



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

**Estudo do Desempenho de Lavadores de Gases do Tipo Venturi com Seção
Circular**

Lucas Meili

**Uberlândia - MG
2006**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Estudo do Desempenho de Lavadores de Gases do Tipo Venturi com Seção Circular

Lucas Meili

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química na área de concentração de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

**Uberlândia - MG
2006**

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

M513e Meili, Lucas, 1980-

Estudo do desempenho de lavadores de gases do tipo venturi com seção circular / Lucas Meili. - Uberlândia, 2006.

70f. : il.

Orientador: João Jorge Ribeiro Damasceno.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui bibliografia.

1. Separação (Tecnologia) - Teses. 2. Ar - Poluição - Teses. I. Damasceno, João Jorge Ribeiro. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.066

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 23/02/2006.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
Orientador (PPG-EQ/UFU)

Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
Co-Orientador (PPG-EQ/UFU)

Dr. Marcos Vinícius Rodrigues

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo
(PPG-EQ/UFU)

A Deus.

Minha mãe Neuza Maria Meili.

Meu pai Ivo Meili (*in memorian*).

Minha irmã Angela

A minha namorada Vanessa.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma contribuíram para o êxito deste trabalho, e em especial:

- À Deus por me conduzir em meus caminhos, iluminar minhas decisões e estar sempre presente em minha vida;
- À minha mãe e irmã, por serem as pessoas mais importantes de minha vida e por estarem ao meu lado em todos os momentos me apoiando e me dando segurança em tudo que faço;
- Ao meu pai que já não está mais aqui, mas que de onde estiver sempre me deu luz, tranquilidade e alegria para enfrentar as dificuldades que aparecem;
- À minha namorada Vanessa, pela compreensão, confiança e por toda a força e apoio ao longo deste período, sem você, com certeza, seria mais difícil;
- Ao amigo e orientador Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno, pela confiança, competência, disponibilidade e importantes ensinamentos;
- Ao amigo e co-orientador Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde, pelo auxílio amizade e atenção dispensadas na realização deste trabalho;
- Aos professores do PPGEQ da UFU pelo valioso conhecimento que me forneceram e especialmente ao amigo e Prof. Marcos Barrozo, pelas dicas e aconselhamentos ao longo desta etapa;
- Ao amigo Prof. Luiz Antonio de Almeida Pinto por todos os conselhos dados, com certeza foi um dos meus maiores incentivadores para a realização do mestrado;
- Aos técnicos e funcionários da Faculdade de Engenharia Química e em especial ao José Henrique pela amizade e por toda ajuda prestada;
- Aos colegas da pós-graduação, em especial à Aderjane, Ballu, Danylo, Demian e Reimar que compartilharam comigo as primeiras trilhas deste caminho e pelos momentos alegres que passamos juntos;
- Ao alunos de iniciação científica Luciano, Neiton e em especial ao Murilo, por toda sua dedicação e apoio para a realização deste trabalho;
- À CAPES pelo auxílio financeiro.

"Uma longa viagem começa com um único passo".

Lao-Tsé

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS	VI
RESUMO.....	VII
ABSTRACT	VIII
INTRODUÇÃO	1
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 - A POLUIÇÃO DO AR.....	3
2.2 - OS LAVADORES DE GASES.....	7
2.3 - O LAVADOR VENTURI.....	8
2.4 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE LAVADORES VENTURI	12
2.5 - SISTEMAS DE INJEÇÃO	13
2.6 – ALGUMAS CONFIGURAÇÕES DE LAVADORES DE GASES VENTURI	16
2.7 - MODELOS DE EFICIÊNCIA DE COLETA	21
2.7.1 – Lei da Potência.....	22
2.7.2 – Modelo de TAHERI; HAINES (1969)	23
2.7.3 – Modelo de HESKETH (1974, apud GONÇALVES, 2000)	23
2.7.4 - Modelo de JOHNSTONE et al. (1954)	24
2.7.5 - Modelo de CALVERT et al. (1972)	25
2.7.6 - Modelo de YUNG et al. (1978)	26
2.7.7 - Modelo de BOLL (1973)	27
2.7.8 - Modelo de CALVERT Modificado (2005)	28
2.8 – ALGUNS MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DA GOTA	28
2.8.1 - Modelo de NUKIYAMA; TANASAWA (1938).....	28
2.8.2 - Modelo de BOLL (1974)	29
2.9 - ALGUNS ARTIGOS IMPORTANTES SOBRE LAVADORES VENTURI	29
MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 – O MATERIAL PARTICULADO	33

3.2 - O LÍQUIDO DE LAVAGEM	35
3.3 - O APARATO EXPERIMENTAL	35
3.4 - O SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE PÓ.....	37
3.5 - OS LAVADORES VENTURI	38
3.6 - SISTEMA DE INJEÇÃO DE LÍQUIDO	39
3.7 - O PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	39
3.8 - MODELOS TEÓRICOS PARA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA GLOBAL DE COLETA.....	42
RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1 - ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	45
4.2 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO GÁS E DA VAZÃO DE LÍQUIDO NA EFICIÊNCIA GLOBAL DE COLETA.....	54
4.3 - INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DA GARGANTA NA EFICIÊNCIA GLOBAL DE COLETA.....	58
4.4 - COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA GLOBAL DE COLETA EXPERIMENTAL COM AS ESTIMADAS USANDO MODELOS SEMI-EMPÍRICOS	60
CONCLUSÕES E SUGESTÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação esquemática do lavador venturi.	8
Figura 2.2 – Coleta de partícula devido ao mecanismo de impactação inercial.	10
Figura 2.3 – Coleta de partícula devido ao mecanismo de interceptação direta.	11
Figura 2.4 – Coleta devido ao mecanismo de difusão browniana	12
Figura 2.5 - Esquemas de peças de injeção (ROBERTS; HILL, 1981)	14
Figura 2.6 - Peça de injeção do tipo fenda (RUDNICK et al., 1986).....	15
Figura 2.7 - Peça de injeção do tipo vertedouro (MAYINGER; LEHNER, 1995).....	15
Figura 2.8 - Peça de injeção do tipo bico de atomização.....	16
Figura 2.9 - Lavador venturi Pease-Anthony com conexão tangencial.	17
Figura 2.10 - Lavador venturi Pease-Anthony com conexão turbinada (DULLIEN, 1989).	17
Figura 2.11 - Lavador Pease-Anthony com injeção auto-regulada (MAYINGER; LEHNER, 1995).....	18
Figura 2.12 - Lavador venturi do tipo prismático (ALLEN, 1996).....	18
Figura 2.13 - Lavador venturi do tipo ejedor ou spray pré-formado (CALVERT, 1977). ...	19
Figura 2.14 - Lavador venturi do tipo garganta ajustável com atuador (www.epa.gov.br).	20
Figura 2.15 - Lavador venturi do tipo garganta ajustável com placa móvel (www.epa.gov.br).....	20
Figura 2.16 - Lavador venturi com plataforma de hastes (www.epa.gov.br).	21
Figura 3.1 – Distribuição granulométrica cumulativa.....	35
Figura 3.2 – Vista esquemática do aparato experimental.....	36
Figura 3.3 – O sistema de alimentação de pó.....	37
Figura 3.4 - Fotografia do alimentador de pó do tipo prato giratório.....	37
Figura 3.5 - Fotografia do venturi utilizado para a sucção do pó.....	38
Figura 3.6 - Fotografia ilustrativa dos seis lavadores venturi utilizados.....	39
Figura 3.7 - Fotografia da peça de injeção de líquido.	39
Figura 4.1 - Gráfico de pareto para o primeiro planejamento.....	46
Figura 4.2 - Gráfico de pareto para o segundo planejamento.....	47
Figura 4.3 - Valores estimados Vs valores observados para o primeiro planejamento	48

Figura 4.4 - Valores estimados Vs valores observados para o segundo planejamento	49
Figura 4.5 - Probabilidade normal dos resíduos para o primeiro planejamento	49
Figura 4.6 - Probabilidade normal dos resíduos para o segundo planejamento	49
Figura 4.7 - Distribuição de resíduos para o primeiro planejamento	50
Figura 4.8 - Distribuição de resíduos para o segundo planejamento.....	51
Figura 4.9 - Superfície de resposta para o lavador venturi nº 1.....	51
Figura 4.10 - Superfície de resposta para o lavador venturi nº 2.....	52
Figura 4.11 - Superfície de resposta para o lavador venturi nº 3.....	52
Figura 4.12 - Superfície de resposta para o lavador venturi nº 4.....	53
Figura 4.13 - Superfície de resposta para o lavador venturi nº 5.....	53
Figura 4.14 - Superfície de resposta para o lavador venturi nº 6.....	54
Figura 4.15 - Efeito da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência global para comprimento de garganta de 66 mm para o primeiro planejamento.....	55
Figura 4.16 - Efeito da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência global para comprimento de garganta de 99 mm para o primeiro planejamento.....	55
Figura 4.17 - Efeito da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência global para comprimento de garganta de 132 mm para o primeiro planejamento.....	56
Figura 4.18 - Efeito da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência global para comprimento de garganta de 66 mm para o segundo planejamento.....	57
Figura 4.19 - Efeito da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência global para comprimento de garganta de 99 mm para o segundo planejamento.....	57
Figura 4.20 - Efeito da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência global para comprimento de garganta de 132 mm para o segundo planejamento.....	58
Figura 4.21 - Comparação entre diâmetros para comprimento de garganta de 66mm e vazão de líquido de 180 mL/min.....	58
Figura 4.22 - Comparação entre diâmetros para comprimento de garganta de 132mm e vazão de líquido de 540mL/min.....	59
Figura 4.23 - Comparação entre diâmetros para comprimento de garganta de 66mm e velocidade do ar de 4m/s.	59
Figura 4.24 - Comparação entre diâmetros para comprimento de garganta de 99mm e velocidade do ar de 7m/s.	60

Figura 4.25 - Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos para 66 mm de comprimento de garganta, 180mL/min de vazão de líquido para o primeiro planejamento.....	61
Figura 4.26 - Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos para 66 mm de comprimento de garganta, 360 mL/min de vazão de líquido e para o primeiro planejamento.....	62
Figura 4.27 - Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos para 66 mm de comprimento de garganta, 540 mL/min de vazão de líquido e para o primeiro planejamento.....	62
Figura 4.28 - Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos para 66 mm de comprimento de garganta, 180 mL/min vazão de líquido e para o segundo planejamento.....	63
Figura 4.29 - Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos para 66 mm de comprimento de garganta, 360 mL/min de vazão de líquido e para o segundo planejamento.....	63
Figura 4.30 - Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos para 66 mm de comprimento de garganta, 540 mL/min de vazão de líquido e para o segundo planejamento.....	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fontes e características de alguns poluentes na atmosfera (www.fepam.rs.gov.br).....	4
Tabela 2.2 - Padrão Nacional de Qualidade de Ar (CONAMA N° 3 de 28/06/1990)	6
Tabela 2.3 – Mecanismos de coleta de partículas em lavadores de gases (www.epa.gov). ...	10
Tabela 2.4 – Parâmetros da Lei da Potência para lavadores (PILAT; NOLL, 2000).....	22
Tabela 3.1 - Distribuição de tamanho da rocha fosfática	34
Tabela 3.2 - Dimensões dos lavadores venturi.	38
Tabela 3.3 - Matriz para o primeiro e segundo planejamento com fatores codificados.	40
Tabela 3.4 - Fatores e níveis para os planejamentos dos experimentos.	41
Tabela 4.1 - Resultados da matriz do primeiro planejamento experimental (diâmetro da garganta de 33 mm).....	43
Tabela 4.2 - Resultados da matriz do segundo planejamento experimental (diâmetro da garganta de 23 mm).....	44
Tabela 4.3 – Resultado da análise estatística para o primeiro planejamento.	46
Tabela 4.4 – Resultado da análise estatística para o segundo planejamento.	46

RESUMO

Nos últimos anos a legislação ambiental vem se tornando mais rígida com o objetivo de minimizar a emissão de poluentes atmosféricos. Assim, os lavadores venturi surgem como alternativa de equipamentos com alta eficiência de separação numa ampla faixa granulométrica apresentam poucas restrições e habilidade tanto no controle de pó quanto de aerossóis. Este trabalho tem como objetivos estudar a influência das variáveis vazão de líquido, velocidade do gás e comprimento da garganta na eficiência global de coleta em lavadores venturi com seção circular e comparar com os modelos de Calvert (CALVERT *et al.*, 1972), Calvert modificado (RIBEIRO, 2005) e Johnstone (JOHNSTONE *et al.*, 1954). Foi utilizado como material particulado nos experimentos foi pó de rocha fosfática originária de Patos de Minas-MG de densidade de 3,040g/cm³. O sistema experimental utilizado no trabalho consistia de seis lavadores venturi com seção circular (três com 23mm de diâmetro da garganta e os outros três com 33mm), com injeção de líquido através de orifício simples localizado nas gargantas. Para a realização dos experimentos foram utilizados dois planejamentos experimentais fatoriais 3³ do tipo completo, um para cada diâmetro de garganta, resultando em 27 experimentos cada um. Foram avaliadas as variáveis comprimento de garganta nos níveis de 66, 99 e 132mm de comprimento de garganta, vazão de líquido nos níveis de 180, 360 e 540mL/min e velocidade do ar nos níveis de 4, 7 e 10m/s. Foram produzidas eficiências globais de coleta na faixa de 11 a 89% para o primeiro planejamento (diâmetros de garganta de 33mm) e de 20 a 100% para o segundo (diâmetros de garganta de 23mm). Através da análise estatística dos resultados obtidos verificou-se que, para o primeiro planejamento, considerando-se um nível de significância de 10%, as variáveis vazão de líquido, velocidade do ar e a interação quadrática do comprimento da garganta tiveram influência significativa na resposta eficiência global de coleta, enquanto que para o segundo planejamento as variáveis vazão de líquido, velocidade do ar, interação entre vazão de líquido e velocidade do ar e as interações quadráticas da vazão de líquido e velocidade do ar tiveram influência significativa na resposta eficiência de coleta. Observou-se uma tendência de aumento na remoção das partículas com o aumento da velocidade do ar e da vazão de líquido. Verificou-se que ao variar-se o diâmetro da garganta de 33mm para 23mm ocorreu um aumento na eficiência global de coleta. Ao comparar-se as previsões dos modelos de eficiência global de coleta de Calvert, Calvert modificado e Johnstone com os valores obtidos experimentalmente observou-se que o modelo de Calvert superestimou os valores de eficiência em baixas velocidades e subestimou em altas, os modelos de Calvert modificado e de Johnstone subestimaram os valores de eficiência.

