* (1977) e de LEITH E COOPER (1980).

5 RESULTADOS

A seguir, são descritos os resultados de eficiência fracionária obtidos para o lavador Venturi retangular (Tabela 7 e 8) e circular (Tabela 9 e 10).

A Tabela 7 e 8 mostram respectivamente os resultados obtidos utilizando 1 e 2 orifícios de injeção de líquido para o lavador retangular. Já na Tabela 9 e 10 tem-se os dados de eficiência fracionária para o lavador de seção circular, respectivamente utilizando 1 e 2 orifícios.

Tabela 7 – Eficiência fracionária de coleta – lavador retangular (1 orifício de injeção de líquido)

Velocidade do gás (m/s)	Vazão de líquido (L/min)	Diâmetro do particulado (μm)	Eficiência de coleta fracionária (%)		
			Garganta 64 mm	Garganta 90 mm	Garganta 117 mm
20	0,4	0 a 2,5	68,10	77,39	68,12
		2,5 a 5	86,32	89,66	87,93
		5 a 10	92,38	94,54	94,97
	0,6	0 a 2,5	77,49	74,73	60,45
		2,5 a 5	89,65	89,39	90,58
		5 a 10	94,68	94,91	96,10
	0,8	0 a 2,5	71,16	78,39	74,28
		2,5 a 5	87,31	89,98	90,23
		5 a 10	94,23	95,25	95,90
22	0,4	0 a 2,5	72,16	79,15	83,30
		2,5 a 5	88,06	92,21	91,41
		5 a 10	95,13	96,46	96,48
	0,6	0 a 2,5	71,82	83,76	86,81
		2,5 a 5	88,85	91,48	95,36
		5 a 10	95,57	95,06	97,62
	0,8	0 a 2,5	63,72	71,87	78,69
		2,5 a 5	86,66	91,93	92,29
		5 a 10	96,56	96,36	96,31
24	0,4	0 a 2,5	61,53	75,41	79,70
		2,5 a 5	89,35	93,18	91,03
		5 a 10	95,25	97,25	96,40
	0,6	0 a 2,5	69,76	80,35	90,96
		2,5 a 5	91,16	94,60	96,57
		5 a 10	95,43	97,52	98,32
	0,8	0 a 2,5	73,62	78,08	80,95
		2,5 a 5	86,64	92,22	93,10
		5 a 10	94,40	97,03	97,09

Tabela 8 – Eficiência fracionária de coleta – lavador retangular (2 orifícios de injeção de líquido)

Velocidade do gás (m/s)	Vazão de líquido (L/min)	Diâmetro do particulado (μm)	Eficiência de coleta fracionária (%)		
			Garganta 64 mm	Garganta 90 mm	Garganta 117 mm
20	0,4	0 a 2,5	86,64	86,78	89,66
		2,5 a 5	93,34	91,94	94,38
		5 a 10	98,77	97,60	98,89
	0,6	0 a 2,5	83,64	94,29	94,45
		2,5 a 5	93,46	94,59	96,68
		5 a 10	98,89	98,02	99,16
	0,8	0 a 2,5	83,35	93,29	94,31
		2,5 a 5	93,20	97,37	97,52
		5 a 10	99,51	99,29	99,72
22	0,4	0 a 2,5	87,32	90,77	92,23
		2,5 a 5	93,48	95,07	95,18
		5 a 10	98,88	98,46	98,87
	0,6	0 a 2,5	88,27	92,07	89,09
		2,5 a 5	95,85	96,78	93,88
		5 a 10	99,50	99,16	98,99
	0,8	0 a 2,5	83,79	90,47	92,84
		2,5 a 5	95,92	95,86	97,94
		5 a 10	99,26	99,42	99,68
24	0,4	0 a 2,5	89,45	96,41	90,04
		2,5 a 5	95,28	98,45	94,52
		5 a 10	99,32	99,61	98,90
	0,6	0 a 2,5	93,94	94,63	97,64
		2,5 a 5	97,46	96,62	98,93
		5 a 10	99,44	99,56	99,75
	0,8	0 a 2,5	92,72	94,12	90,65
		2,5 a 5	98,10	97,86	96,57
		5 a 10	99,84	99,35	99,48

Tabela 9 – Eficiência fracionária de coleta – lavador circular (1 orifício de injeção de líquido)

Velocidade do gás (m/s)	Vazão de líquido (L/min)	Diâmetro do particulado (μm)	Eficiência de coleta fracionária (%)		
			Garganta 64 mm	Garganta 90 mm	Garganta 117 mm
20	0,4	0 a 2,5	33,73	63,13	63,76
		2,5 a 5	82,86	85,54	80,80
		5 a 10	90,28	90,31	94,60
	0,6	0 a 2,5	49,00	56,90	66,33
		2,5 a 5	82,89	86,88	91,86
		5 a 10	90,08	92,75	96,22
	0,8	0 a 2,5	35,37	69,50	70,72
		2,5 a 5	82,09	90,04	82,42
		5 a 10	90,40	89,83	96,28
22	0,4	0 a 2,5	40,63	53,96	44,75
		2,5 a 5	83,00	88,55	88,71
		5 a 10	94,93	96,69	96,75
	0,6	0 a 2,5	48,14	58,77	47,49
		2,5 a 5	81,99	87,57	94,83
		5 a 10	95,70	96,23	97,49
	0,8	0 a 2,5	45,55	59,63	49,87
		2,5 a 5	82,46	86,01	90,06
		5 a 10	96,60	96,12	97,11
24	0,4	0 a 2,5	48,93	47,36	69,18
		2,5 a 5	85,95	89,24	94,35
		5 a 10	90,52	93,75	95,35
	0,6	0 a 2,5	51,91	53,95	70,90
		2,5 a 5	90,49	93,11	94,70
		5 a 10	93,96	94,16	97,33
	0,8	0 a 2,5	51,91	55,27	75,54
		2,5 a 5	80,86	82,21	90,25
		5 a 10	95,80	96,16	96,21

Tabela 10 – Eficiências fracionária de coleta – lavador circular (2 orifícios de injeção de líquido)

Velocidade do gás (m/s)	Vazão de líquido (L/min)	Diâmetro do particulado (μm)	Eficiência de coleta fracionária (%)		
			Garganta 64 mm	Garganta 90 mm	Garganta 117 mm
20	0,4	0 a 2,5	35,54	37,45	51,33
		2,5 a 5	82,51	80,90	82,44
		5 a 10	90,52	91,48	92,30
	0,6	0 a 2,5	53,56	63,60	82,83
		2,5 a 5	84,70	87,80	95,69
		5 a 10	93,50	94,59	97,76
	0,8	0 a 2,5	34,46	57,97	60,29
		2,5 a 5	82,23	90,39	87,51
		5 a 10	91,05	94,52	95,47
22	0,4	0 a 2,5	36,38	43,31	43,27
		2,5 a 5	82,06	89,72	82,56
		5 a 10	91,15	94,29	95,05
	0,6	0 a 2,5	54,62	63,96	81,19
		2,5 a 5	81,39	86,02	91,30
		5 a 10	93,27	96,44	96,43
	0,8	0 a 2,5	40,97	62,85	45,81
		2,5 a 5	83,00	85,72	92,09
		5 a 10	93,55	95,76	96,38
24	0,4	0 a 2,5	44,26	54,33	63,91
		2,5 a 5	85,17	87,33	90,70
		5 a 10	92,64	95,67	93,58
	0,6	0 a 2,5	44,68	69,29	73,39
		2,5 a 5	91,05	88,02	94,16
		5 a 10	95,58	96,59	97,24
	0,8	0 a 2,5	73,34	62,39	84,81
		2,5 a 5	92,09	92,24	96,70
		5 a 10	96,17	96,44	98,83

A Tabela 11 mostra as eficiências calculadas utilizando os modelos de Johnstone, Calvert e Cooper para as três gargantas, haja visto que estes modelos não variam em função da geometria do lavador, do número de orifícios para injeção do líquido de lavagem e do comprimento da garganta do lavador. Estes modelos estimam a

eficiência de coleta baseando-se num valor fixo do diâmetro das partículas, assim, as faixas 0 a 2,5; 2,5 a 5 e 5 a 10 foram mudadas para respectivamente, 2,5; 5 e 10 μ m

Tabela 11 – Eficiência fracionária de coleta calculada pelos modelos matemáticos

Velocidade do gás (m/s)	Vazão de líquido (L/min)	Diâmetro do particulado (μ m)	Eficiência de coleta fracionária (%)		
			Jonstone	Calvert	Leith Cooper
20	0,4	2,5	1,72	20,16	99,61
		5	3,36	23,94	100,00
		10	6,56	47,88	100,00
	0,6	2,5	1,71	28,94	99,98
		5	3,34	34,04	100,00
		10	6,52	50,00	100,00
	0,8	2,5	1,70	36,97	100,00
		5	3,31	43,09	100,00
		10	6,46	60,00	100,00
22	0,4	2,5	2,57	19,17	99,77
		5	5,00	22,30	100,00
		10	9,68	44,00	100,00
	0,6	2,5	2,56	27,59	99,99
		5	4,97	31,85	100,00
		10	9,62	61,00	100,00
	0,8	2,5	2,53	35,35	100,00
		5	4,93	40,29	100,00
		10	9,542	70,00	100,00
24	0,4	2,5	3,42	18,26	99,87
		5	6,63	20,88	100,00
		10	12,72	42,35	100,00
	0,6	2,5	3,40	26,35	100,00
		5	6,58	29,94	100,00
		10	12,63	51,09	100,00
	0,8	2,5	3,37	33,84	100,00
		5	6,53	38,21	100,00
		10	12,54	68,70	100,00

5.1 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA FRACIONÁRIA DE COLETA

Os resultados experimentais de eficiência fracionária do lavador Venturi circular e retangular investigados neste trabalho são mostrados a seguir. Levou-se em conta os dados contidos nas Tabelas 7, 8, 9 e 10, correlacionando-os aos efeitos do diâmetro do particulado, velocidade da corrente gasosa, vazão de líquido, comprimento de garganta, geometria do lavador, número de orifícios para injeção do líquido de lavagem e penetração do jato líquido. Por último, foi feita a comparação e análise dos dados experimentais com os modelos matemáticos propostos, de acordo com os dados da Tabela 11.