ABSTRACT

In the last years the ambient legislation are becoming more rigid with the objective to minimize the emission of atmospheric pollutants. Thus, the venture scrubbers appear as alternative of equipment with high efficiency of separation in an ample grain sized band and present few operational restrictions and can be used to collect both particulate and gaseous pollutants. In this work it was studied the performance of venturi scrubbers with circular section in different operational conditions of length throat, liquid flow and air velocity and to compare with the results gotten through the models of Calvert (CALVERT *et al.*, 1972), modified Calvert (RIBEIRO, 2005) and Johnstone (JOHNSTONE *et al.*, 1954). The solid used in the experiments was phosphate powder from Patos de Minas (Minas Gerais, Brazil) with a density of (3040Kg/m^3) as determined by hot picnometry. The experimental system used in this work it consisted of six venture scrubbers with circular section (three with 23 mm of throat diameter and others three with 33 mm) with injection of liquid through simple orifice located in the throats. The efficiency was valued with two experimental design kind 3^3 with 27 experiments, one for each throat diameter. It was evaluated the length throat in the levels 66, 99 and 132mm of throat length, the liquid flow in the levels 180, 360 and 540 mL/min and the air velocity in the levels 4, 7 and 10 m/s. Global collection efficiencies was produced with values between 11 and 89% for the first design (33 mm of throat diameters) and values between 20 and 100% for the second design (23 mm of throat diameters). Through the statistical analysis of the results, for the first design, it was verified that, considering a level of significance of 10%, the variables liquid flow, air velocity and the quadratic interaction of throat length had significant influence in the global efficiency collection. For the second design, it was verified that the variables liquid flow, air velocity, interaction between liquid flow and air velocity and the quadratics interactions of liquid flow and air velocity had significant influence in the global efficiency collection. A trend of increase in the removal of particles with the increase of the liquid flow and air velocity was observed. It was verified that when varying the throat diameter of 33mm for 23mm occurred an increase in the global efficiency collection. The predictions of the global efficiency collection models of Calvert, modified Calvert and Johnstone with the gotten values experimentally were observed that the models of Calvert overestimated the values of efficiency in low air velocities and substimated in high air velocities, the modified Calvert model and the Johnstone model substimated the values of efficiency.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A poluição do ar por partículas suspensas é um dos principais fatores causadores de doenças crônicas do aparelho respiratório. Nos últimos anos, em decorrência desse fato, a legislação específica vem se tornando mais rígida com o objetivo de minimizar a emissão destas partículas para a atmosfera. De acordo com a resolução do CONAMA de N° 3 de 28/06/90 os limites estabelecidos para partículas inaláveis (diâmetro $< 10 \mu\text{m}$) num padrão primário (nível máximo) são de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e secundário (nível desejável) são de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. As atividades industriais, bem como, o funcionamento de motores de combustão são os principais responsáveis pela emissão de partículas respiráveis.

A rigidez das leis ambientais exige, por parte das indústrias, um controle rigoroso na emissão das partículas inaláveis. Sistemas de separação convencionais, como caixas de poeira e ciclones, apresentam uma eficiência de separação baixa para partículas inaláveis, o que exige a utilização de equipamentos mais eficientes e, conseqüentemente, mais caros, como precipitadores eletrostáticos e filtros de mangas. Entretanto, esses tem um custo elevado e apresentam diversas restrições. Assim, a utilização de equipamentos com alta eficiência de separação numa ampla faixa granulométrica e que apresentam poucas restrições operacionais, que é o caso dos lavadores de gases, vem aumentando. Portanto, o estudo do processo de separação em lavadores de gases objetivando a otimização e especificação destes equipamentos é de fundamental importância.

Os lavadores de gases utilizam líquido para “lavar” os poluentes das correntes de gasosas. Os lavadores de gases são um dos principais aparelhos para controle de emissões gasosas. São equipamentos capazes de trabalhar a altas temperaturas e umidades, necessitam de pouco espaço, podem remover tanto gases quanto partículas, e, devido à utilização de água para a separação, a possibilidade de explosões é minimizada.

Dentre os lavadores de gases, os do tipo venturi se destacam pela sua alta eficiência de coleta. Além disso, são equipamentos que podem remover partículas, pequenas (tamanho $< 10 \mu\text{m}$), de correntes gasosas (DULLIEN, 1989). Os lavadores venturi são robustos, simples e podem ser usados com ácidos e gases corrosivos, bem como com partículas coesivas (MUIR, 1992). A habilidade no controle tanto de pó quanto de aerossóis, faz com que ele tenha um grande campo de aplicações industriais (CHEREMISINOFF, 1993).

Diversas pesquisas demonstram que as eficiências de coleta de lavadores venturi dependem de muitas variáveis, como a velocidade do gás, a vazão de líquido, o tipo de injeção de líquido e distribuição de tamanho das partículas, dentre outras (BRINK; CONTANT, 1958).

Assim, o presente trabalho tem por objetivo estudar a influência das variáveis vazão de líquido, velocidade do gás e comprimento da garganta na eficiência global de coleta em lavadores venturi com seção circular e comparar os resultados obtidos com as estimativas obtidas utilizando-se os principais modelos desenvolvidos para descrever o desempenho destes, como os modelos de Calvert (CALVERT *et al.*, 1972) e Calvert modificado (RIBEIRO, 2005).

No Capítulo 2 será apresentada uma revisão sobre os lavadores venturi e alguns artigos relevantes encontrados na literatura. No Capítulo 3 serão apresentados os equipamentos e metodologia utilizada para realização dos experimentos. Os resultados obtidos serão apresentados e discutidos no Capítulo 4 e no capítulo seguinte serão apresentadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - A Poluição do Ar

A poluição do ar pode ser definida como a presença de qualquer material na atmosfera que possa ter um efeito nocivo para a vida em nosso planeta. Segundo STANDER Jr. (2000) a definição para poluição do ar é “qualquer agente poluente do ar ou combinação de agentes, incluindo qualquer substância ou matéria física, química, biológica ou radioativa, que é emitida para o ambiente aéreo. Tais termos incluem qualquer precursor para a formação de poluentes do ar...”.

De acordo com a resolução do CONAMA de nº 03/90 "entende-se como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; inconveniente ao bem-estar público; danoso aos materiais, à fauna e flora; prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e as atividades normais da comunidade".

As fontes de emissão de poluentes podem ser as mais variadas possíveis. A maior fonte de poluição atmosférica são as emissões de gases tóxicos por veículos automotores, sendo responsáveis por 40% da poluição do ar, emitindo gases como o monóxido de carbono, o óxido de nitrogênio, o dióxido de enxofre e derivados de hidrocarbonetos. As indústrias químicas são responsáveis pela emissão de óxidos sulfúricos e nitrogenados, hidrocarbonetos, derivados de enxofre, diversos resíduos sólidos e metais pesados (como chumbo, zinco e níquel). Na Tabela 2.1 estão apresentados alguns poluentes atmosféricos e suas principais fontes antropogênicas (consequência de atividades humanas) e naturais.

Tabela 2.1 – Fontes e características de alguns poluentes na atmosfera (www.fepam.rs.gov.br)

Poluente	Características	Fontes Antropogênicas	Fontes Naturais
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensos no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Tamanho < 100 micra	Processos industriais, veículos automotores (exaustão), poeira de rua ressuspensa, queima de biomassa.	Pólen, aerossol marinho e solo.
Partículas Inaláveis(PM10)	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensos no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Tamanho < 10 micra	Processos de combustão (indústrias e veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera).	Pólen, aerossol marinho e solo.
Dióxido de Enxofre (SO₂)	Gás incolor, com forte odor, altamente solúvel. Na presença de vapor d'água pode ser transformado a SO ₃ passando rapidamente a H ₂ SO ₄ , sendo um dos principais constituintes da chuva ácida. É um importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis.	Combustão de combustíveis fósseis, queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel.	Vulcões, emissões de reações biológicas.
Óxidos de Nitrogênio (NO_x)	Podem levar a formação de HNO ₃ , nitratos e compostos orgânicos tóxicos.	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, indústrias, usinas termoeletricas e incineração.	Processos biológicos no solo e relâmpagos.
Monóxido de Carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta em geral, principalmente em veículos automotores.	Queimadas e reações fotoquímicas.
Ozônio (O₃)	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica mais conhecido como <i>smog</i> .	Não é emitido diretamente à atmosfera, produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os NO _x e compostos orgânicos voláteis.	

De maneira geral, os efeitos dos gases poluentes na saúde humana estão intimamente associados à sua solubilidade nas paredes do aparelho respiratório, fato este que determina a quantidade do poluente capaz de atingir as regiões mais distais dos pulmões. Há evidências de que o dióxido de enxofre agrava as doenças respiratórias pré-existentes e contribui para seu aparecimento. O dióxido de nitrogênio, devido à sua baixa solubilidade, é capaz de penetrar profundamente no sistema respiratório, podendo dar origem as nitrosaminas, algumas das quais podem ser carcinogênicas. Também é um poderoso irritante, podendo causar sintomas que lembram aqueles do enfisema. A presença de oxidantes fotoquímicos na atmosfera tem sido associada à redução da capacidade pulmonar e ao agravamento das doenças respiratórias, como a asma. Os efeitos da exposição ao monóxido de carbono estão associados à diminuição da capacidade de transporte de oxigênio pelo sangue. Foi demonstrado, experimentalmente, que a pessoa exposta ao monóxido de carbono pode ter diminuído seus reflexos e acuidade visual e sua capacidade de estimar intervalos de tempo. Altos índices do poluente em áreas de fluxo intenso de veículos têm sido apontados como causa adicional de acidentes de trânsito. Poeiras em suspensão no ar afetam a capacidade do sistema respiratório remover as partículas do ar inalado, retendo-as nos pulmões; quanto mais finas as partículas, mais profundamente penetram no aparelho respiratório. As poeiras em suspensão também potencializam os efeitos dos gases presentes no ar (www.feema.rj.gov.br).

No início da década de 70, período de forte crescimento econômico e industrial, a preocupação relativa à poluição atmosférica intensificou-se no Brasil. Problemas graves de poluição do ar nas áreas das grandes cidades evidenciaram a necessidade de se adotarem políticas públicas sobre o tema. Em nível federal, a primeira legislação mais efetiva de controle da poluição atmosférica foi a Portaria do Ministério do Interior de nº 231, de 27 de abril de 1976, que visava a estabelecer padrões nacionais de qualidade do ar para material particulado, dióxido de enxofre, monóxido de carbono e oxidantes fotoquímicos. No final da década de 1980, com o objetivo de promover a orientação e controle da poluição atmosférica no país foi criado o Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR), por meio da resolução do CONAMA de nº 05, de 15 de junho de 1989. Este programa utilizou-se de estratégias de cunho normativo, como o estabelecimento de padrões nacionais de qualidade do ar e de emissão na fonte, a implementação de uma política de prevenção de deterioração da qualidade do ar, a

implementação da rede nacional de monitoramento do ar e o desenvolvimento de inventários de fontes e poluentes atmosféricos prioritários. Assim, o primeiro dispositivo legal decorrente do PRONAR, foi a resolução do CONAMA de nº 03, de 28 de junho de 1990, que estabeleceu os novos padrões nacionais de qualidade do ar em substituição aos fixados pela Portaria Minter nº 231/76. Além de estender o número de parâmetros regulamentados de quatro para sete (partículas totais, partículas inaláveis, fumaça, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio e ozônio troposférico), foi introduzida na legislação a figura dos padrões secundários de qualidade do ar, mais restritivos que os primários, constituindo-se seu atendimento em meta de longo prazo (www.mct.gov.br/clima). A Tabela 2.2 apresenta os padrões nacionais de qualidade do ar.

Tabela 2.2 - Padrão Nacional de Qualidade de Ar (CONAMA N° 3 de 28/06/1990)

Poluentes	Tempo de Amostragem	Padrão Primário (µg/m³)	Padrão Secundário (µg/m³)
Partículas Totais em Suspensão	24 horas (1)	240	150
	MGA (2)	80	60
Dióxido de Enxofre	24 horas (1)	365	100
	MAA(2)	80	40
Monóxido de Carbono		40.000	40.000
	1 hora (1)	(35 ppm)	(35 ppm)
	8 horas (1)	10.000 (9 ppm)	10.000 (9 ppm)
Ozônio	1 hora (1)	160	160
Fumaça	24 horas (1)	150	100
	MAA (3)	60	40
Partículas Inaláveis	24 horas (1)	150	150
	MAA (3)	50	50
Dióxido de Nitrogênio	1 hora (1)	320	190
	MAA (3)	100	100

(1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano. (2) Média geométrica anual. (3) Média aritmética anual

2.2 - Os Lavadores de Gases

O rigor atual da legislação exige a utilização de equipamentos capazes de remover eficientemente partículas suspensas em efluentes gasosos. Dentre os diversos equipamentos existentes, um de grande aplicação industrial é o lavador de gases. Os lavadores de gases formam uma classe de aparelhos que usam um líquido (usualmente a água) para realizar a coleta de pós ou névoas. Estes equipamentos têm sido largamente utilizados nos últimos 100 anos e inúmeros tipos de lavadores são oferecidos comercialmente (PERRY; CHILTON, 1980). O controle da emissão de poluentes particulados utilizando-se lavadores de gases envolve o contato dos gases com líquido (geralmente água ou solução aquosa) (PERRY; CHILTON, 1980; PILAT; NOLL, 2000). As partículas são transferidas da corrente gasosa para o líquido de lavagem via mecanismos de impactação inercial, deposição gravitacional, interceptação ou difusão browniana. Para partículas maiores que $0,5\mu\text{m}$, a impactação inercial é o mecanismo predominante, já para partículas com diâmetros muito pequenos, a difusão browniana é o principal mecanismo. Os lavadores de gases são usados em muitas indústrias para remover partículas coesivas, corrosivas ou líquidos que não são facilmente removidos em outros equipamentos, para remover com segurança partículas explosivas e podem remover simultaneamente partículas e absorver gases solúveis (PILAT; NOLL, 2000).

A grande diversidade de tipos de lavadores de gases é devido à várias diferenças na configuração ou princípio de operação. Alguns tipos de lavadores de gases são (PERRY; CHILTON, 1980; PILAT; NOLL, 2000):

- Lavador venturi;
- Lavador ciclônico;
- Lavador de filtro úmido;
- Lavador de bandeja e pratos;
- Lavador de leito empacotado;
- Lavador de leito móvel;
- Lavador de spray.

2.3 - O Lavador venturi

Os lavadores venturi são equipamentos industriais utilizados primordialmente para a limpeza de gases. Os lavadores de gases do tipo venturi são os mais amplamente usados (PERRY; CHILTON, 1980). O uso de um tubo do tipo venturi é feito a mais de um século como equipamento para medida de vazão em tubulações. O uso de um tubo venturi com a finalidade de atomizar líquidos em sua garganta também já é conhecido a muito tempo. Um tubo venturi foi utilizado pela primeira vez com a finalidade de lavar gases em 1946, através de experimentos conduzidos pelos pesquisadores Collins Jr., Seaborne E Anthony Jr. (GONÇALVES, 2000). Em 1947 foi construído o primeiro lavador venturi em escala industrial (GONÇALVES, 2000). De acordo com BRINK; CONTANT (1958), a Pease-Anthony Equipment Company obteve a patente dos lavadores venturi, em 1952 e foi responsável pelo desenvolvimento e divulgação desses equipamentos.

Na Figura 2.1 é apresentado esquematicamente um lavador venturi. Os lavadores venturi consistem em um tubo, de seção circular ou retangular, com uma constrição do tipo venturi, apresentando três partes distintas: seção convergente, garganta e seção divergente.

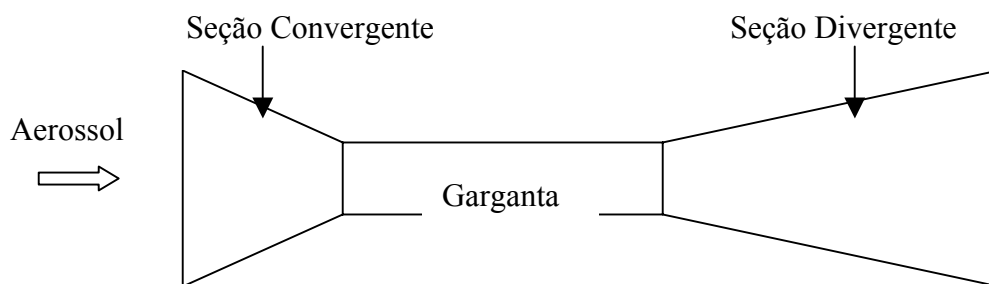


Figura 2.1 - Representação esquemática do lavador venturi.

O gás com contaminantes (sólidos ou líquidos, podendo formar um aerossol), entra no equipamento pela seção convergente e é acelerado devido à constrição na seção de escoamento, atinge altas velocidades na região chamada de garganta, seguida de uma seção de desaceleração na seção divergente (COURY *et al.*, 2001, PILAT; NOLL, 2000). O venturi é dimensionado de modo que o gás atinja uma velocidade superficial na garganta normalmente entre 45 e 80 m/s,

embora valores menores que 14m/s (ROBERTS; HILL, 1981) e da ordem de 201 m/s (JOHNSTONE *et al.*, 1954) tenham sido relatados. O líquido pode ser introduzido em algum lugar ao longo do venturi, mas geralmente é injetado por pequenos orifícios feitos nas paredes do equipamento, usualmente na garganta, ou em tubos colocados no interior do equipamento. Ao passar pelos orifícios o líquido assume a forma de jatos. Algumas vezes o líquido pode ser injetado na forma de filme aderido à parede através de paredes porosas, vertedouros, orifícios ou fendas que irrigam diretamente a parede.

Inicialmente toda massa líquida injetada está concentrada em corpos contínuos, como jato ou filme. Porém, devido à alta energia cinética proporcionada pelo gás, o líquido é rapidamente atomizado (fragmentado ou desintegrado). Devido à força de arraste do gás, os jatos seguem trajetórias curvadas antes de serem completamente atomizados em muitas gotículas (GONÇALVES *et al.*, 2003).

As gotículas recém-formadas têm, em média, velocidades muito inferiores à do gás; então, a velocidade relativa gás-gota produz o arraste sobre as gotas, responsável pela aceleração/desaceleração das mesmas. O escoamento no interior do equipamento é turbulento, facilitando a mistura entre as fases. As gotas, que logo após sua injeção encontram-se concentradas em certas regiões do lavador, se espalham, atingindo uma concentração praticamente uniforme após uma certa distância de injeção (GONÇALVES, 2000).

Durante o seu movimento, uma fração de gotas atinge as paredes, depositando-se na forma de filmes, porém, a ação do gás sobre a superfície do filme ocasiona a atomização de uma parte deste, formando gotas que se deslocam na direção do núcleo de escoamento. Ocorre desta forma uma transferência de massa de líquido contínua do núcleo para a parede e vice-versa. Assim, independentemente do sistema de injeção de líquido, o escoamento bifásico nos lavadores venturi é anular, com gotas escoando no centro de um anel de filme líquido aderido à parede do lavador (HEWITT e HALL TAYLOR, 1970). As transferências de massa entre as fases gasosa e líquida e a coleta de material particulado são favorecidas com os aumentos da área superficial do líquido, consequência da atomização, e com o aumento da velocidade do gás.

A coleta das partículas ocorre em virtude de uma combinação de vários mecanismos de coleta. Estes mecanismos estão apresentados no Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Mecanismos de coleta de partículas em lavadores de gases (www.epa.gov).

Mecanismo	Explicação
Impactação Inercial	As partículas não conseguem seguir a mesma trajetória das linhas de corrente ao encontrar um obstáculo (gota) e então colidem com ele.
Difusão Browniana	Partículas muito pequenas ($>0,3\mu\text{m}$) se movem de forma randômica e por estarem em um espaço restrito acabam colidindo com a gota.
Interceptação	É uma extensão do mecanismo de impactação. A partícula segue a mesma trajetória das linhas de corrente em torno da gota, mas a colisão acontece se a distância entre a partícula e a gota é menor que o raio da partícula.
Atração Eletrostática	Partículas e gotas que tem cargas opostas acabam sendo atraídas uma contra a outra.
Condensação	Quando o gás resfria rapidamente, partículas na corrente gasosa podem atuar como núcleos de condensação e, como resultado, se tornar maiores.
Força Centrífuga	A forma ou curvatura do coletor faz com que a corrente gasosa se movimente em espiral, jogando as partículas contra as paredes.
Deposição Gravitacional	Partículas grandes se movendo lentamente o suficiente irão cair através da corrente gasosa e serão coletadas

O principal mecanismo de coleta em lavadores venturi é o mecanismo de impactação inercial. Neste mecanismo, devido à inércia, uma partícula movendo-se em uma corrente de gás pode atingir um obstáculo estático ou movendo-se lentamente em sua trajetória. Ocorre uma deflexão das linhas de corrente em torno do obstáculo, porém, a partícula continua sua trajetória chocando-se contra ele. Na Figura 2.2 é apresentada uma vista esquemática da coleta devido ao mecanismo de impactação inercial, no qual o obstáculo é uma gota de líquido.

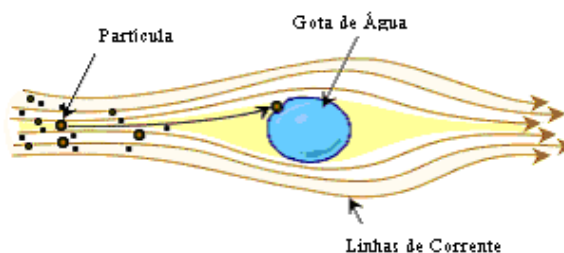


Figura 2.2 – Coleta de partícula devido ao mecanismo de impactação inercial.

Dois fatores, inicialmente, afetam a probabilidade de uma impactação inercial acontecer:

- O diâmetro da partícula - partículas maiores têm maior probabilidade de serem coletadas do que as menores, devido à sua maior inércia;
- A diferença de velocidade entre a partícula e a gota - a eficiência de coleta aumenta com o incremento na diferença entre as velocidades entre partícula e obstáculo.

As gotas recém formadas, além de se apresentarem muito lentas em relação ao gás, são, em média, muito maiores do que as partículas. O fluxo de gás consegue desviar-se com facilidade das gotas que estão no caminho, já as partículas não conseguem mudar rapidamente sua trajetória, devido à inércia, e acabam chocando-se com alguma gota.

Algumas vezes o obstáculo está ligeiramente distante da trajetória na qual a partícula está se movendo. Neste instante, como a partícula se aproxima dos limites do obstáculo, este pode coletar a partícula por um mecanismo chamado de interceptação. A Figura 2.3 apresenta uma vista esquemática da coleta de uma partícula devido ao mecanismo de interceptação direta.

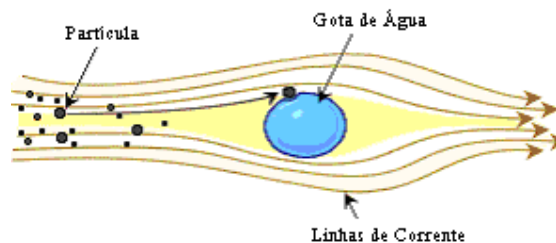


Figura 2.3 – Coleta de partícula devido ao mecanismo de interceptação direta.

A impactação inercial propicia altas eficiências de coleta para partículas maiores que 10 μm . Este mecanismo começa a ser progressivamente menos influente com a diminuição do tamanho das partículas. A impactação não é muito importante para partículas menores que 0,3 μm , devido à baixa inércia das mesmas.

Outro mecanismo importante é a difusão browniana. Este mecanismo de coleta é predominante para partículas menores que 0,3 μm e é especialmente significativo para partículas com dimensões características entre 0,01 e 0,1 μm . As partículas muito pequenas presentes na corrente de gás, são ligeiramente defletidas quando as moléculas de gás colidem com elas. A transferência de energia cinética das moléculas de gás para as partículas causa esta deflexão, chamada de difusão browniana. Estas partículas são coletadas quando colidem com algum

obstáculo, por exemplo, as gotas de água, como resultado do seu movimento randômico. A Figura 2.4 apresenta uma vista esquemática da coleta de uma partícula devido ao mecanismo de difusão browniana.

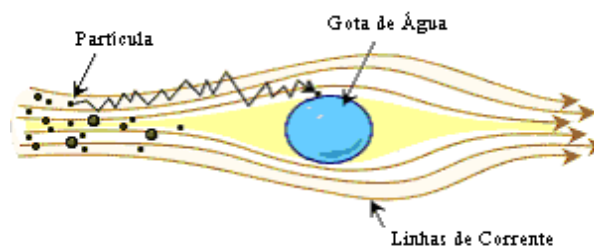


Figura 2.4 – Coleta devido ao mecanismo de difusão browniana

2.4 - Vantagens e Desvantagens da Utilização de Lavadores Venturi

Os lavadores venturi são utilizados na limpeza de efluentes gasosos em diversos ramos da indústria como: metalúrgica, de papel e celulose, na produção de ácido fosfórico, ácido sulfúrico, tintas, cimento, fertilizantes, entre outras. Em 1977, de acordo com um levantamento realizado por CALVERT (*apud* GONÇALVES, 2000), de cada dez lavadores venturi industriais nove eram empregados na coleta de particulados, enquanto que apenas 1 em 10 era utilizado na remoção de contaminantes gasosos.

A utilização dos lavadores venturi, quando comparada com outros equipamentos para limpeza de gases, apresenta vantagens e desvantagens. Podem ser citadas as seguintes vantagens:

- É um equipamento compacto, pois opera a altas velocidades de gás, não necessitando de um grande volume para trabalhar com grandes vazões de gás;
- Necessita de um baixo custo inicial para instalação do equipamento;
- A água de lavagem utilizada pode ser reutilizada, pois não há a necessidade de utilização de água limpa em lavadores que operam com somente um orifício grande em comparação com o tamanho das partículas, exceto bocais especiais, onde as partículas podem causar obstrução;
- Os lavadores venturi podem lidar com pós-explosivos e inflamáveis com segurança;
- Podem remover, ao mesmo tempo, contaminantes particulados e gasosos;

- Apresentam alta eficiência de coleta na remoção de partículas com diâmetros entre 0,5 e 5,0 μ m. Para partículas nesta faixa de tamanho os lavadores venturi podem ser tão ou mais eficientes que qualquer outro equipamento.

Dentre as desvantagens da utilização dos lavadores venturi podem ser citados:

- Tem um alto custo operacional devido ao alto consumo de energia, atribuído à alta queda de pressão total que é, em geral, superior a de outros tipos de lavadores. Isso significa que são necessários sopradores mais potentes, o que gera maiores gastos energéticos.
- Devido ao uso, em geral, de água como líquido de lavagem podem surgir problemas de corrosão.
- O gás tratado com lavadores venturi tem um aumento significativo na sua umidade, esse é um problema menos sério, mas pode ter importância frente ao público leigo. O vapor de líquido presente no gás de saída, ao encontrar uma atmosfera mais fria, pode condensar, formando uma fumaça visível e densa, que pode ter um impacto visual negativo diante da comunidade.
- Após a lavagem do gás um problema muito freqüente é a destinação do efluente líquido gerado pelo processo. Algumas vezes ele pode ser descartado sem tratamento, porém em outras situações, como por exemplo, quando o efluente contém metais pesados ou outros poluentes, o seu descarte imediato é impossibilitado.