5.1.1 Efeito do diâmetro do particulado

A figura que segue mostra o efeito do diâmetro do particulado sobre a eficiência fracionária do lavador circular com 1 orifício, velocidade do gás de 24m/s, garganta de 117mm e variando as três vazões de líquido (0,4; 0,6 e 0,8 L/min).

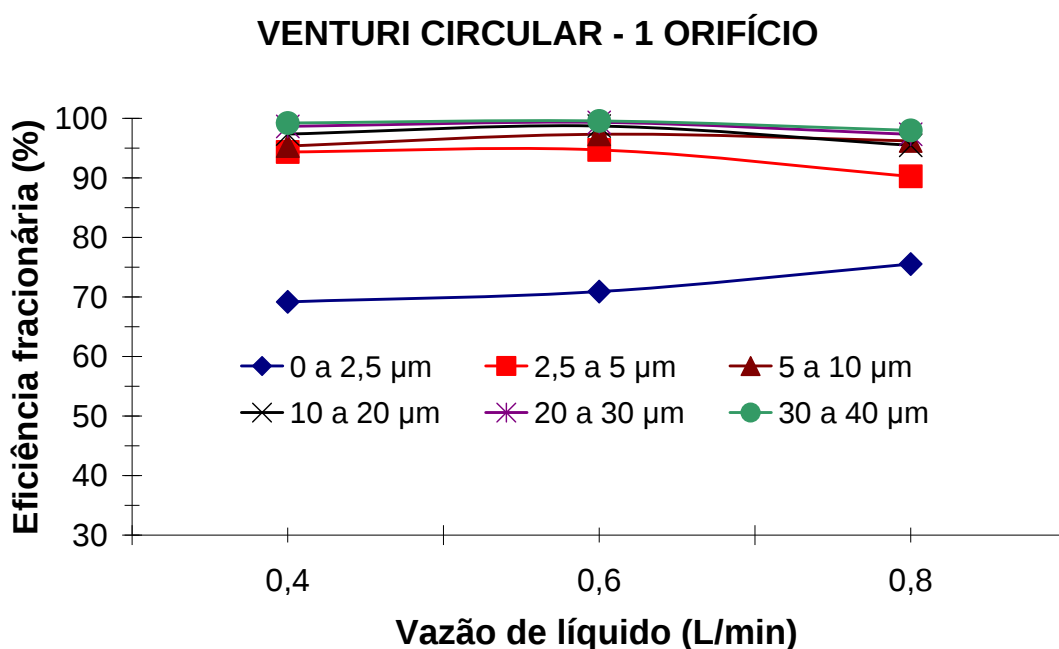


Figura 21 – Efeito do diâmetro do particulado no Venturi circular – garganta de 117mm, 1 orifício e velocidade do gás de 24m/s

Observa-se nitidamente na Figura 21 que as partículas menores que $2,5\mu\text{m}$ foram as que proporcionaram os menores níveis de eficiência de coleta, pois estas são as mais difíceis de serem coletadas, visto que são muito finas. Nesta figura, a eficiência fracionária esteve acima de 69,00% para todos os casos, sendo que para partículas acima de $2,5\mu\text{m}$ a eficiência foi acima de 90,00%, mesmo para baixas vazões de líquido como 0,4L/min. A eficiência máxima visualizada para a faixa de 0 a $2,5\mu\text{m}$ foi de 75,54%, para a vazão de 0,8L/min. Para as partículas maiores que $10\mu\text{m}$, as eficiências fracionárias foram de praticamente 100%. Em outras análises, utilizando-se simultaneamente 2 orifícios de injeção de líquido e para a mesma garganta, a eficiência máxima para a faixa de 0 a $2,5\mu\text{m}$, foi de 84,81%, para a vazão de 0,8L/min.

A Figura 22 mostra o mesmo caso abordado anteriormente, porém, para o lavador retangular com 1 orifício.

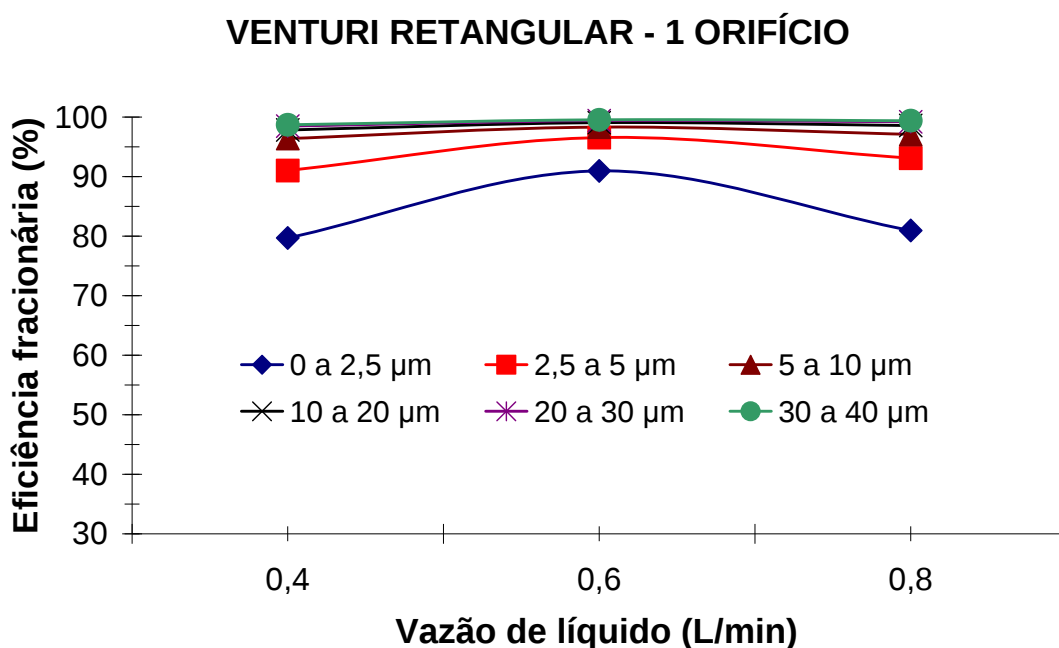


Figura 22 – Efeito do diâmetro do particulado no Venturi retangular – garganta de 117mm, 1 orifício e velocidade do gás de 24m/s

Pela Figura 22 as eficiências obtidas para a faixa de 0 a $2,5\mu\text{m}$ mantiveram-se acima dos 79,00%, atingindo até 90,96%. As partículas superiores a $2,5\mu\text{m}$ foram coletadas com numa eficiência mínima de 91,03%. Para o caso de 2 orifícios e mantendo constantes as demais variáveis, viu-se que a eficiência obtida na coleta das partículas menores que $2,5\mu\text{m}$ foi superior a 90,00% em todos os casos variando as

vazões de líquido, atingindo o valor máximo de 97,64%. Assim, pode-se concluir que o lavador retangular mostrou-se mais eficiente na coleta das partículas menores que $2,5\mu\text{m}$. Para os demais comprimentos de garganta e velocidades do gás, esta mesma conclusão pode ser observada, sendo que para os comprimentos de garganta menores que 117mm, os níveis de eficiência alcançados foram inferiores e também, para velocidades menores que 24m/s.

Como visto, o diâmetro do particulado considerado afetou diretamente na eficiência de coleta do lavador, pois esta variável está atrelada aos mecanismos de coleta, onde as partículas menores, mesmo seguindo as linhas de corrente podem desviar das gotas coletoras, devido ao mecanismo difusional ou Browniano. Mesmo assim, ficou evidenciado que o lavador Venturi apresentou boa eficiência mesmo para partículas finas, controlando-se adequadamente as variáveis de processo envolvidas.

5.1.2 Efeito da velocidade do gás no duto

Com a Figura 23 observa-se o efeito da velocidade do gás no duto nas eficiências fracionárias do Venturi circular para a faixa de partículas entre 2,5 e $5\mu\text{m}$.

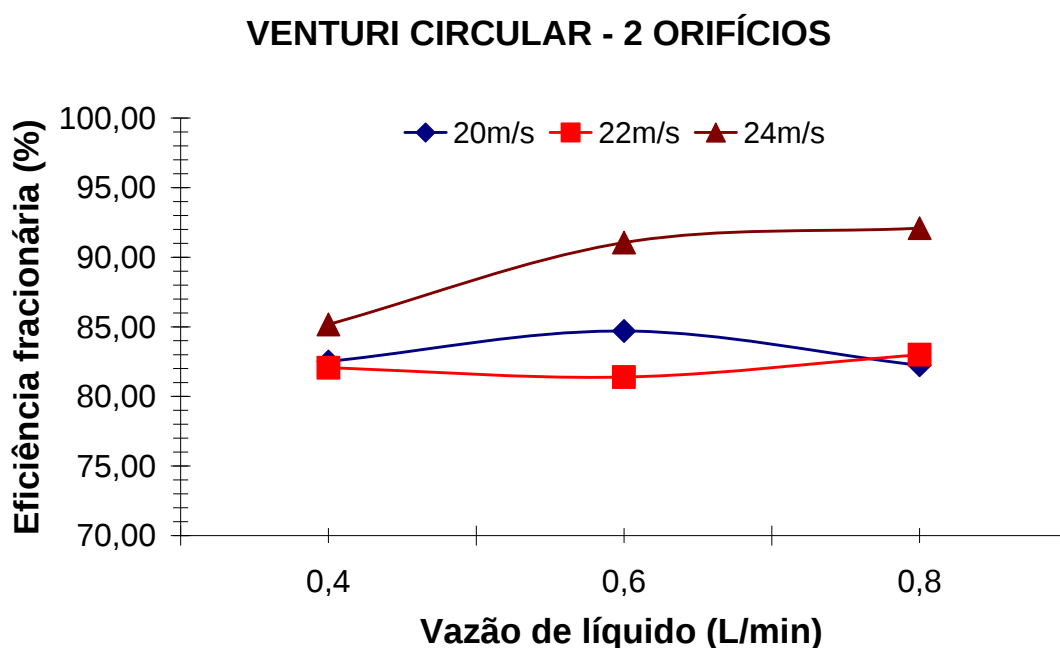


Figura 23 – Efeito da velocidade do gás no Venturi circular – garganta de 64mm, partículas de 2,5 a $5\mu\text{m}$ e 2 orifícios

Pela Figura 23 a menor eficiência obtida foi de 81,39% e a maior de 92,09%. Nota-se que o aumento da velocidade proporciona incrementos na eficiência de coleta do lavador devido a melhor atomização do jato líquido de lavagem. Para a situação de 1 orifício e deixando constantes as demais variáveis, foi observado a eficiência mínima de 80,86% e máxima de 90,49%. Aumentando-se o comprimento da garganta maiores eficiências de coleta também foram vistas, sendo que o desempenho máximo foi para o comprimento de 117mm, onde a eficiência foi de 96,70% para vazão de 0,8L/min. Naturalmente, para partículas menores que $2,5\mu\text{m}$ a eficiência de coleta diminuiu em todos os casos, atingindo o valor mínimo de 34,46% para garganta de 64mm e máximo de 94,91% para 117mm, sendo que 95,00% de eficiência de coleta neste caso, já pode ser considerado como um excelente resultado.