2.5 - Sistemas de Injeção

O líquido de lavagem pode ser injetado no lavador venturi de diversas maneiras. Sabe-se que a quantidade de gotas formadas, suas distribuições espacial e de tamanhos e sua velocidade variam de acordo com o tipo de sistema de injeção e estão diretamente relacionadas com a eficiência de coleta (TAHERI; HAINES, 1969).

Um conjunto de variáveis, como por exemplo, o número de peças de injeção, o tipo de peça de injeção, a localização da peça de injeção entre outros, compõem um sistema de injeção. Dentre os principais tipos de peças de injeção estão os orifícios simples, fendas, vertedouros e paredes porosas.

Os orifícios simples são pequenas aberturas na parede do lavador, por onde o líquido de lavagem é introduzido. Existem diversos tipos de sistemas de injeção com orifícios, porém, os lavadores venturi utilizam tipicamente orifícios simples. Os orifícios podem ter diversas

inclinações de injeção, podem ser acoplados ao equipamento através de tubos em seu interior ou diretamente na parede externa (orifício simples). O orifício representa uma extremidade final de um circuito de líquido. Os tubos que transportam o líquido de seu reservatório inicial até o orifício têm, em geral, um diâmetro maior do que o diâmetro do orifício propriamente dito. Se os diâmetros da tubulação e do orifício são diferentes, tem que haver uma região aonde a transição entre os dois diâmetros ocorre. Um orifício será chamado de *convergente* quando esta região de transição for convergente (Figura 2.5 (b)). Um orifício será dito *longo* ou *curto* quando o líquido percorre imediatamente antes da descarga através do orifício uma distância respectivamente longa ou curta (em relação ao seu diâmetro) em um canal de diâmetro igual ao do orifício (Figura 2.5 (a),(c)). Os jatos que emergem de orifícios curtos tem maior turbulência interna que os jatos que emergem de orifícios longos, e precisam de uma quantidade menor de energia para sofrer desintegração, sendo, portanto, atomizados mais rapidamente (GONÇALVES, 2000). Na Figura 2.5 estão apresentados esquemas de uma peça do tipo orifício simples.

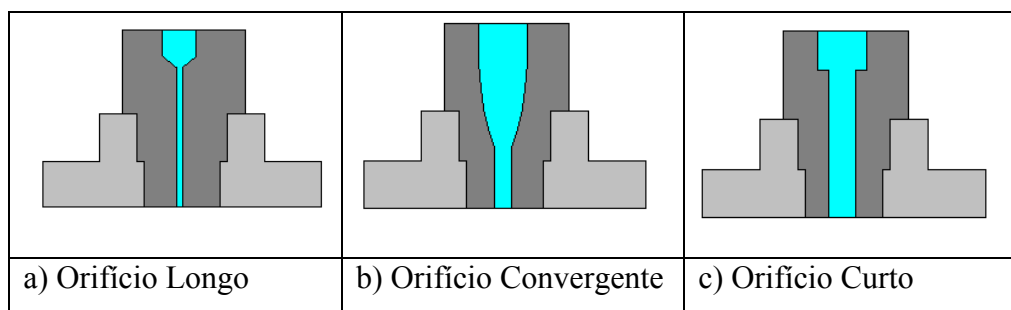


Figura 2.5 - Esquemas de peças de injeção (ROBERTS; HILL, 1981)

A injeção também pode ocorrer através de fendas, que são pequenas aberturas na forma retangular feitas na parede do lavador. Na Figura 2.6 está apresentado um exemplo de peça de injeção do tipo fenda.

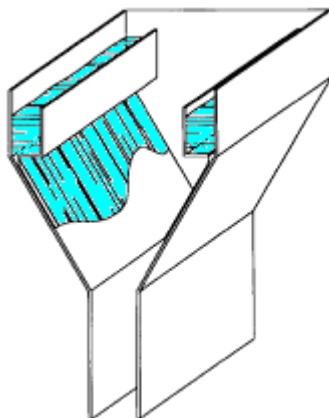


Figura 2.6 - Peça de injeção do tipo fenda (RUDNICK *et al.*, 1986)

As paredes porosas também podem ser utilizadas como sistemas de injeção. Elas substituem parcial ou totalmente as paredes do lavador, por onde o líquido entra através de diferença de pressão (GONÇALVES, 2000).

O sistema de injeção do tipo vertedouro tem características próximas às do tipo fenda. O líquido entra no equipamento ao transbordar de um reservatório. Um sistema de injeção do tipo vertedouro é mostrado na Figura 2.7.

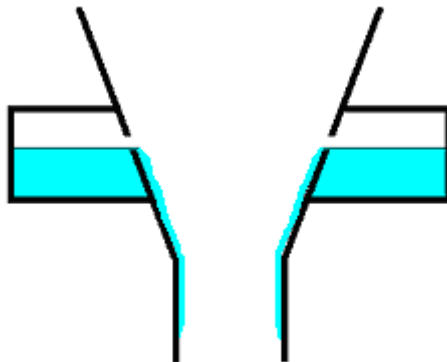


Figura 2.7 - Peça de injeção do tipo vertedouro (MAYINGER; LEHNER, 1995)

Outra maneira que o líquido pode ser injetado no lavador venturi é através de bicos atomizadores, como o mostrado na Figura 2.8 (www.epa.gov).

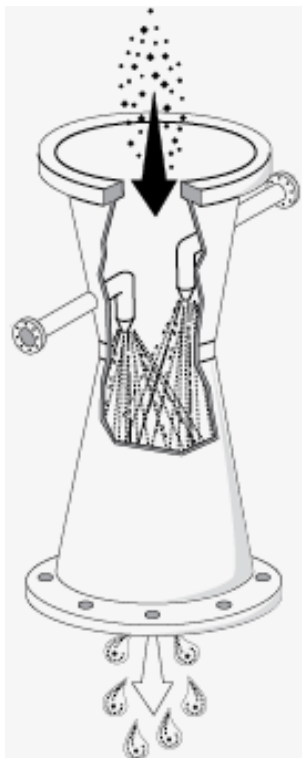


Figura 2.8 - Peça de injeção do tipo bico de atomização.

O líquido ao ser inserido no equipamento de separação pode assumir diversas formas, que quase sempre estão relacionadas ao tipo de peça de injeção utilizada. Assim, ao se utilizar uma peça de injeção do tipo orifício, produz-se um jato, utilizando-se uma fenda, obtém-se uma cortina, e um filme é obtido ao utilizar-se um vertedouro ou uma parede porosa (GONÇALVES, 2000).

2.6 – Algumas Configurações de Lavadores de Gases venturi

As diferenças entre os lavadores de gases do tipo venturi se dão devido, principalmente, à forma de injeção do líquido, comprimento de garganta, conexão do lavador com o separador ciclônico e forma da seção transversal (retangular ou circular).

Lavadores venturi do tipo *Pease-Anthony*

Os lavadores venturi do tipo *Pease-Anthony* são conhecidos como sendo a forma clássica dos lavadores venturi. Seu funcionamento constitui-se de injeção de líquido na garganta na forma de jatos, onde ocorre a atomização do líquido. Nas Figuras 2.9 e 2.10 são apresentados

alguns tipos de lavadores venturi *Pease-Anthony*. A diferença entre os lavadores das Figuras 2.9 e 2.10 se encontra no tipo de conexão com o separador ciclônico, o primeiro é conectado através de uma conexão tangencial e o segundo através de uma conexão turbinada.

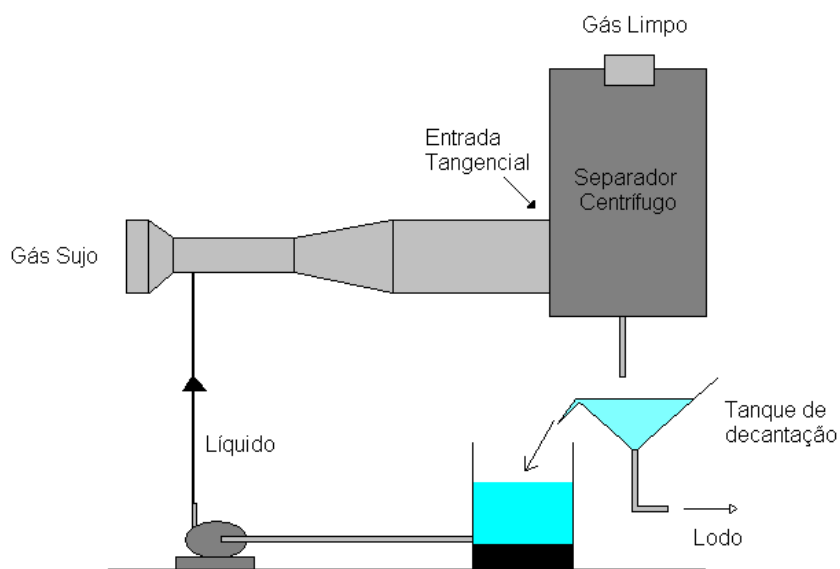


Figura 2.9 - Lavador venturi *Pease-Anthony* com conexão tangencial.

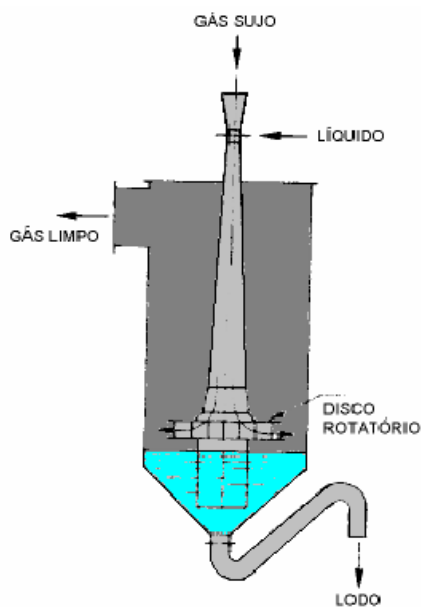


Figura 2.10 - Lavador venturi *Pease-Anthony* com conexão turbinada (DULLIEN, 1989).

Outro tipo de lavador *Pease-Anthony* encontrado é o apresentado na Figura 2.11, que foi utilizado em estudos realizados por MAYINGER; LEHNER (1995). Este equipamento constitui-se de um lavador venturi trabalhando parcialmente submerso em um reservatório de líquido. Neste caso, qualquer alteração na velocidade do gás acarreta uma correção de vazão de líquido mantendo-se o desempenho do lavador. Funciona como um sistema de auto-regulação.

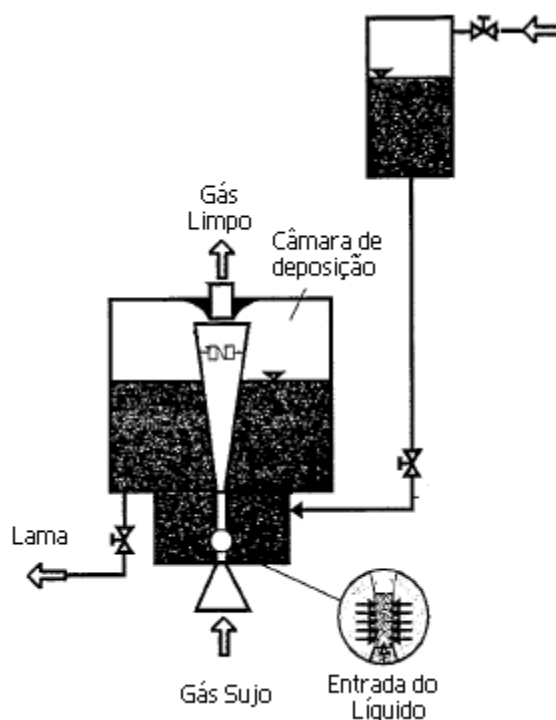


Figura 2.11 - Lavador *Pease-Anthony* com injeção auto-regulada (MAYINGER; LEHNER, 1995).

Lavadores venturi do tipo prismático

Outro lavador encontrado é o do tipo prismático (Figura 2.12), no qual a seção convergente está diretamente conectada à seção divergente, ou seja, não possui garganta.

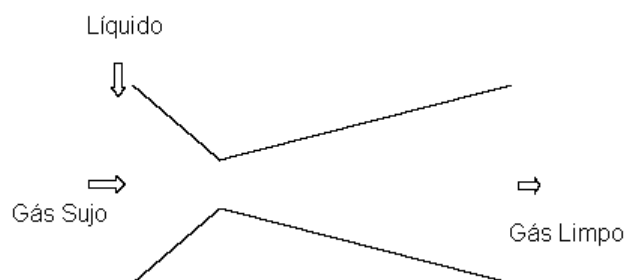


Figura 2.12 - Lavador venturi do tipo prismático (ALLEN, 1996)

Lavador do tipo ejetor

Na Figura 2.13 está apresentado o lavador do tipo ejetor ou com *spray* pré-formado. Neste equipamento o líquido é disperso no venturi por bicos atomizadores, o que o difere dos outros, onde o *spray* é formado no interior do lavador.

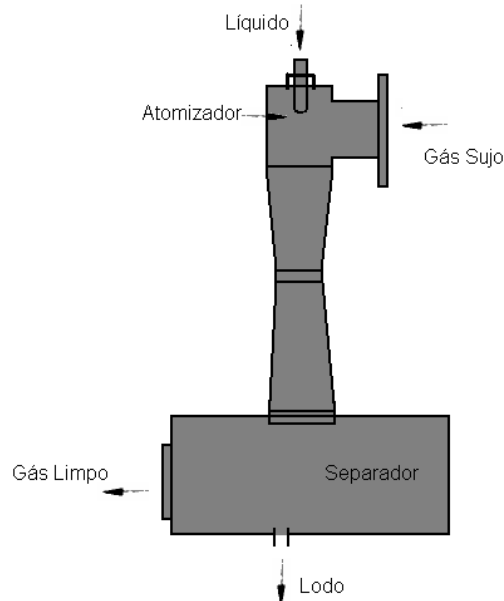


Figura 2.13 - Lavador venturi do tipo ejetor ou spray pré-formado (CALVERT, 1977).

Lavador venturi com tamanho da garganta ajustável

Neste tipo de lavadores a área da garganta é variável devido à utilização de peças como, por exemplo, um atuador móvel (Figura 2.14) ou uma placa móvel (Figura 2.15). O movimento dessas peças aumentam ou diminuem a abertura anular. A vantagem da utilização deste tipo de lavador é a possibilidade de se ajustar o equipamento para trabalhar em diferentes condições de vazão de gás (www.epa.gov).

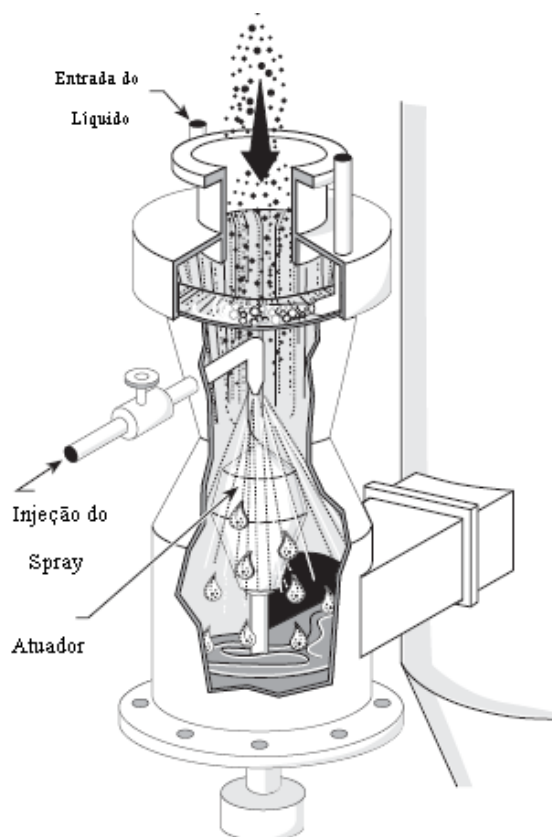


Figura 2.14 - Lavador venturi do tipo garganta ajustável com atuador (www.epa.gov.br).

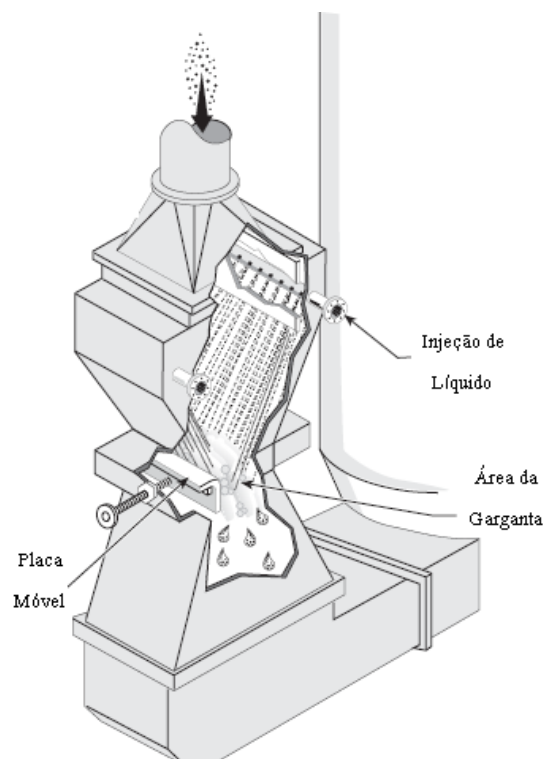


Figura 2.15 - Lavador venturi do tipo garganta ajustável com placa móvel (www.epa.gov.br).

Lavador venturi com Plataforma de Hastes

Esta é uma outra modificação nos lavadores venturi que pode ser encontrada. Colocando-se um determinado número de hastes paralelas entre si cria-se uma série de aberturas longitudinais como se existissem mais de uma garganta no mesmo lavador. A atomização do líquido é feita sobre as hastes, nas pequenas aberturas o gás move-se a altas velocidades e ocorre a formação de inúmeras minúsculas gotículas que atuam no mecanismo de coleta de partículas (www.epa.gov). Um esquema de um lavador com plataforma de hastes é apresentado na Figura 2.16.

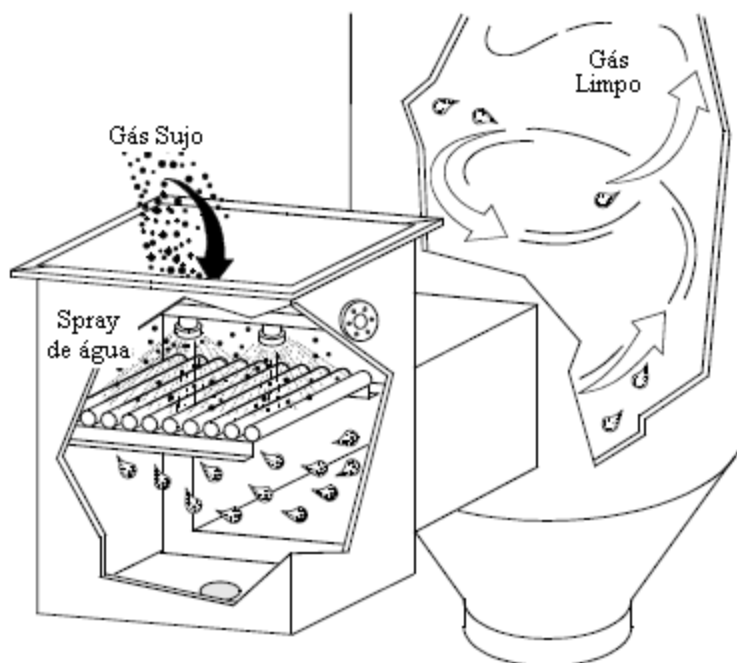


Figura 2.16 - Lavador venturi com plataforma de hastes (www.epa.gov.br).

2.7 - Modelos de Eficiência de Coleta

O desempenho de um lavador venturi depende de diversas variáveis, como o tipo de injeção de líquido, a distribuição do tamanho das gotas, distribuição de tamanho das partículas, a razão volumétrica líquido/gás, a velocidade do gás na garganta e a configuração geométrica do lavador. A maior parte da coleta acontece na garganta devido à presença de um alto grau de turbulência causada por grandes valores de velocidades relativas entre as gotas e partículas (ANANTHANARAYANAN; VISWANATHAN, 1998).

Inúmeros trabalhos teóricos, empíricos e semi-empíricos foram publicados a fim de prever a eficiência global de coleta de lavadores venturi, a seguir são descritos alguns modelos importantes para a determinação da eficiência de coleta.

2.7.1 – Lei da Potência

A Equação (2.1) é conhecida como a Lei da Potência de Contato, ou simplesmente, Lei da Potência (SEMRAU *et al.*, 1958, *apud* ALLEN, 1996).

$$\eta = 1 - \exp(-\alpha \Delta P^\gamma) \quad (2.1)$$

Onde as constantes α e γ são usualmente função das características do pó, temperatura dos fluidos e tipo do lavador utilizado (ALLEN, 1996; GONÇALVES, 2000). Na Tabela 2.4 são apresentados alguns valores destas constantes.

Tabela 2.4 – Parâmetros da Lei da Potência para lavadores (PILAT; NOLL, 2000).

Aerossol	Lavador	α	γ
Pó de limão seco	venturi e ciclone	1,47	1,05
Pó de limão seco pré-lavado	venturi e ciclone	0,915	1,05
Talco	venturi	2,97	0,362
Ácido fosfórico	venturi	1,33	0,647
Pó de forno de fundição	venturi	1,35	0,621
Talco	Ciclone	1,16	0,655
Ferro-silício de fornalha	venturi e Spray ciclônico	0,870	0,459
Névoa	venturi	0,363	1,41
Ferro de fornalha de fundição	venturi	1,26	0,569

A validade desta relação vem sendo questionada por diversos pesquisadores. GIESEKE (1964, *apud* ALLEN, 1996; GONÇALVES, 2000) sugeriu que a eficiência pode ser menor que a predita pela lei da potência para baixas velocidades. LEITH; COOPER (1980, *apud*

GONÇALVES 2000) afirmaram através de análises matemáticas que algumas condições operacionais deveriam produzir eficiências maiores que as outras, para uma mesma queda de pressão. Portanto, a lei de potência não expressa uma relação exata, mas sim somente uma aproximação. ALLEN (1996) utilizou a teoria de CALVERT *et al.* (1972, *apud* ALLEN, 1996), que relacionava o diâmetro de corte e a queda de pressão para diversos tipos de lavadores de gases, forneceu uma base teórica para a comprovação da lei de potência. Segundo ALLEN (1996) a lei de potência só deixa de ser válida para lavadores venturi que apresentam uma má distribuição de líquido.

2.7.2 – Modelo de TAHERI; HAINES (1969)

Utilizando um lavador venturi em escala piloto estes pesquisadores obtiveram uma relação entre queda de pressão e eficiência de coleta (Equação 2.2), porém, diferente da lei de potência (GONÇALVES, 2000).

$$\eta = 1 - \exp(a_1 \Delta P + a_2) \quad (2.2)$$

Os parâmetro a_1 e a_2 são dependentes do sistema de injeção de líquido.

2.7.3 – Modelo de HESKETH (1974, *apud* GONÇALVES, 2000)

Este pesquisador também apresentou uma relação entre eficiência de coleta e perda de carga (Equação 2.3) válida para partículas com tamanho inferior a $5 \mu\text{m}$ (GONÇALVES, 2000).

$$\eta = 1 - \exp(9270 \Delta P^{-1,43}) \quad (2.3)$$

Sendo que ΔP deve estar em Pascal.

2.7.4 - Modelo de JOHNSTONE *et al.* (1954)

JOHNSTONE *et al.* (1954, *apud* GONÇALVES, 2000) avaliaram todos os mecanismos de coleta que poderiam existir em um lavador venturi operando em condições típicas e concluíram que o mecanismo de impactação inercial seria o predominante. O modelo de JOHNSTONE (1954) (Equação 2.4) é a correlação mais simples e a mais antiga utilizada para prever a eficiência global de coleta em um lavador venturi.

$$\eta(d_p) = 1 - \exp\left(-k \frac{Q_L}{Q_G} \sqrt{\psi}\right) \quad (2.4)$$

Em que K tem valores entre 13 e 27.

O mecanismo de coleta pode ser caracterizado por um número adimensional típico que é igual a metade do número de Stokes, conhecido como parâmetro de impactação inercial (Equação 2.5). Este número adimensional representa a razão entre a força que é necessária para parar uma partícula movendo-se a uma dada velocidade e a resistência viscosa do fluido.

$$\psi = \frac{\rho_p (d_p)^2 V_G C}{18 \mu_G D} \quad (2.5)$$

Sendo ρ_p é a densidade da partícula, d_p é o diâmetro da partícula, V_G é a velocidade do gás na garganta, D é o diâmetro da gota, μ_G é a viscosidade do gás e C é o fator de correção de Cunningham, fator de correção em decorrência do deslizamento entre a partícula e o gás, dado pela equação 2.6.

$$C = 1 + \frac{0,16 \cdot 10^{-4}}{d_p} \quad (2.6)$$

2.7.5 - Modelo de CALVERT *et al.* (1972)

CALVERT *et al.* (1972, *apud* GONÇALVES, 2000) considerou uma representação unidimensional do escoamento co-corrente do gás, pó e gotas, e que todas as gotas tem um mesmo diâmetro, calculado pela equação de NUKYIAMA; TANASAWA (1938, *apud* PILAT; NOLL, 2000) efetuou um balanço de material para o pó num elemento de comprimento infinitesimal, ponto de partida para seu modelo. Sendo que a equação diferencial encontrada era função da concentração local do pó, da vazão de líquido, diâmetro da gota, velocidade do gás na garganta, velocidade da gota, eficiência de coleta e velocidade relativa entre gota e gás, na garganta. Para a resolução da equação CALVERT *et al.* (1972) utilizou diversas aproximações e simplificações. Por exemplo, expressou a velocidade relativa da gota com auxílio de um parâmetro f (Equação 2.7).

$$|V_G - V_D| = fV_G \quad (2.7)$$

Em que V_G é a velocidade do gás e V_D é a velocidade da gota.

Obteve então uma equação diferencial que podia ser resolvida analiticamente chegando então à Equação (2.8)

$$\eta(d_p) = 1 - \exp \left[\frac{2Q_L V_G \rho_L D}{55Q_G \mu_G} F(\psi, f) \right] \quad (2.8)$$

em que a função $F(\psi, f)$ é uma função dada pela Equação (2.9), sendo f um fator empírico com valor usualmente entre 0,1 e 0,5, sendo recomendado o uso de 0,50 para materiais hidrofílicos e 0,25 para hidrofóbicos, Q_L é a vazão de líquido, V_G é a velocidade do gás na garganta do lavador, ρ_L é a densidade do líquido, Q_G vazão do gás, μ_G viscosidade do gás e ψ é o parâmetro de impactação inercial, dado pela Equação 2.5.

$$F(\psi, f) = \frac{1}{2\psi} \left[-0,7 - 2\psi f + 1,4 \ln \left(\frac{2\psi f + 0,7}{0,7} \right) + \left(\frac{0,49}{0,7 + 2\psi f} \right) \right] \quad (2.9)$$

2.7.6 - Modelo de YUNG *et al.* (1978)

YUNG *et al.* (1978, *apud* COOPER *et al.*, 1986) modificaram o modelo de CALVERT *et al.* (1972) usando considerações mais reais. Obtiveram uma equação mais complexa que a de CALVERT *et al.* (1972) porém sem necessitar do parâmetro f . O modelo de YUNG *et al.* (1978) é dado pelas Equação 2.10, 2.11 e 2.12.

$$\frac{\ln(1-\eta)}{B_y} = \frac{\left[4\psi U^{1,5} + 4,2U^{0,5} - 5,02\psi^{0,5} \left(U + \frac{0,7}{\psi} \right) \tan^{-1} \left(\frac{\psi U}{0,7} \right)^{0,5} \right]}{\psi U + 0,7} - \frac{\left[4\psi + 4,2 - 5,02\psi^{0,5} \left(1 + \frac{0,7}{\psi} \right) \tan^{-1} \left(\frac{\psi}{0,7} \right)^{0,5} \right]}{\psi + 0,7} \quad (2.10)$$

Sendo,

$$B_y = \frac{Q_L \rho_L}{Q_G \rho_G C_{D0}} \quad (2.11)$$

$$U = 1 - \frac{V_{D,SG}}{V_G} \quad (2.12)$$

em que C_{D0} é o coeficiente de arraste na entrada na garganta, é obtido através da curva padrão encontrada em LAPPLE; SHEPHERD (1940, *apud* COOPER *et al.*, 1986) e $V_{D,SG}$ é a velocidade da gota na saída da garganta e é dada pela Equação 2.13

$$V_{D,SG} = 2 \left(1 - X^2 + X \sqrt{X^2 - 1} \right) \quad (2.13)$$

sendo,

$$X = 1 + \frac{3L_G C_{D0} \rho_G}{16D \rho_L} \quad (2.14)$$

em que L_G é o comprimento da garganta.