Na Figura 24 tem-se a mesma situação mostrada na Figura 23, porém para o lavador retangular.

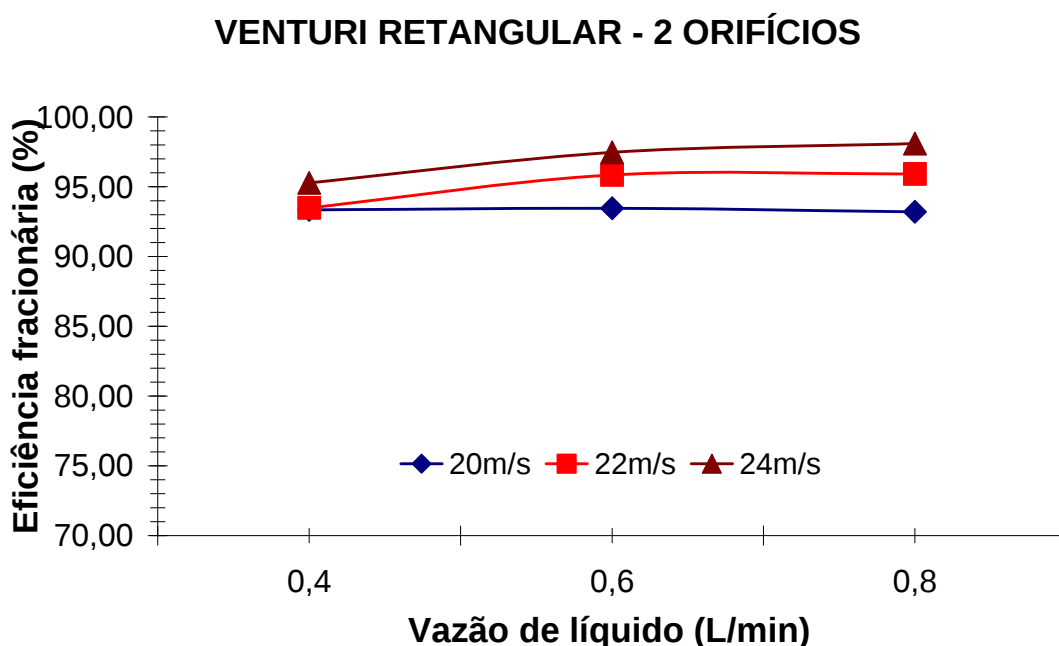


Figura 24 – Efeito da velocidade do gás no Venturi retangular – garganta de 64mm, partículas de 2,5 a $5\mu\text{m}$ e 2 orifícios

É possível perceber na Figura 24 que maiores eficiências foram alcançadas, sendo a menor igual a 93,20% para 20m/s e a maior 98,10% para 24m/s. Para gargantas maiores que 64mm e não alterando as demais condições, observou-se o aumento da eficiência de coleta aumentando o comprimento da garganta até 117mm,

onde neste caso atingiu-se 98,93% como valor máximo. Partículas menores que $2,5\mu\text{m}$ proporcionaram quedas na eficiência de coleta de modo análogo ao afirmado anteriormente para o lavador circular.

O aumento controlado da velocidade do gás neste caso afetou a relação L/G do sistema, promovendo assim, uma melhor atomização e distribuição das gotas no interior do lavador. A atomização e distribuição do jato líquido de lavagem se dá pela ação da velocidade da corrente gasosa.

5.1.3 Efeito da vazão de líquido

É possível ver na Figura 25 o efeito da vazão de líquido na eficiência de coleta, para o lavador circular, partículas de $2,5$ a $5\mu\text{m}$, 1 orifício de injeção de líquido e garganta de 117mm .

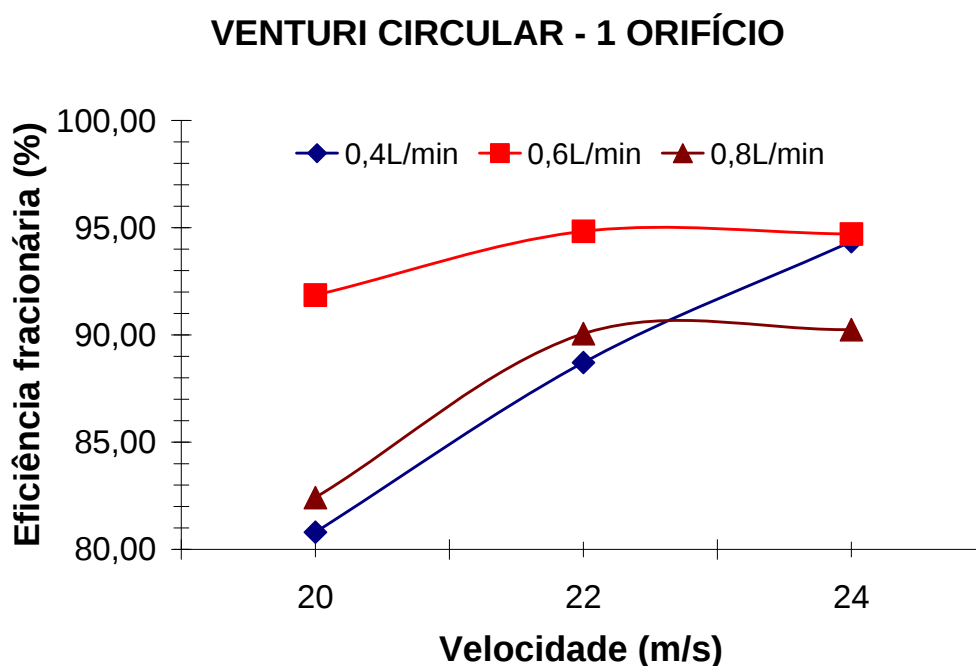


Figura 25 – Efeito da vazão de líquido na garganta do lavador circular – garganta de 117mm , partículas de $2,5$ a $5\mu\text{m}$ e 1 orifício

Através da figura, a maior eficiência encontrada foi de 94,83%, a qual se deu na vazão de $0,6\text{L/min}$. Já a menor eficiência foi de 80,80%, obtida na velocidade de 20m/s e vazão de $0,4\text{L/min}$. Para este mesmo caso, entretanto, com partículas

inferiores a $2,5\mu\text{m}$, a menor eficiência do lavador foi de 44,75%, e a maior de 75,54%. Já passando de 1 para 2 orifícios na garganta do lavador, foram vistas maiores eficiências, sendo o valor máximo de 96,7% para a garganta de 117mm.

Na maioria dos casos, a vazão de 0,6L/min predominou, proporcionando os maiores níveis de eficiência fracionária. Porém, houveram casos onde com a vazão de 0,8L/min ocorreram eficiências fracionárias mais elevadas. Isto se deve as diversas interações que o processo do sistema está sujeito, como as mudanças de velocidade do gás, diâmetro das partículas, comprimento da garganta do lavador ou mesmo na penetração do jato líquido de lavagem, visto que na vazão de 0,8L/min pode ter ocorrido em alguns casos penetração do jato mais próxima do centro da garganta, o que então propiciou melhores eficiências de coleta. Este mesmo fenômeno se deu trabalhando-se com o lavador retangular, porém, como dito, houve predominância de eficiência de coleta mais alta para vazões de 0,6/min.

Como discutido anteriormente, a vazão de líquido influencia significativamente no tamanho das gotas, sendo que vazões maiores geram jatos mais penetrantes na garganta e ocasionam na maior formação de gotas menores, o que contribui negativamente na eficiência de coleta do lavador, pois gotas menores captam menos particulado. Portanto, para a vazão de 0,8 L/min, pode ter ocorrido a formação de gotas muito pequenas na maioria dos casos, o que contribuiu para que a coleta dos particulados fosse em menor intensidade, e conseqüentemente, a eficiência fracionária do lavador fosse menor.

É importante salientar, que mesmo para um baixo consumo de água como 0,4L/min, houve situações de grande eficiência de coleta, tanto para 1 quanto 2 orifícios, superando os 80,00% de eficiência em alguns casos. Este resultado é importante para a indústria, a qual pode obter altos níveis de eficiência de coleta de particulados finos, com uso racionado do recurso de água.

Na Figura 26 observa-se o efeito da vazão de líquido, porém, para o Venturi retangular.

VENTURI RETANGULAR - 1 ORIFÍCIO

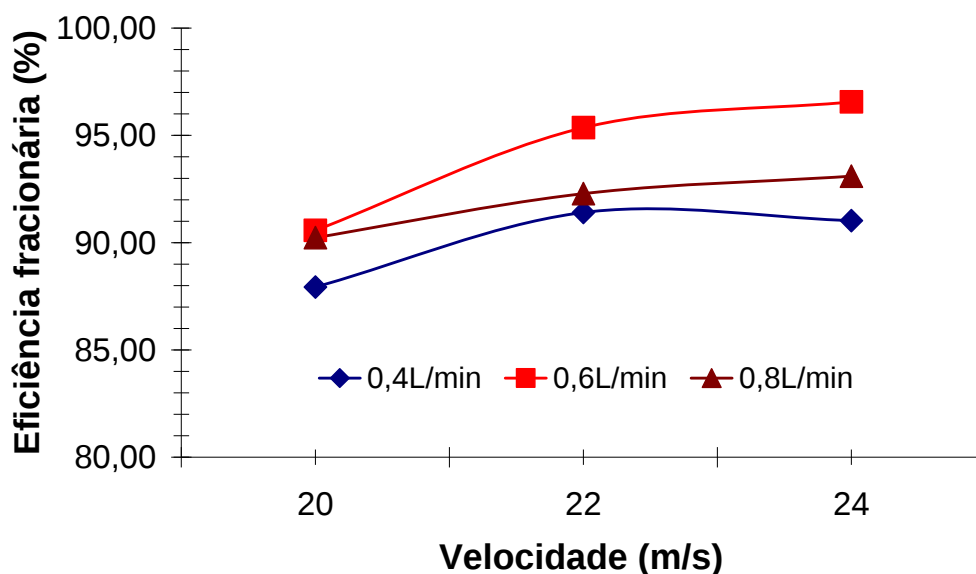


Figura 26 – Efeito da vazão de líquido na garganta do lavador retangular – garganta de 117mm, partículas de 2,5 a 5 μ m e 1 orifício

Analogamente ao já dito anteriormente sobre o efeito da variável vazão de líquido na eficiência de coleta do lavador, observa-se na figura que a vazão de 0,6L/min mostrou os melhores resultados de eficiência fracionária. O valor máximo de eficiência encontrado foi 96,57%, para a vazão de 0,6L/min e velocidade de 24m/s. Para as gargantas de 64 e 90mm, resultados análogos foram vistos, mostrando também a predominância de que maiores eficiências de coleta estão relacionadas a vazão de líquido igual a 0,6L/min.