2.7.7 - Modelo de BOLL (1973)

Em seu trabalho BOLL (1973, *apud* COOPER *et al.*, 1986) assume que depois da atomização do líquido cada gota acelera e desacelera em resposta à força de arraste do gás, de acordo com a segunda lei de Newton. Ele assume escoamento unidimensional para o gás e gotas paralelo ao eixo do lavador venturi. O modelo de BOLL (1973) é dado pelas Equações 2.15, 2.16, 2.17 e 2.18.

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-3Q_L}{2Q_G D} \int_0^t \eta |V_G - V_D| dt\right) \quad (2.15)$$

$$a_D = \frac{3\rho_G C_D}{4\rho_L D_D} (V_G - V_D) |V_G - V_D| \quad (2.16)$$

$$V_D = V_{Di} + \int_0^t a_D dt \quad (2.17)$$

$$x = x_i + \int_0^t V_D dt \quad (2.18)$$

Em que C_D é o coeficiente de arraste dado pela Equação 2.19, t é tempo, a_D é a aceleração da gota, x é o deslocamento da gota ao longo do lavador venturi sob o eixo do x desde x_i , que é o ponto de injeção e V_{Di} é a velocidade da gota na injeção de líquido.

$$C_D = C_{D0} \sqrt{\frac{V_G}{|V_G - V_D|}} \quad (2.19)$$

A solução da equação acima depende da geometria do lavador venturi, das condições operacionais e requer resolução numérica. Começa-se com valores iniciais para V_G e V_D , calcula-se então a_D , V_D e x para um pequeno incremento de tempo; a velocidade do gás é então recalculada para a área da seção transversal do lavador venturi e o procedimento é repetido até que a saída do lavador venturi.

2.7.8 - Modelo de CALVERT Modificado (2005)

RIBEIRO (2005) propôs uma equação de ajuste para o parâmetro f , do modelo clássico de Calvert (1972), como função do comprimento da garganta do lavador venturi, em metros.

$$f = 0,5161 * L_{Garganta}^{0,3005} \quad (2.20)$$

2.8 – Alguns Modelos para Determinação do Diâmetro Médio da Gota

2.8.1 - Modelo de NUKIYAMA; TANASAWA (1938)

NUKIYAMA; TANASAWA (1938, *apud* PILAT; NOLL, 2000) propuseram um modelo empírico (Equação 2.21) para determinar o diâmetro médio da gota (diâmetro médio de Sauter) obtido através de experimentos com atomização pneumática.

$$D_D = \frac{58600}{V_G} \left(\sqrt{\frac{\sigma}{\rho_L}} \right) + 597 \left(\frac{\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma}} \right)^{0,45} \left(\frac{1000 Q_L}{Q_G} \right)^{1,5} \quad (2.21)$$

Em que D_D é o diâmetro da gota obtido em μm , σ é a tensão superficial do líquido e todos os parâmetros devem ser usados em unidades cgs. Para condições típicas com o ar e a água em condições padrão, podem ser encontradas equações simplificadas deste modelo onde os parâmetros podem ser usados em unidades do Sistema Inglês ou do Sistema Internacional.

$$D_D(\mu m) = \frac{16400}{V_G(ft/s)} + 1,45 \left(\frac{Q_L}{Q_G} \left(\frac{gal}{1000 ft^3} \right) \right)^{1,5} \quad (2.22)$$

$$D_D(cm) = \frac{50}{V_G(cm/s)} + 91,8 \left(\frac{Q_L}{Q_G} \left(\frac{m^3}{m^3} \right) \right)^{1,5} \quad (2.23)$$

2.8.2 - Modelo de BOLL (1974)

BOLL (1973, *apud* GONÇALVES, 2000) afirmou que o modelo de NUKIYAMA e TANASAWA (1938) não havia sido confirmado em toda a faixa de operação de lavadores venturi e que mesmo na faixa que foi testado existia uma incerteza na ordem de 2. BOLL (1974, *apud* GONÇALVES, 2000) após realizar medidas experimentais do diâmetro da gota em lavadores venturi propôs um novo modelo (Equação 2.24).

$$D_D = \frac{4,22 \times 10^{-2} + 5,77 \times 10^{-3} \left(\frac{1000 Q_L}{Q_G} \right)^{1,932}}{V_{G,injeção}^{1,602}} \quad (2.24)$$

Embora BOLL (1974) tenha tentado apresentar um modelo melhor que o de NUKIYAMA; TANASAWA (1938) não existem evidências documentais de tal afirmação.

2.9 - Alguns Artigos Importantes sobre Lavadores venturi

BRINK; CONTANT (1958) estudaram um lavador venturi *Pease-Anthony*, com seção retangular e injeção por *spray*, instalado em uma planta de ácido fosfórico, com o objetivo de se obter as condições ótimas de operação. O lavador apresentava uma garganta de 6 x 34 in e comprimento de 12 in, com ângulos de seção convergente e divergente de 25° e 2,2°, respectivamente. O equipamento era seguido por um ciclone. Existiam na garganta duas configurações de *sprays* horizontais, uma com 23 e a outra com 22 orifícios, localizadas a ¾ in uma da outra. As amostras foram coletadas em uma sonda isocinética. Após os testes a sonda era limpa com água e o teor de pentóxido de fósforo, contaminante presente na planta, era determinado na solução por titulação por precipitação com molibdato de amônio.

Foram avaliadas quais as variáveis que influenciavam a eficiência global de coleta. A variáveis estudadas foram a vazão do *spray*, a velocidade do *spray* e número de bicos de injeção.

Foram obtidas eficiências globais de coleta com valores superiores a 98%. As variáveis velocidade do *spray* e número de bicos tiveram influencia significativa na resposta eficiência.

COOPER *et al.* (1986) estudaram o desempenho de lavadores venturi sob determinadas condições de operação e compararam seus resultados com os preditos pelos modelos de CALVERT *et al.* (1972), YUNG *et al.* (1978) e BOLL (1973) (*apud* COOPER *et al.*, 1986).

Para a realização dos experimentos foram utilizados três lavadores venturi; o menor tinha 251 mm de comprimento da seção convergente, uma garganta de 32 mm de diâmetro e 32 mm de comprimento e 556 mm de seção divergente; o lavador de tamanho médio tinha 203 mm de comprimento da seção convergente, 54 mm de diâmetro de garganta, 51 mm de comprimento de garganta e 435 mm de comprimento da seção divergente; o maior lavador venturi possuía 138 mm de comprimento da seção convergente, 76 mm de diâmetro da garganta, 76 mm de comprimento da garganta e 305 mm de comprimento da seção divergente. O ar antes de passar pelo lavador de gases era purificado por um sistema de filtração, logo após este sistema, era injetado na tubulação o aerossol de teste, este era gerado à partir de um óleo de cozinha comercial com $0,92 \text{ g/cm}^3$ de densidade utilizando-se um nebulizador pneumático. Como líquido de lavagem era utilizada água destilada, sendo sua vazão medida por um rotâmetro e controlada com uma válvula. O líquido de lavagem era introduzido de quatro maneiras diferentes: (a) através de uma fenda de 0,6 mm de largura, localizada na parede da tubulação à 20,9 mm acima da entrada da seção convergente; (b) através de uma abertura anular de 1,0 mm de largura localizada 15 mm acima da entrada da seção convergente; (c) através de um bocal na entrada da seção convergente, a abertura concêntrica tinha 14,2 mm de diâmetro; (d) através de 12 bocais arranjados radialmente de maneira uniforme na entrada da seção convergente com 4,8 mm de diâmetro cada. A coleta das amostras para a determinação da eficiência de coleta era feita através de uma sonda isocinética localizada na saída do ciclone.

Concluíram que o modelo de YUNG *et al.* (1978, *apud* GONÇALVES, 2000) é o melhor para a maioria das aplicações. O modelo de CALVERT *et al.* (1972, *apud* GONÇALVES, 2000) é um modelo fácil de ser utilizado, mas depende muito da escolha do parâmetro f , e então deve ser usado com cautela. O modelo de BOLL (1973, *apud* GONÇALVES, 2000) não obteve bons resultados.

MAYINGER; LEHNER (1995) determinaram as eficiências granulométricas de coleta e estudaram o comportamento de um lavador venturi com alimentação de líquido auto-regulada e

com garganta retangular. O ar era succionado do ambiente e soprado através do equipamento e as partículas de dióxido de titânio eram injetadas na linha. As partículas sólidas tinham diâmetros muito pequenos, na faixa de 0,1 a 1,4 μm , com diâmetro médio de 0,8 μm . O líquido foi injetado em diversos locais através de bocais cilíndricos na garganta do venturi, localizados perpendicularmente à corrente gasosa. O líquido foi injetado devido à diferença de pressão entre o exterior e interior da garganta do venturi. A água foi suprida a partir de um tanque elevado, sendo que a pressão hidrostática poderia ser variada usando diferentes níveis no tanque. Concluiu-se neste trabalho que a eficiência de separação aumentava com o acréscimo na queda de pressão no lavador e que um lavador com multi-estágios é superior a um de simples-estágio.

ALLEN (1996) estudou a eficiência de coleta granulométrica de uma planta piloto montada especialmente para este estudo e comparou com os resultados obtidos pela equação da lei da potência. As variáveis estudadas foram:

- Velocidade do gás; 67 a 103m/s;
- Razão líquido-gás (L/G): 0,36 a 1,15 L/m³;
- Tipo de pó: foram usadas duas distribuições granulométricas diferentes de óxido de silício, a primeira tinha 95% em massa de partículas com diâmetro menor que 5 μm e a segunda com 95% com diâmetro menor que 15 μm ;
- Geometria do Lavador: foi utilizada uma unidade industrial de um lavador venturi prismático e uma unidade clássica com garganta longa.

ALLEN (1996) concluiu que a razão L/G e a velocidade do gás não tiveram influência na eficiência granulométrica, a qual foi função somente da queda de pressão. Os dados empíricos de eficiência granulométrica obtidos podem ser descritos adequadamente pela lei da potência.

COURY *et al.* (2004) determinaram *in situ* a distribuição granulométrica das gotas formadas por um *spray* em um lavador venturi de seção retangular e os resultados foram comparados com os estimados por correlações encontradas em literatura (modelos de NUKIYAMA; TANASAWA, 1938, e BOLL, 1974). Utilizando um sistema de difração de raios laser para medir o tamanho das gotas no lavador venturi (Malvern Spray Tech). O receptor do Malvern é composto por um determinado número de anéis concêntricos os quais detectam a intensidade da luz. Inicialmente a maioria da luz é recebida no anel central, mas com a passagem do *spray* de líquido entre o emissor de laser e o receptor uma parte da luz é refletida e outra difratada de modo que a intensidade da luz diminui nitidamente no anel central e aumenta nos

outros anéis. O receptor é conectado a um computador que converte o sinal de intensidade de luz em distribuição de tamanhos. O lavador venturi utilizado, estava disposto horizontalmente e tinha uma seção transversal retangular de 35 mm de altura por 24 mm de largura. Foi injetada água por um único orifício, com diâmetro de 1 mm, situado na parede da garganta, 15 mm depois do começo da garganta. Foram testadas velocidades de gás de 58,3, 66,6 e 74,9 m/s, e relações volumétricas de líquido-gás (L/G) de 0,07, 0,17 e 0,27 L/m³. As gotículas foram medidas em três posições ao longo da garganta do venturi. A primeira posição tinha 64 mm do local de injeção; a segunda de 118 mm; e a terceira de 173 mm.

Neste trabalho concluiu-se que a variável velocidade do gás foi a que mais influenciou o tamanho das gotas na garganta do venturi. O tamanho das gotas diminuía com o incremento na velocidade do gás bem como com o incremento da relação volumétrica líquido-gás. Os pesquisadores demonstraram que o tamanho das gotas geralmente aumenta à medida que se distancia do local de injeção. Nenhuma das correlações estudadas representou satisfatoriamente os dados experimentais.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados e descritos os procedimentos experimentais adotados neste trabalho.

3.1 – O material particulado

O material particulado usado nos experimentos foi o pó de rocha fosfática originária de Patos de Minas-MG, gentilmente fornecido pela empresa FOSFÉRTIL -Fertilizantes Fosfatados S. A.. A densidade deste material foi determinada através de picnometria à quente e o valor resultante foi de $3,040 \text{ g/cm}^3 \pm 0,29 \text{ g/cm}^3$.

Com o objetivo de se obter uma faixa granulométrica mais apropriada para a utilização nos experimentos, foi necessário um pré-tratamento do material particulado:

- O material inicialmente era colocado em uma bandeja e encaminhado a uma estufa, a 100°C durante 24 horas, com a finalidade de secá-lo para ser posteriormente moído;
- Terminado o período de secagem (primeira secagem), o material era transferido para um moinho de bolas de porcelana, onde era moído por 8 horas;
- Após esse período, o moinho era parado e uma nova análise granulométrica era feita, não se verificando, ainda, o tamanho necessário das partículas do material;
- O material era então peneirado em via úmida, em peneira da série Tyler 400;
- Em seguida a mistura de material peneirado e água era deixada em repouso a fim de que ocorresse a decantação da parte mais densa (lama de interesse);
- Transcorrido o tempo satisfatório de decantação, que variava dependendo do recipiente utilizado, era feito um sifão para retirar o sobrenadante (composto principalmente por água), sendo a lama entornada em uma bandeja e levada, novamente, à estufa a 100°C durante 48 horas para secagem;
- Ao término desse período de secagem, o material era novamente levado ao moinho de bolas e lá ficava por cerca de 6 horas;

- Ao fim do período de 6 horas no moinho de bolas, era colhida uma amostra do material e uma nova análise granulométrica era feita, verificando-se o diâmetro médio de Sauter desejado.