Na Figura 27 é possível notar que as maiores eficiências de coleta se deram para a situação de vazão de líquido igual a 0,6L/min. A situação mostrada nesta figura é para o caso da garganta de 90mm, partículas de 0 a 2,5 μ m e 2 orifícios na garganta do lavador circular. A maior eficiência de coleta foi de 69,29% e vazão de 0,6L/min. Este resultado é bom, tendo em vista que o comprimento da garganta é intermediário, e que a faixa de partículas analisada é a mais fina deste estudo. É interessante notar que para vazão de 0,8L/min, os resultados observados estiveram apenas um pouco abaixo dos encontrados para vazão de 0,6L/min, sendo que na vazão de 0,4L/min a eficiência de coleta máxima foi de 54,33% para velocidade de 24m/s.

VENTURI CIRCULAR - 2 ORIFÍCIOS

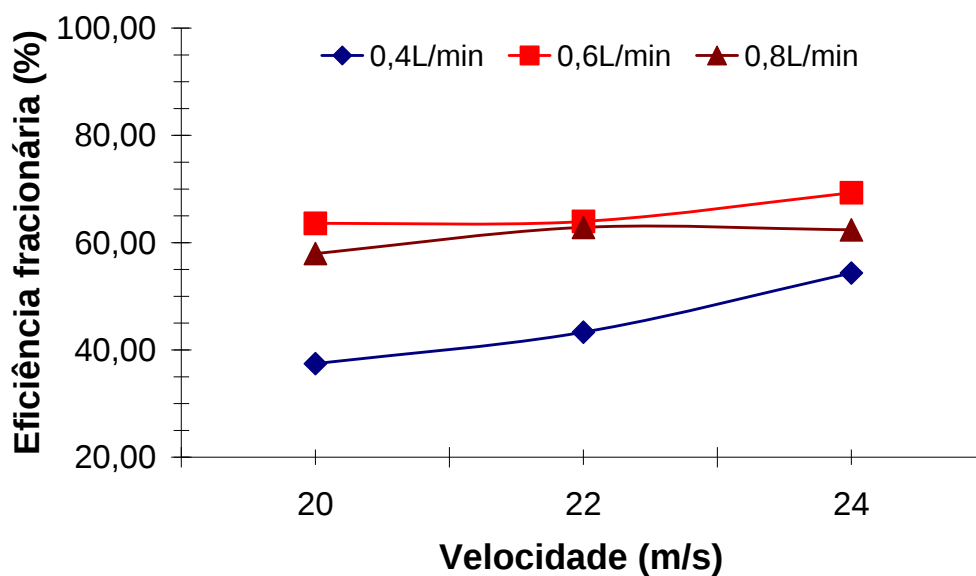


Figura 27 – Efeito da vazão de líquido na garganta do lavador circular – garganta de 90mm, partículas de 0 a 2,5 μ m e 2 orifícios

5.1.4 Efeito do comprimento de garganta

O efeito do comprimento da garganta pode ser notado na Figura 28. Estudou-se a situação com 1 orifício e partículas de 2,5 a 5 μ m e 5 a 10 μ m.

VENTURI CIRCULAR - 1 ORIFÍCIO

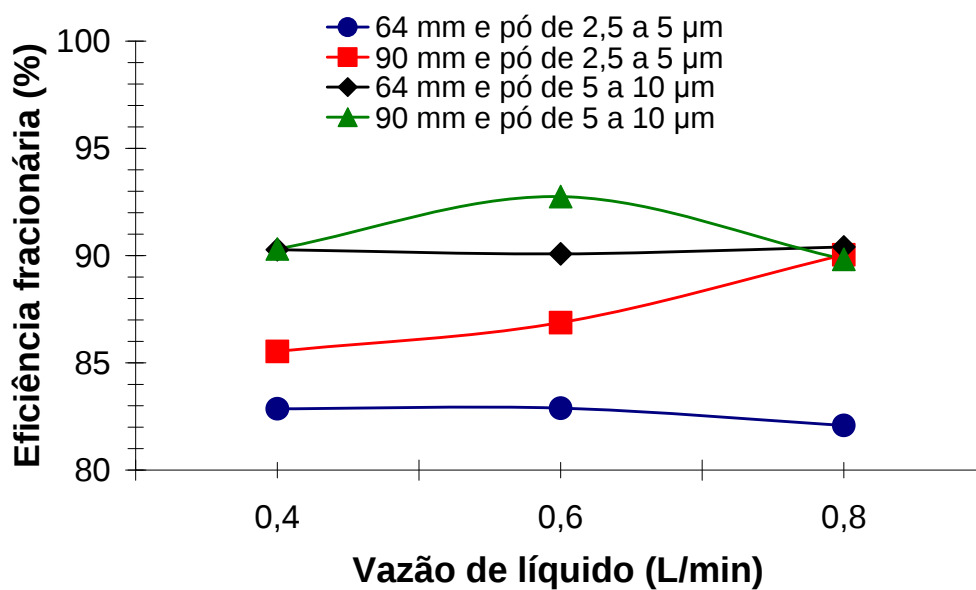


Figura 28 – Efeito do comprimento da garganta para o lavador circular – velocidade de 20m/s e 1 orifício.

A garganta tendo um maior comprimento, maior é o espaço disponível e o tempo para ocorrer contato do gás contaminado por particulados e as gotas atomizadas do jato líquido de lavagem. Assim, verificou-se que a menor eficiência alcançada pelo lavador foi de 80,09%, para a garganta de 64mm e partículas entre 2,5 e 5 μ m. Já a maior eficiência encontrada foi para o comprimento de garganta igual a 90mm e partículas entre 5 e 10 μ m, onde a eficiência máxima foi de 92,75 %. A garganta de 117mm apresentou comportamento similar ao de 90mm, atingindo valores de eficiência na maioria das vezes superiores.

Abaixo a Figura 29 mostra uma situação distinta da exposta anteriormente, sendo esta para o Venturi retangular, comparando a garganta de 90 com a de 117mm.

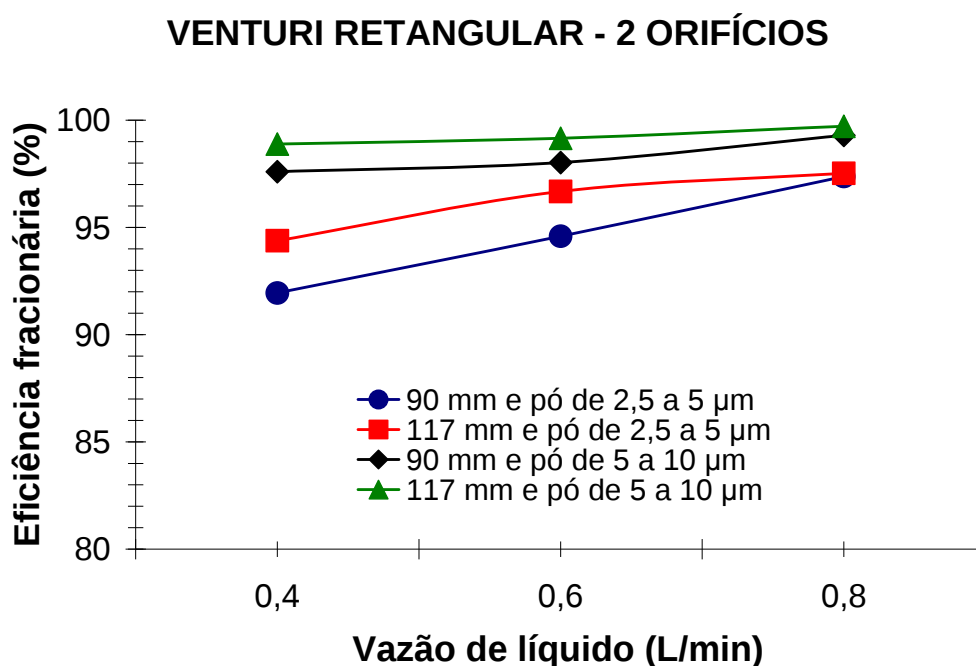


Figura 29 – Efeito do comprimento da garganta para o lavador retangular – velocidade de 20m/s e 2 orifícios.

Neste caso a menor eficiência foi de 91,94%, para 0,4L/min, garganta de 90mm e particulado de 2,5 a 5 μ m. A maior eficiência foi de 99,72% para garganta de 117mm, vazão de 0,8L/min e particulado de 5 a 10 μ m.

Apesar do diâmetro do particulado estudado afetar diretamente na eficiência de coleta, tanto na Figura 28 quanto Figura 29, as maiores eficiências de coleta ocorreram para a situação de aumento no comprimento da garganta, mesmo deixando constante a faixa de partículas em análise.

A Figura 30 mostra outra análise do efeito do comprimento da garganta do lavador na eficiência fracionária de coleta. Nesta situação, são comparadas as gargantas de 64 e 117mm, para partículas na faixa de 2,5 a 5 μ m e 5 a 10 μ m, vazão fixa de 0,6L/min e 1 orifício de injeção de líquido.