A análise granulométrica foi realizada em difratômetro a laser, da marca MALVERN. O resultado da análise granulométrica é apresentado na Tabela 3.1. O diâmetro médio de Sauter obtido no difratômetro a laser foi de 2,14 μm .

Tabela 3.1 - Distribuição de tamanho da rocha fosfática

Faixa de Diâmetros (μm)	Diâmetro Médio (μm)	% em Volume
0,05-0,2	0,125	0,04
0,2-0,31	0,255	1,24
0,31-0,58	0,445	5,65
0,58-1,06	0,82	10,37
1,06-2,28	1,67	15,9
2,28-4,88	3,58	14,38
4,88-10,48	7,68	17,18
10,48-22,49	16,485	19,38
22,49-48,27	35,38	10,95
48,27-76,32	62,295	3,32

Os dados da análise granulométrica foram ajustados pelo modelo sigmóide, mostrado pela equação 3.1.

$$W = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d} \right)^p} \quad (3.1)$$

sendo W fração mássica acumulada, d o diâmetro das partículas e os parâmetros d_{50} e p foram estimados pelo método de regressão não-linear e os valores obtidos foram 4,79 e 1,17, respectivamente. O modelo foi ajustado com uma correlação R^2 de 99,25%. Na Figura 3.1 está apresentada a distribuição granulométrica cumulativa com o ajuste do modelo.

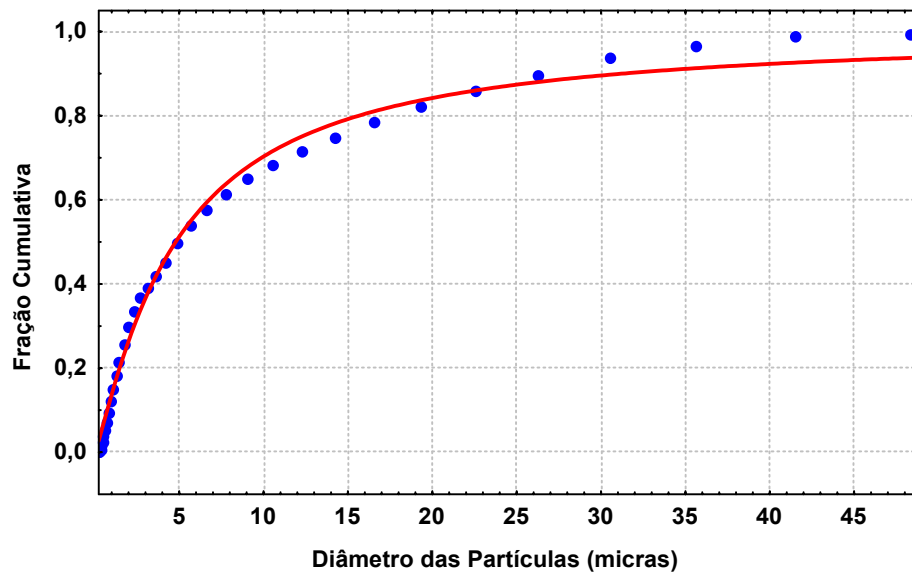


Figura 3.1 – Distribuição granulométrica cumulativa.

3.2 - O líquido de lavagem

O líquido de lavagem utilizado nos experimentos foi a água, mantida à temperatura ambiente.

3.3 - O aparato experimental

A Figura 3.2 apresenta uma vista esquemática do sistema experimental utilizado para a realização dos experimentos, constituído pelos seguintes dispositivos:

1. Soprador do tipo Kepler Webber R16Y de 7,5 cv;
2. Válvula para ajuste de vazão de ar;
3. Alimentador do tipo prato giratório ;
4. Placa de orifício para determinação da velocidade do ar;
5. Manômetros diferenciais no qual a água era utilizada como líquido manométrico;
6. Lavador venturi;
7. Ciclone do tipo Lapple;
8. Bomba peristáltica para bombeamento de líquido.

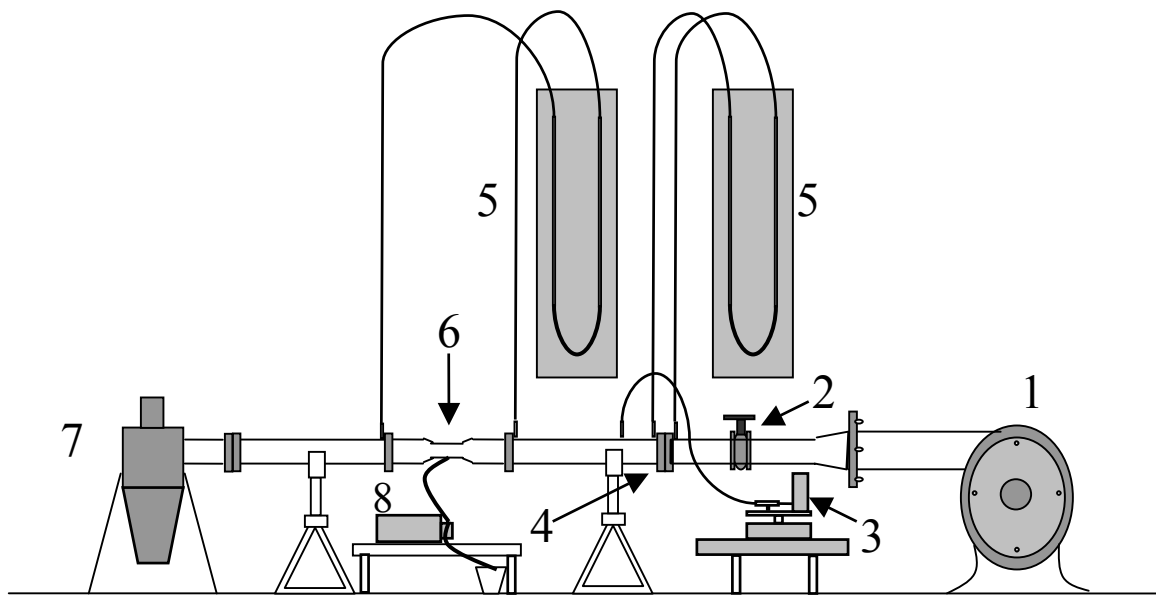


Figura 3.2 – Vista esquemática do aparato experimental.

Para a realização dos experimentos, o ar era impulsionado através da tubulação por meio do soprador. As partículas eram dispersas na corrente de gás com o uso de um alimentador do tipo prato giratório. O lavador venturi era constantemente alimentado com água, por uma bomba peristáltica. As partículas de rocha fosfática ao entrarem no lavador venturi eram coletadas pelas gotículas de água. A lama gerada era coletada no *underflow* do ciclone e o ar contendo as partículas não coletadas saía através do duto de *overflow* do ciclone. A lama era coletada em recipientes previamente tarados, por um período pré-determinado função das vazões de alimentação de pó e de líquido. Os recipientes eram levados à estufa por um período de 24 h para secagem. Após a secagem, o pó era levado à balança para se determinar a massa coletada. Para a determinação da eficiência global de coleta era utilizada a seguinte equação:

$$\eta_{Global} = \frac{m_{coletada}}{m_{alimentada}} \quad (3.2)$$

em que $m_{coletada}$ é a massa de pó coletada no *underflow* do ciclone e $m_{alimentada}$ é a massa de pó introduzida na tubulação pelo alimentador de pó.

3.4 – O Sistema de alimentação de pó

O sistema de alimentação de pó era constituído por um prato giratório de aço inoxidável, que continha sulcos com seção semicircular, onde a rocha fosfática era depositada. Havia um sistema que propiciava a deposição de pó no prato, constituído de um cone com um cilindro em sua extremidade. Para melhor distribuição do pó no sulco, junto ao cone existia um vibrador, cuja função era impedir o empacotamento do pó no cone de alimentação. Sobre o prato existia um sistema para compactação do pó no sulco, constituído por um raspador de borracha. O pó era aspirado através de um sistema constituído de um venturi utilizado em trompas de vácuo, o qual utilizava ar comprimido para a injeção do pó na linha. O sistema de alimentação de pó está apresentado na Figura 3.3 e sua fotografia na Figura 3.4. O pequeno venturi utilizado para a sucção do pó depositado no sulco pode ser visualizado através da Figura 3.5.

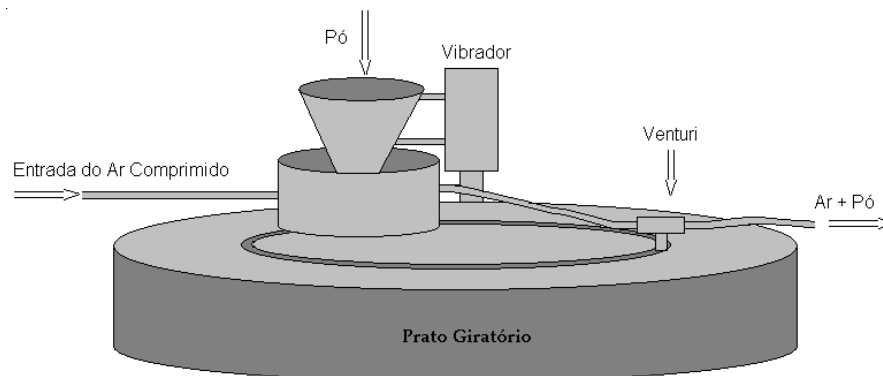


Figura 3.3 – O sistema de alimentação de pó.

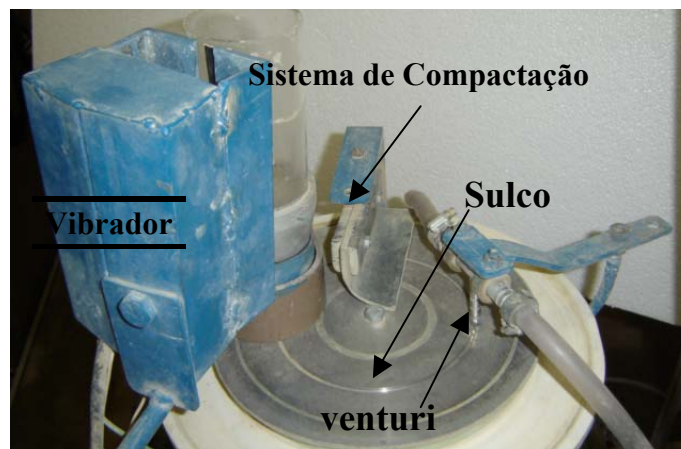


Figura 3.4 - Fotografia do alimentador de pó do tipo prato giratório.



Figura 3.5 - Fotografia do venturi utilizado para a sucção do pó

A calibração da alimentação do pó era realizada antes do início de cada experimento para garantir que não houvesse variações na quantidade de pó injetada no venturi. A calibração era feita através da injeção do pó em um filtro de polipropileno por um período de 5 minutos. O filtro era pesado antes e após a injeção do pó para que se obtivesse a quantidade de pó alimentada em 5 minutos. Assim podia-se determinar a vazão de pó, utilizada para o cálculo da eficiência global de coleta.

3.5 – Os lavadores venturi

Foram utilizados seis lavadores venturi construídos em acrílico, os quais tinham dimensões de acordo com a Tabela 3.2. Na Figura 3.6 pode ser observada a fotografia dos lavadores utilizados.

Tabela 3.2 - Dimensões dos lavadores venturi.

Número de referência dos venturis	Comprimento da Garganta (mm)	Comprimento Total (mm)	Diâmetro da Garganta (mm)
1	132,0	295,0	23,0
2	99,0	262,0	23,0
3	66,0	229,0	23,0
4	66,0	177,2	33,0
5	99,0	210,2	33,0
6	132,0	243,2	33,0



Figura 3.6 - Fotografia ilustrativa dos seis lavadores venturi utilizados.

3.6 - Sistema de injeção de líquido

Foi utilizado um sistema de injeção do tipo orifício simples. O orifício estava localizado no início da garganta acoplado ao equipamento diretamente em sua parede. Assim, utilizando-se uma peça de injeção do tipo orifício simples a injeção ocorria na forma de jato. A Figura 3.7 mostra uma fotografia do orifício utilizado.

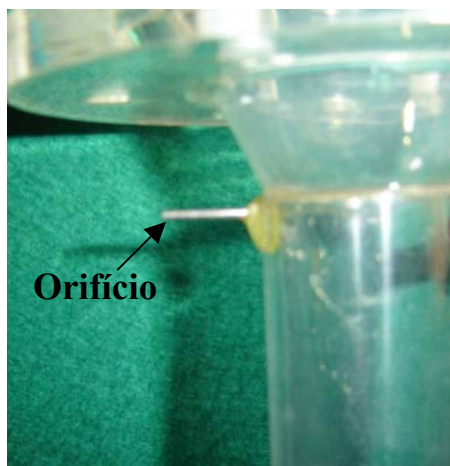


Figura 3.7 - Fotografia da peça de injeção de líquido.

3.7 – O Planejamento de experimentos

Com o objetivo de determinar a influência de variáveis como a vazão de água de lavagem, a velocidade do ar e o comprimento da garganta na resposta eficiência global de coleta foram realizados dois planejamentos experimentais fatoriais completos do tipo 3^3 , resultando em 27 experimentos cada. Sendo que o primeiro planejamento foi realizado utilizando-se os três

lavadores venturi com diâmetro de garganta de 33 mm e o segundo planejamento utilizando-se os lavadores venturi com diâmetro de garganta de 23 mm. Desta forma pode-se comparar os resultados obtidos com dois diâmetros de garganta diferentes e avaliar o efeito dessa variável geométrica na eficiência global de coleta. A matriz do planejamento de experimentos está apresentada na Tabela 3.3. Para o tratamento estatístico dos dados obtidos foi utilizado o programa Statistica for Windows 5.0.