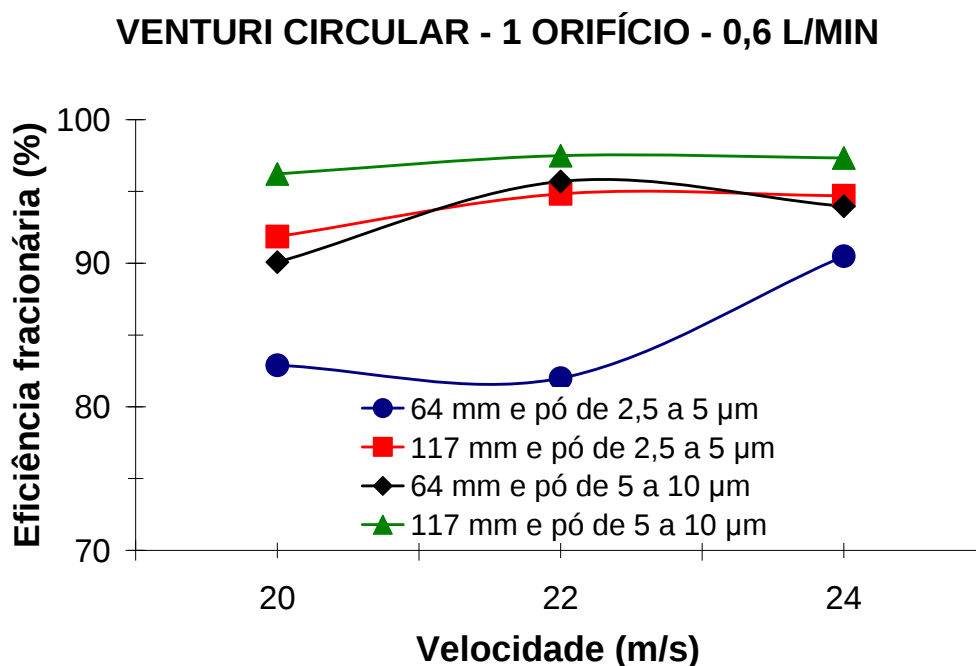


Figura 30 – Efeito do comprimento da garganta para o lavador circular – 1 orifício e vazão de 0,6L/min.

Mais uma vez, é possível notar pela Figura 30 que aumentando-se o comprimento da garganta, maiores níveis de eficiência são alcançados. A garganta de 117mm apresentou os melhores resultados, sendo a eficiência máxima observada igual a 97,49% para a faixa de 5 a 10 μ m. Na situação de garganta de 117mm e partículas de 2,5 a 5 μ m, os resultados foram muito similares aos encontrados para a garganta de 64mm e partículas de 5 a 10 μ m, pois nesta circunstancia, as partículas de 5 a 10 μ m são mais facilmente coletadas pelo lavador do que as de 2,5 a 5 μ m.

5.1.5 Efeito da geometria do lavador

Na figura que segue é mostrado o efeito da geometria do lavador na eficiência de coleta do lavador circular e retangular. Aqui considerou-se o caso de 1 orifício, partículas de 2,5 a 5 μ m e garganta de 117mm.

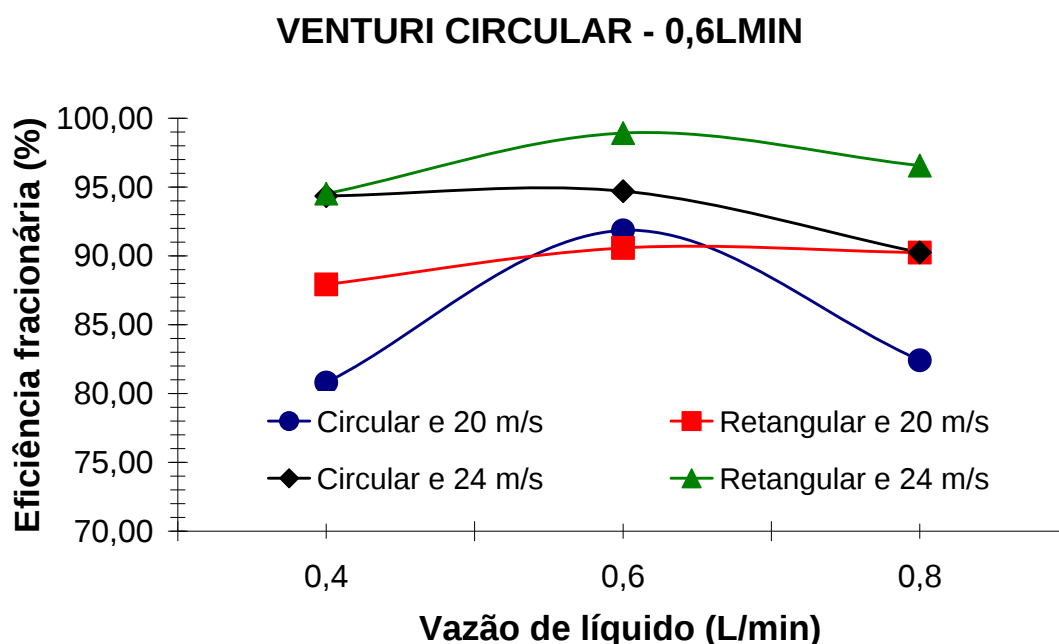


Figura 31 – Efeito da geometria do lavador – garganta de 117mm, partículas de 2,5 a 5 μ m e 1 orifício

Percebe-se que a eficiência tendeu a ser maior para a geometria retangular, devido a esta causar maior turbulência no interior do lavador, o que tende a aumentar a eficiência de coleta na garganta do lavador. O maior desempenho foi obtido utilizando-se a velocidade do gás igual a 24m/s, tanto para o lavador circular quanto para o retangular. A eficiência máxima ocorrida foi de 96,57% para 0,6L/min de vazão e geometria retangular. Já a menor eficiência ocorreu para vazão de 0,4L/min e geometria circular, atingindo 80,80%. Na geometria retangular a maior parte das eficiências obtidas foram próximas ou acima de 90,00%, independente das condições de processo, o que mostra a alta eficiência do lavador na coleta de partículas finas.

Apesar de algumas vezes o Venturi circular apresentar resultados de eficiência de coleta superiores aos do retangular, o que pode-se concluir de fato sobre a geometria do Venturi, é que a garganta do lavador com seção retangular apresenta um melhor desempenho na coleta de partículas poluidoras, do que o circular, estando ambos sob as mesmas condições de operação.

Outra comparação realizada entre os lavadores circular e retangular é mostrada na Figura 32. Nesta situação, a única variável modificada em relação a situação da Figura 31, é que ao invés de estar trabalhando com 1 orifício, agora trabalhou-se com 2 orifícios na garganta dos lavadores.

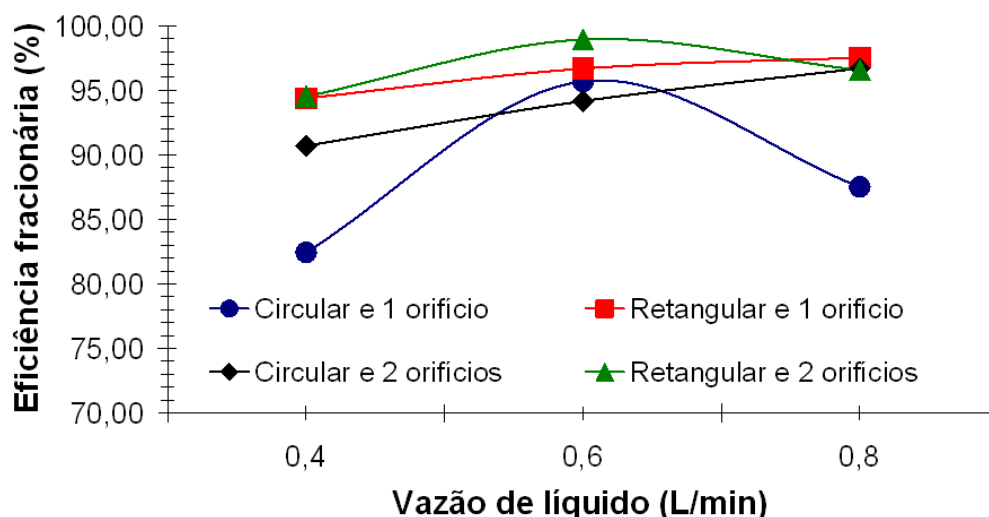


Figura 32 – Efeito da geometria do lavador – garganta de 117mm, partículas de 2,5 a 5 μ m e 2 orifícios

Nota-se que o lavador retangular apresentou os melhores resultados de eficiência fracionária de coleta, sendo que para a velocidade de 24m/s, a eficiência foi melhor tanto para a geometria circular quanto para a retangular. Neste caso, a menor eficiência observada foi para o lavador circular operando com 20m/s de velocidade do gás, onde a eficiência encontrada foi de 82,44%. Já a maior eficiência foi de 98,93%, para vazão de 0,6L/min e geometria retangular. Estes resultados de eficiência de coleta são maiores, se comparados com os anteriores discutidos para a Figura 31, visto que na Figura 31 considerou-se apenas 1 orifício para injeção de líquido, e na Figura 32, foram 2 orifícios. Isto mostra a relevância da variável número de orifícios para injeção do líquido de lavagem no desempenho dos lavadores Venturi, independentemente da geometria em questão.

5.1.6 Efeito do número de orifícios na garganta do lavador

O efeito do número de orifícios na eficiência fracionária é mostrado abaixo, na Figura 33. O caso mostrado é para o Venturi circular e retangular, com partículas de 5 a 10 μ m, vazão de líquido fixada em 0,6L/min e garganta de 90mm.

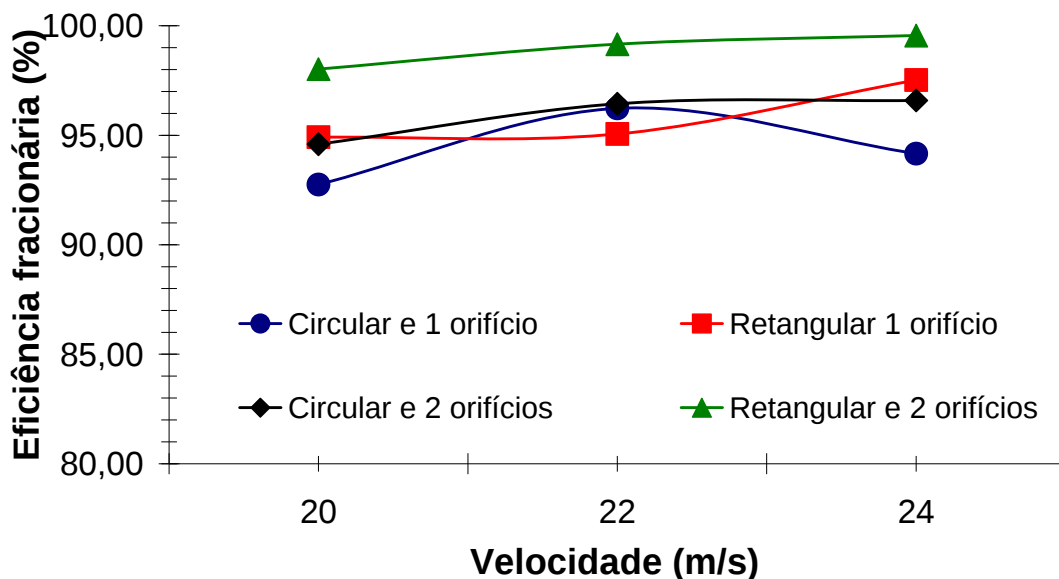


Figura 33 – Efeito do número de orifícios na garganta do lavador – garganta de 90mm, partículas de 5 a 10 μ m e vazão de 0,6L/min

A utilização de 2 orifícios de injeção de líquido proporcionou eficiências de coleta maiores que quando utilizado 1 orifício. Nota-se que o efeito da geometria do lavador mostrou-se significativo neste caso, sendo que mesmo com 2 orifícios, o lavador circular apresentou desempenho inferior ao retangular com apenas 1 orifício, em alguns casos específicos. O Venturi retangular com 2 orifícios alcançou eficiências de coleta mais altas, atingindo até 99,56% para a velocidade de 24m/s. Este resultado é muito bom, pois utilizando a garganta de comprimento intermediário em 90mm, e vazão intermediária de 0,6L/min, foi possível coletar em praticamente 100% os particulados finos de 5 a 10 μ m. A menor eficiência observada na figura foi de 92,75%, para o Venturi circular de 1 orifício e velocidade de 20m/s.

Nota-se na Figura 34 que segue, o efeito do número de orifícios visto numa outra óptica, para o lavador retangular, vazão fixa de 0,6L/min, garganta de 90mm e variando o diâmetro do particulado entre 2,5 e 5 μ m e 5 e 10 μ m.

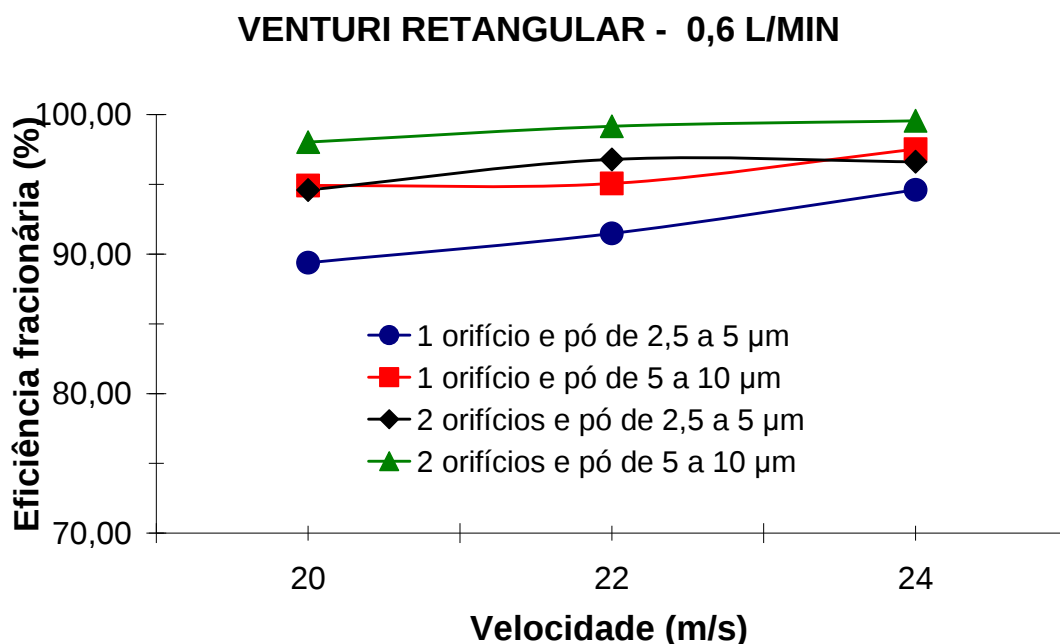


Figura 34 – Efeito do número de orifícios na garganta do lavador retangular – garganta de 90 mm e vazão de 0,6l/min

Novamente é possível ver que trabalhando-se com 2 orifícios para injeção do líquido de lavagem, a eficiência de coleta atingiu níveis mais altos do que trabalhando-se com apenas 1 orifício. Todas as eficiências estiveram acima de 89,00%, sendo o valor máximo obtido igual a 99,56% para a velocidade de 24m/s e 2 orifícios de injeção de líquido na garganta do lavador. É importante salientar que operando com 2 orifícios de injeção de líquido, o lavador continuou trabalhando com as mesmas vazões de líquido, porém, estas foram redistribuídas por 2 orifícios e não somente 1. Assim, o efeito do aumento do número de orifícios de injeção de líquido é interessante industrialmente, já que para uma mesma vazão (ou mesmo consumo de líquido de lavagem), são conseguidos níveis de eficiência de coleta superiores do que operando com apenas 1 orifício de injeção, ou seja, consegue-se otimizar o processo de limpeza do gás utilizando melhor o equipamento de controle disponível.

Na Figura 34, o Venturi operando com 1 orifício e na coleta das partículas de 5 a 10 μm , apresentou desempenho muito similar ao desenvolvido na coleta de partículas na faixa de 2,5 a 5 μm , porém, utilizando 2 orifícios de injeção de líquido. Isto confirma a relevância do número de pontos para injeção do líquido de lavagem na garganta do lavador, já que trabalhando com 2 orifícios a eficiência de coleta não caiu

da forma como teoricamente cairia, se o lavador nesta situação estivesse operando com apenas 1 orifício de injeção de líquido, visto que no caso, trata-se da coleta de um particulado mais fino (faixa de 2,5 a 5 μ m).

5.1.7 Efeito da penetração do jato líquido

O estudo da penetração do jato líquido de lavagem é mostrado na Figura 35 e na Figura 36. Neste caso, a penetração foi estimada pela equação (1) do modelo de VISWANATHAN *et al.* (1983). Na Figura 35 é mostrada a situação para 1 orifício de injeção de líquido na garganta do lavador, e na Figura 36 para 2 orifícios, sendo que como a penetração do jato não varia com a geometria do lavador, os resultados exibidos são válidos tanto para o lavador de geometria circular quanto para o de geometria retangular.

Nota-se na Figura 35 e Figura 36 que aumentando-se a vazão de líquido maiores penetrações do jato líquido de lavagem foram encontradas, visto que a velocidade do jato nesta situação também foi maior. A penetração do jato é diretamente proporcional a velocidade do mesmo, como mostrado na equação (1).

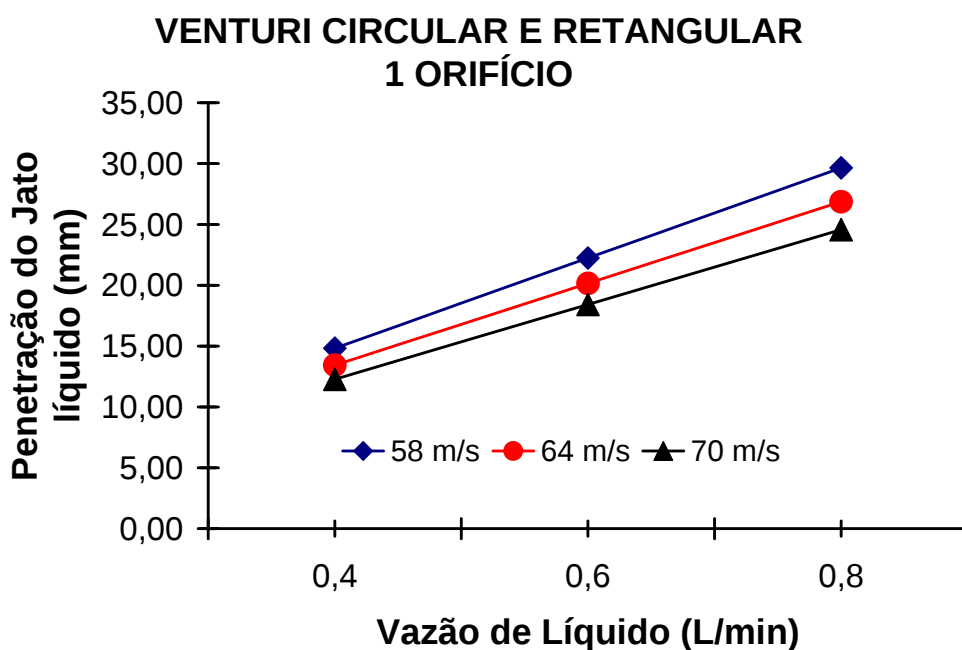


Figura 35 – Efeito da penetração do jato líquido – velocidade do gás na garganta de 58, 64 e 70m/s e 1 orifício

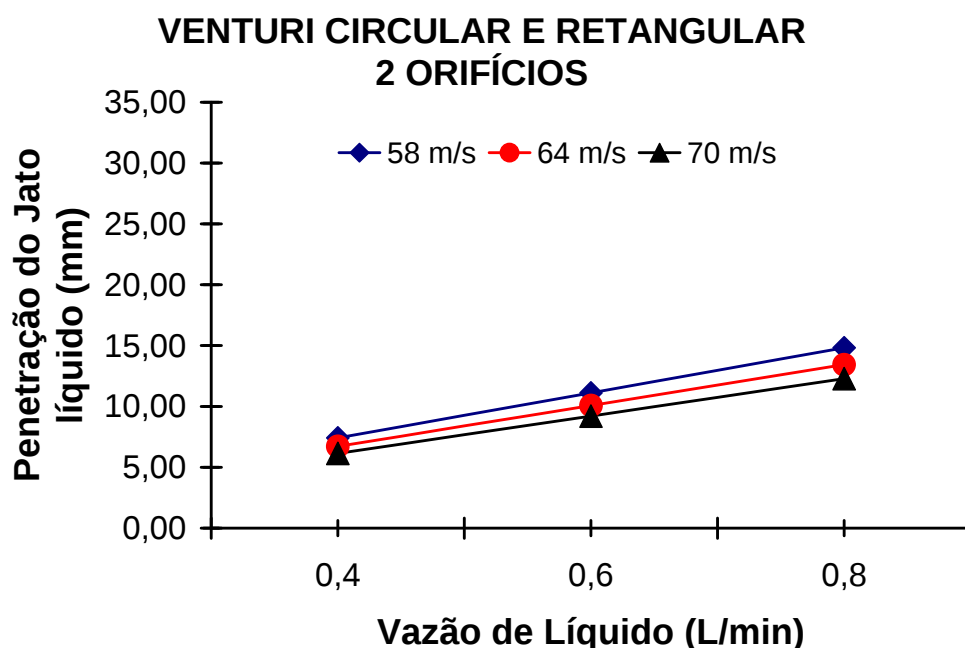


Figura 36 – Efeito da penetração do jato líquido – velocidade do gás na garganta de 58, 64 e 70m/s e 2 orifícios

Tanto na Figura 35 como na Figura 36 é possível verificar que o aumento na velocidade do gás proporcionou o maior achatamento do jato líquido, ocasionado pelo aumento da força de arraste conseqüente do aumento da velocidade, gerando assim jatos menos penetrantes para uma mesma vazão de líquido.

Trabalhando com 1 orifício na garganta do lavador (Figura 35) é possível visualizar que a penetração do jato foi mais intensa do que trabalhando-se com 2 orifícios (Figura 36). A penetração sendo mais intensa faz com que o jato líquido fique fora da região central da garganta, o que promove a maior formação de filme líquido nas paredes da tubulação, e diminuição na eficiência de coleta. Assim, este fenômeno ajuda a explicar porque trabalhando-se com 2 orifícios na garganta do lavador maiores níveis de eficiência de coleta foram observados nos experimentos.

A penetração máxima observada na Figura 35 foi de 29,65mm, para 58m/s de velocidade do gás na garganta e vazão de 0,8L/min. Já na Figura 36, a máxima penetração foi de 14,83mm, também para a vazão de 0,8L/min e velocidade de 58m/s. Utilizando 2 orifícios na garganta do lavador a penetração do jato ficou mais próxima do centro da garganta (17,5mm para o lavador retangular), o que contribuiu assim, para o melhor desempenho do lavador Venturi.

5.1.8 Comparação com os modelos da literatura

Aqui os resultados experimentais foram comparados com os modelos da literatura escolhidos neste trabalho. A Figura 37 e a Figura 38, ilustram respectivamente, uma comparação em função da vazão de líquido, para a garganta de 117mm, 2 orifícios na garganta, particulado de 2,5 a 5 μ m e velocidade do gás igual a 24m/s. É importante salientar que os modelos matemáticos trabalham com valores exatos de diâmetro do particulado, sendo assim, para eles ao invés de considerar a faixa de 2,5 a 5 μ m, considerou-se o valor exato de 2,5 μ m nos cálculos. Os cálculos foram realizados utilizando as Equações 2, 6 e 8. Analisando estas equações, percebe-se que elas não apresentam termo algum relacionado à geometria do lavador, comprimento da garganta ou com o número de orifícios na garganta.

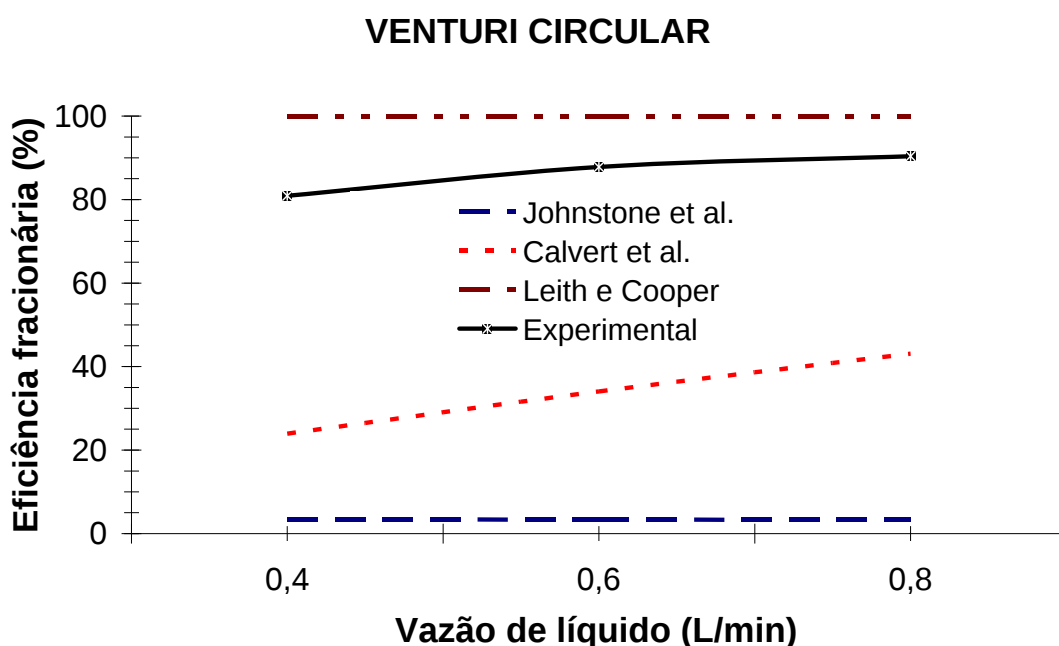


Figura 37 – Eficiência fracionária do Venturi circular comparada com modelos clássicos da literatura - garganta de 90mm, particulado de 2,5 a 5 μ m, velocidade do gás 20 m/s e 2 orifícios

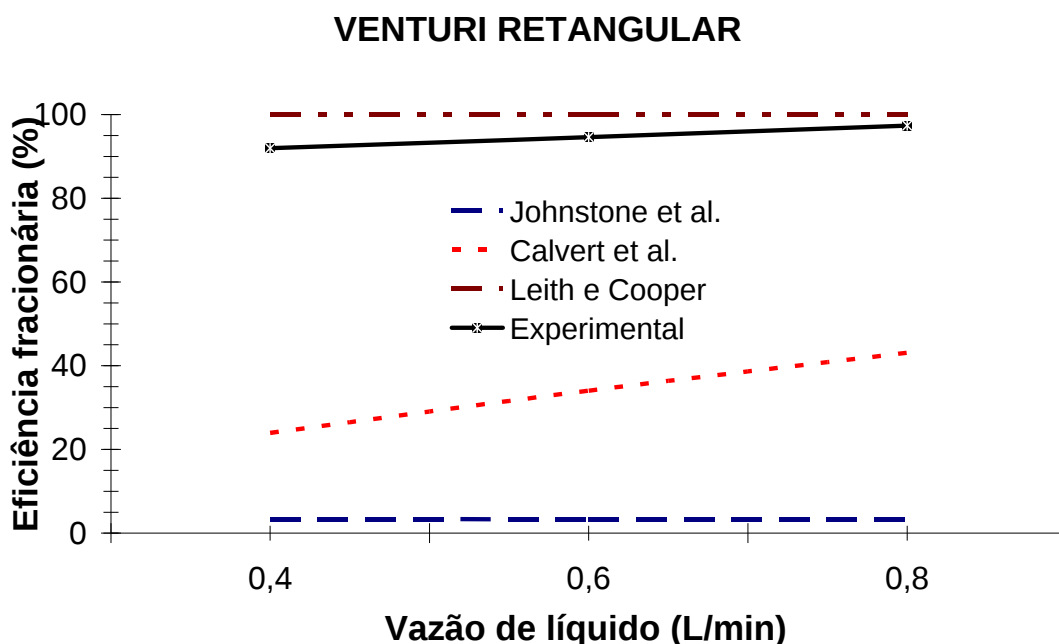


Figura 38 – Eficiência fracionária do Venturi retangular comparada com modelos clássicos da literatura - garganta de 90mm, particulado de 2,5 a 5 μ m, velocidade do gás 20 m/s e 2 orifícios

Observa-se que as eficiências dos modelos de Johnstone e de Calvert subestimaram os testes experimentais, não atingindo os 50% de eficiência de coleta, sendo que o de Johnstone foi o mais impreciso, não atingindo 10% de eficiência. Para esses modelos, o aumento da velocidade do gás e da vazão de líquido tem efeito na eficiência, porém outras variáveis são desconsideradas, como comprimento da garganta, a presença de filme líquido, a penetração do jato líquido e a dispersão das gotas no interior do lavador, além de outras variáveis de processo. Já no modelo de Leith e Cooper as eficiências estão aproximadas, já que este considera a queda de pressão, porém superestima muito os dados experimentais, ao ponto de em nenhum momento independente das condições operacionais do processo apresentar eficiências fracionárias menores que 95,00%. Assim, como os demais modelos avaliados, o de Leith e Cooper também não conseguiu prever os valores experimentais aceitavelmente.

Os lavadores Venturi circular e retangular mostraram-se eficientes na coleta do particulado estudado, podendo atingir altas eficiências com baixo consumo de água (0,4 L/min), desde que manipulado corretamente. O Venturi retangular entretanto,

mostrou-se mais eficiente se comparado com o circular. De acordo com todos os testes realizados, a máxima eficiência alcançada foi em geral, para a vazão de 0,6L/min (embora que em alguns casos, a vazão de 0,8L/min tenha se mostrado mais adequada), velocidade do gás de 24m/s, garganta de 117mm, e também com 2 orifícios para injeção do líquido de lavagem. Quando comparado com os modelos matemáticos propostos, os resultados experimentais não puderam ser previstos matematicamente com precisão confiável.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

- Neste trabalho foi possível avaliar a eficiência fracionária de coleta para as duas configurações de lavadores Venturi analisadas, visto que todas as variáveis propostas na realização deste projeto foram checadas, chegando à conclusão, de que estes lavadores se mostraram eficientes na coleta dos particulados finos de 0 a 10 μ m de diâmetro quando controladas adequadamente as variáveis envolvidas;
- A análise no efeito do diâmetro do particulado separando a faixa inicial estabelecida de 0 a 10 μ m em três faixas intermediárias, iguais a 0 a 2,5 μ m; 2,5 a 5 μ m e 5 a 10 μ m, ocasionaram na possibilidade de provar a alta eficiência do lavador na coleta de particulados finos e também, na comprovação de que partículas mais finas produzem eficiências de coleta menores, porém satisfatórias dependendo das condições operacionais consideradas;
- Maiores velocidades do gás causaram um maior nível de eficiência fracionária de coleta, sendo a velocidade de 24m/s a mais adequada;
- Em geral, o aumento da vazão de líquido gerou maiores eficiências, sendo que a vazão de influência mais efetiva neste aumento foi a de 0,6L/min;
- Aumentando-se o comprimento da garganta do lavador de 64 até 117mm verificou-se aumentos significativos na eficiência de coleta;

- A geometria retangular para o Venturi foi a que possibilitou os maiores níveis de eficiência de coleta, apresentando eficiências fracionárias bem superiores em comparação com a geometria circular em alguns casos;
- As eficiências fracionárias de coleta para partículas de 0 a 2,5 μ m apresentaram os menores resultados, visto que estas são as mais difíceis de serem coletadas. Entretanto, controlando-se as variáveis de processo adequadamente, foram atingidos valores de eficiência maiores que 95,00% para algumas configurações;
- Para as faixas de 2,5 a 5 μ m e 5 a 10 μ m, as eficiências fracionárias obtidas foram na maioria das vezes superiores a 90,00%;
- Para o lavador de seção circular, foram obtidas eficiências fracionárias de coleta acima de 30,00% em todos os casos, superando os 98,00% de eficiência dependendo da configuração de lavador avaliada;
- Para o lavador de seção retangular, foram obtidas eficiências fracionárias de coleta acima de 60,00% em todos os casos, superando os 99,00% de eficiência dependendo da configuração de lavador avaliada;
- A eficiência fracionária do Venturi circular foi de praticamente 100% na coleta de partículas de diâmetro superior a 20 μ m e acima de 90,00% para as maiores que 10 μ m;
- O Venturi retangular apresentou eficiências fracionárias de praticamente 100% para partículas de diâmetro superior a 20 μ m e acima de 92,00% para as maiores que 10 μ m;
- A utilização de 2 orifícios para injeção do líquido de lavagem na garganta dos lavadores circular e retangular, proporcionou maiores níveis de eficiência (superando os 99,00% em algumas situações), e o mais importante, sem que fosse aumentada as vazões de líquido utilizadas, o que implicaria num maior uso do recurso de água;
- Utilizando 2 orifícios na garganta do lavador a penetração do jato líquido foi menor do que trabalhando-se com 1 orifício, entretanto, para o primeiro caso, a penetração do jato ficou mais próxima do centro da garganta do lavador, o que contribuiu assim, para o melhor desempenho do lavador Venturi, seja para geometria circular ou retangular;
- Mesmo com baixo consumo de água (0,4 L/min), o lavador Venturi circular e retangular mostraram-se eficientes na coleta de particulados finos, atingindo em alguns casos eficiências de coleta superiores a 90,00% para a menor faixa de partículas avaliada (0 a 2,5 μ m);

- A configuração velocidade do gás de 24m/s, garganta de 117mm de comprimento, vazão de líquido de 0,6L/min, geometria retangular e 2 orifícios para a injeção do líquido de lavagem, mostrou-se a mais apropriada de ser utilizada, pois proporcionou o melhor desempenho do lavador Venturi;
- Os menores níveis de eficiência fracionária de coleta foram obtidos para a configuração de Venturi circular, com 1 ponto de injeção de líquido, vazão de 0,4L/min, garganta de 64mm de comprimento e velocidade do gás de 20m/s;
- Embora o Venturi circular tenha apresentado desempenho inferior na maioria das vezes se comparado com o retangular, controlando-se adequadamente as variáveis de processo, este modelo de lavador também pode ser utilizado com eficiência na coleta de partículas na faixa de 0 a 10 μ m;
- O modelo de Cooper foi o que mais se aproximou aos testes experimentais para o lavador circular e retangular. Já os de Johnstone e Calvert mantiveram-se inferiores, sendo que estes três modelos avaliados não conseguiram prever os dados experimentais com precisão confiável;
- Por fim, a utilização do lavador de gases do tipo Venturi mostrou-se viável no que diz respeito à resultados no controle da emissão de gases contaminados por particulados finos na faixa respirável.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

- Avaliar outras configurações de injeção de líquido, aumentando o número de orifícios na garganta do lavador, já que aumentos significativos de eficiência fracionária foram observados nesta situação;
- Analisar experimentalmente a distribuição e tamanho das gotas formadas durante a atomização e os efeitos destas sobre a eficiência fracionária de coleta;
- Desenvolver um modelo matemático que consiga prever aceitavelmente os dados experimentais de eficiência de coleta obtidos até o presente momento nas pesquisas realizadas, visto que os modelos analisados no presente trabalho não foram eficientes.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABURTO, B.V.H.; ROMIEU, I. Particulate air pollution and daily mortality: Can results be generalized to Latin American countries. **Salud Pública**, Mexico, v.39 n.5. Cuernavaca. Setembro/Outubro. 1997.

ADELBERG, M. Break-up rate and penetration of a liquid jet in a gas stream. **AIAA Journal**, v.5, p. 1408-1415, 1967.

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

ARBEX, M. A.; CANÇADO, J. E. D., PEREIRA, L. A. A., BRAGA, A. L. F., SALDIVA, P. H. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, p. 5-10. 2004.

BRAND, M. A. Wastes: source of energy. **The Forest Product Magazine**, ano7, n.47. Curitiba, PR. Agosto. 2005.

CARVACHO, O.; CELIS, J., MORALES, R., ZAROR, C., INZUNZA, J., FLOCCHINI, R. Chemical characterization of the inhalable particulate matter in city of Chillan, Chile. **J.Chil. Chem. Soc.**, Chile, v. 48. n. 2. Concepción. jun. 2003.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Índice e Padrões de Qualidade**. São Paulo, 2006.

COSTA, M. A. M.; GONÇALVES, J. A. S.; SERRA, K. L.; COURY, J. R. Estudo da eficiência fracionária em lavadores Venturi. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS. 28., 2000. **Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. v.1. 2000. p. 1-8.

COSTA, M. A. M. **Eficiência de coleta de partículas em lavadores Venturi**. 2002. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2002.

COSTA, M. A. M.; GONÇALVES, J. A. S., COURY, J. R., HENRIQUE, P. R. Droplet size in a rectangular Venturi scrubber. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.21. n. 2. p. 335 - 343. 2004.

COSTA, M. A. M. Performance of a Venturi scrubber in the removal of fine powder from a confined gas stream. **Materials Research**, v. 8. n 2. p. 177 - 179. 2005.

DUCHIADE, M. P. **Mortalidade Infantil por Pneumonias na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, 1976-1986**. 1991. 96 f. Dissertação (Mestrado em Epidemiologia) – Departamento de Epidemiologia da Escola Nacional de Saúde Pública e da Secretaria Municipal de Saúde, Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro. 1992.

FIESP/CIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo/Centro das Indústrias do Estado de São Paulo. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa**. São Paulo, 2001.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. Minas Gerais, 2009. Apresenta política de proteção, conservação e melhoria da qualidade ambiental. Disponível em: <http://www.feam.br/index.php?option=com_content&task=view&id=80&Itemid=10>. Acesso em: 25 maio. 2009.

GALVÃO FILHO, J. B. **Poluição do ar: aspectos técnicos e econômicos do meio ambiente**. 1989. Disponível em: <<http://www.auditoriaambiental.com.br/artigos/32.pdf>>. Acesso em: 23 maio 2009.

GRAUER, A.; KAWANO, M. Aproveitamento de resíduos para biomassa é rentável. **Wood Magazine**, ano 18, n.110. Curitiba, PR. Janeiro. 2008.

GONÇALVES, J. A. S. **Uma análise dos processos de remoção de poluentes atmosféricos por gotas de chuva**. 1997. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1997.

GONÇALVES, J. A. S. **Aspectos de modelagem matemática de lavador Venturi**. 2000. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2000.

GOUVEIA, N.; FREITAS, C. U. de. MARTINS, L. C., MARCILIO, I, O. Hospitalizações por causas respiratórias e cardiovasculares associadas à contaminação atmosférica no Município de São Paulo, Brasil. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, 22(12):2669-2677, São Paulo, SP. dez. 2006.

GUERRA, V. G. **Investigação do efeito de injeção de líquido por orifícios múltiplos na formação de gotas em um lavador Venturi**. 2009. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2009.

HOFFMAN, G. **Brasil investe em hidrelétricas e usinas de biomassa**. DW-World.De Deutsche Welle. 2006. 3p. Disponível em: <<http://www.dw-world.de/dw/article/0,,1877514,00.html>>. Acesso em: 23 mai. 2009.

LANDIM, A. B.; ALMEIDA, R. S. de, AMARAL, E. J.do, FERNANDES, S. M. Sistema de lavagem e recuperação de biomassa. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL. 34., 2001, Rio de Janeiro. **Anais do 34º Congresso Anual de Celulose e Papel**. Rio de Janeiro: ABTCP, 2001. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd51/lavagem.pdf>>. Acesso em 25 maio 2009

LANDIM, A. B.; ALMEIDA, R. S. de, AMARAL, E. J.do, FERNANDES, S. M. Sistema de recuperação de biomassa. **Wood Magazine**, ano 18, n.104. Curitiba, PR. Abril. 2007.

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

OLIVEIRA, C. A.; COURRY, J. R. Performance of a Venturi scrubber in the removal of inhalable particles from the air. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, p. 9-20. 1996.

REBELATTO, A.L. **Determinação de índices quantitativos de material particulado inalável nos períodos seco e úmido na cidade de Cuiabá**. 2005. 125 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Departamento de Física e Meio Ambiente, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá. 2005.

Resolução Nº. 382, de 26 de Dezembro de 2006, Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, 2006.

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

VISWANATHAN, S.; ST. PIERRE, C. C., GNYP, A. W. Jet penetration measurements in a Venturi scrubber. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.61, p. 504-508, 1983.

VISWANATHAN, S.; GNYP, A. W., ST. PIERRE, C. C. Examination of gas flow in a Venturi scrubber. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, v.23, p. 303-308, 1984.

VISWANATHAN, S. Modeling of Venturi scrubber performance. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, v.36, n.10, p. 4308-4317, 1997.

VISWANATHAN, S. Examination of liquid film characteristics in the prediction of pressure drop in a Venturi scrubber. **Chemical Engineering Science**, v.53,n.17, p. 3161-3175, 1998.