Tabela 3.3 - Matriz para o primeiro e segundo planejamento com fatores codificados.

Experimento	Comprimento	Velocidade do ar	Vazão de água
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	1
7	-1	1	-1
8	-1	1	0
9	-1	1	1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	1
16	0	1	-1
17	0	1	0
18	0	1	1
19	1	-1	-1
20	1	-1	0
21	1	-1	1
22	1	0	-1
23	1	0	0
24	1	0	1
25	1	1	-1
26	1	1	0
27	1	1	1

Ao serem realizados os testes preliminares observou-se que havia limitações operacionais no sistema experimental, influenciando, assim, os valores das variáveis a serem utilizados. Observou-se que trabalhando com os venturis de nº 1, 2 e 3, com diâmetros de

garganta de 23 mm, a velocidades na tubulação superiores a 12 m/s ocorria um aumento significativo na queda de pressão. Esse aumento na queda de pressão ocasionava uma grande dificuldade de alimentação do pó, visto que o mesmo não conseguia ser disperso na corrente de ar. O ar ao se deparar com altos valores de queda de pressão na região do venturi, saía pela linha do alimentador de pó, impossibilitando a alimentação das partículas. Portanto, optou-se em trabalhar com velocidades inferiores a 12m/s, embora acarretasse uma diminuição na eficiência global de coleta. As velocidades escolhidas para a realização dos experimentos são de 4, 7 e 10 m/s, velocidades na tubulação, que correspondem a 9,47, 16,58 e 23,69 m/s na garganta do venturi para o primeiro planejamento (diâmetro de garganta de 33 mm), respectivamente, e 19,51, 34,14 e 48,78 m/s na garganta para o segundo planejamento (diâmetro de garganta de 23 mm), respectivamente.

Outra constatação feita através dos testes preliminares foi a de que a bomba peristáltica tinha capacidade máxima para alimentação de 580 mL/min de líquido. Então, os valores máximos das variáveis utilizadas foram determinados com base nas limitações observadas nos testes preliminares.

Na Tabela 3.4 estão apresentados os fatores e os respectivos níveis para o primeiro e segundo planejamento, em que foram utilizados os lavadores venturi com diâmetro de garganta de 33 e 23 mm, respectivamente.

Tabela 3.4 - Fatores e níveis para os planejamentos dos experimentos.

Fatores	Níveis		
	-1	0	1
Comprimento da Garganta (mm) – L	66	99	132
Vazão de Líquido (mL/min) – Q_L	180	360	540
Velocidade do Ar (m/s) – V_G	4	7	10

3.8 – Modelos teóricos para determinação da eficiência global de coleta

Os dados experimentais de eficiência global de coleta foram comparados com os valores de eficiência teóricos utilizando-se três modelos: modelo de JOHNSTONE *et al.* (1954), CALVERT *et al.* (1972) e CALVERT modificado (RIBEIRO, 2005). Foram utilizadas três gerações diferentes de modelos, o modelo de Johnstone é o mais antigo e leva em consideração somente o mecanismo de coleta por impactação inercial, o modelo de Calvert é o modelo semi-empírico mais utilizado para lavadores de gases do tipo venturi e o modelo de Calvert modificado é um dos mais atuais e propõe uma modificação no parâmetro de Calvert, considerando este como função do comprimento de garganta. Este modelo foi utilizado, pois neste trabalho uma das variáveis propostas para estudo foi o comprimento de garganta. Foi utilizado o valor de 0,50 para o parâmetro f no modelo de CALVERT *et al.* (1972), mais indicado para material higroscópico, que é o caso da rocha fosfática, e o valor de 20 para o parâmetro k do modelo de JOHNSTONE *et al.* (1954), valor intermediário dentro da faixa indicada para este parâmetro.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme mencionado no capítulo anterior foram realizados dois planejamentos de experimentos para diferentes diâmetros de garganta, 33mm (Primeiro Planejamento) e 23mm (Segundo Planejamento), obtendo-se 27 experimentos para cada planejamento. Nas Tabelas 4.1 e 4.2 estão apresentadas as matrizes dos planejamentos com os resultados de eficiência global de coleta.

Tabela 4.1 - Resultados da matriz do primeiro planejamento experimental (diâmetro da garganta de 33 mm)

Experimentos	Comprimento da Garganta (mm)	Vazão de Líquido (mL/min)	Velocidade do Ar (m/s)	Eficiência Média (%)	Desvio Padrão
1	66	180	4	12,60	0,74
2	66	180	7	26,99	1,24
3	66	180	10	50,80	1,77
4	66	360	4	22,91	0,24
5	66	360	7	40,50	0,73
6	66	360	10	76,50	1,36
7	66	540	4	28,36	0,00
8	66	540	7	55,39	1,88
9	66	540	10	75,78	1,25
10	99	180	4	11,86	0,00
11	99	180	7	28,86	1,25
12	99	180	10	56,28	0,21
13	99	360	4	21,99	0,84
14	99	360	7	47,54	0,62
15	99	360	10	88,18	0,63
16	99	540	4	34,33	1,04
17	99	540	7	74,45	0,63
18	99	540	10	76,58	0,84
19	132	180	4	11,55	0,62
20	132	180	7	28,74	1,29
21	132	180	10	55,34	0,24
22	132	360	4	22,60	0,21
23	132	360	7	40,48	0,51
24	132	360	10	52,48	0,41
25	132	540	4	43,43	1,88
26	132	540	7	50,96	1,57
27	132	540	10	88,96	1,10

Tabela 4.2 - Resultados da matriz do segundo planejamento experimental (diâmetro da garganta de 23 mm)

Experimentos	Comprimento da Garganta (mm)	Vazão de Líquido (mL/min)	Velocidade do Ar (m/s)	Eficiência Média (%)	Desvio Padrão
1	66	180	4	21,76	1,02
2	66	180	7	28,63	2,13
3	66	180	10	54,8	1,67
4	66	360	4	39,9	2,38
5	66	360	7	72,84	10,3
6	66	360	10	100	0,9
7	66	540	4	52,66	1,43
8	66	540	7	91,09	6,78
9	66	540	10	100	6,19
10	99	180	4	24,4	3,18
11	99	180	7	44,4	1,31
12	99	180	10	45,11	0,55
13	99	360	4	35,54	0,66
14	99	360	7	70,31	2,58
15	99	360	10	100	17,62
16	99	540	4	44,79	6,3
17	99	540	7	96,21	1,52
18	99	540	10	97,63	8,93
19	132	180	4	27,67	1,44
20	132	180	7	41,19	2,5
21	132	180	10	48,47	1,72
22	132	360	4	43,27	2,6
23	132	360	7	63,69	0,32
24	132	360	10	86,22	2,19
25	132	540	4	54,29	4,16
26	132	540	7	100	4,08
27	132	540	10	100	2,58

Verificou-se que os percentuais de eficiência para o primeiro e segundo planejamentos ficaram em 45% e 60%, respectivamente. Foram observados os maiores valores de eficiência para o primeiro planejamento nas condições de 132mm, de comprimento de garganta, 540mL/min, de vazão de líquido, e 10m/s de velocidade do ar. Para o segundo planejamento foram obtidos percentuais de 100% de eficiência em cinco experimentos, os de nº 6, 9, 15, 26 e 27. Observando-se as Tabelas 4.1 e 4.2 verifica-se que os valores de eficiência global de coleta

são maiores para o segundo planejamento, que foi realizado com lavadores venturi com menor diâmetro de garganta.

4.1 - Análises estatísticas

Para a determinação das variáveis operacionais que influenciavam na resposta eficiência global de coleta foi realizada uma análise estatística dos resultados experimentais, em que foram obtidos os valores dos efeitos de cada variável na resposta eficiência global de coleta. As variáveis X_1 , X_2 e X_3 correspondem às variáveis comprimento da garganta (L), vazão de líquido (Q_L) e velocidade do ar (V_G) nas formas codificadas. Verificou-se para o primeiro planejamento, considerando-se um nível de significância de 10%, que as variáveis vazão de líquido (X_2) e velocidade do ar (X_3) influenciaram significativamente a resposta eficiência global de coleta. As interações entre as variáveis e as interações quadráticas, ou seja, a interação de uma variável com ela mesma, não tiveram influência significativa na resposta, com exceção da interação quadrática do comprimento da garganta (X_1^2). Na Tabela 4.3, podem ser observados os efeitos das variáveis significativas na resposta e também os coeficientes do modelo estatístico para o primeiro planejamento. Para o segundo planejamento observou-se que, considerando-se um nível de significância de 10%, as variáveis vazão de líquido (X_2) e velocidade do ar (X_3) tiveram influência significativa para a resposta eficiência de coleta. As interações entre estas variáveis (X_2X_3), a interação quadrática da vazão de líquido (X_2^2) e a interação quadrática de velocidade do ar (X_3^2), também influenciaram significativamente a resposta. Na Tabela 4.4 podem ser observados os efeitos de cada variável significativa, além dos coeficientes do modelo estatístico para o segundo planejamento. Nas Figuras 4.1 e 4.2 estão apresentados os gráficos de pareto obtidos através da análise estatística dos resultados de eficiência global de coleta para o primeiro e segundo planejamentos. Através dos gráficos de pareto confirma-se a influência das variáveis analisadas, ou seja, para o primeiro planejamento, as variáveis vazão de líquido (X_2), velocidade do ar (X_3) e a interação quadrática do comprimento da garganta (X_1^2) e para o segundo planejamento as variáveis vazão de líquido (X_2), velocidade do ar (X_3), interação entre as variáveis vazão de líquido e velocidade do ar (X_2X_3), interação quadrática da vazão de líquido (X_2^2) e interação quadrática da velocidade do ar (X_3^2).

Tabela 4.3 – Resultado da análise estatística para o primeiro planejamento.

	Efeitos	Desvio Padrão	t-Student (23)	Nível de Significância	Parâmetros	Desvio Padrão dos Coeficientes
Média	45,35	1,41	32,18	0,000	45,35	1,41
X₁²	5,32	2,99	1,78	0,088	2,66	1,49
X₂	27,25	3,45	7,89	0,000	13,62	1,73
X₃	45,70	3,45	13,24	0,000	22,85	1,73

Tabela 4.4 – Resultado da análise estatística para o segundo planejamento.

	Efeitos	Desvio Padrão	t-Student (21)	Nível de Significância	Parâmetros	Desvio Padrão dos Coeficientes
Média	62,40	1,56	40,00	0,000	62,40	1,56
X₂	44,47	3,82	11,64	0,000	22,24	1,91
X₂²	8,36	3,31	2,53	0,001	4,18	1,65
X₃	43,11	3,82	11,28	0,000	21,55	1,91
X₃²	7,79	3,31	2,35	0,003	3,89	1,65
X₂X₃	11,89	4,68	2,54	0,002	5,95	2,34

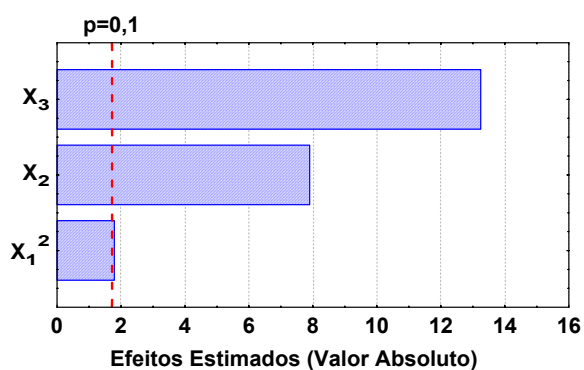


Figura 4.1 - Gráfico de pareto para o primeiro planejamento.

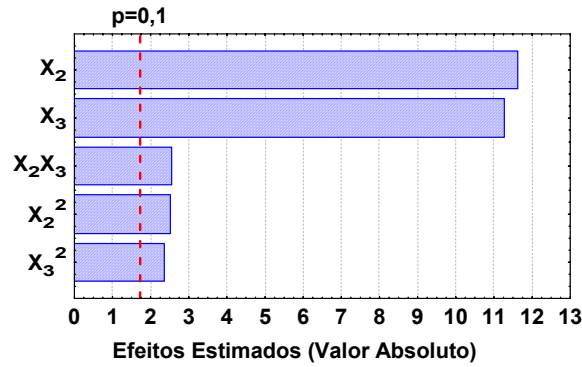


Figura 4.2 - Gráfico de pareto para o segundo planejamento

A influência da interação quadrática do comprimento da garganta na eficiência global de coleta foi observada somente no primeiro planejamento. Isto pode ser explicado pelo fato de que no primeiro planejamento trabalhou-se com diâmetros de garganta maiores, portanto observa-se uma menor turbulência, menor inércia das partículas e menor número de gotículas de líquido formadas, o que diminui as chances das partículas serem coletas, em comparação com o segundo planejamento (menores diâmetros de garganta). Assim, a interação quadrática do comprimento da garganta tem porque ao aumentar-se esta variável, aumenta-se a chance das partículas serem coletadas, por ficarem um tempo maior em uma região de turbulência ou em contato com a superfície do líquido, o que não acontece com os lavadores de menores diâmetros, pois a velocidade é muito maior.

Para o primeiro e segundo planejamentos foram obtidos dois modelos estatísticos de segunda ordem para a eficiência global de coleta, considerando as variáveis significativas na análise estatística. Os coeficientes deste modelo foram estimados pelo método de regressão múltipla com nível de significância inferior a 10%.

$$\eta = 45,35 + 2,66X_1^2 + 13,62X_2 + 22,85X_3 \quad (4.1)$$

$$\eta = 62,40 + 22,24X_2 + 4,18X_2^2 + 21,55X_3 + 3,89X_3^2 + 5,95X_2X_3 \quad (4.2)$$

Os modelos dados pelas Equações 4.1 e 4.2 devem ser usados utilizando-se as variáveis em seus níveis codificados. Os modelos estatísticos utilizando-se as variáveis na forma usual são dados pelas Equações 4.3 e 4.4. Estes modelos são válidos para comprimento de garganta entre 66

e 132 mm, para vazão de líquido de lavagem entre 180 e 540 mL/min e para velocidade do ar entre 4 e 10 m/s.

$$\eta = 45,35 + 2,66\left(\frac{L-99}{33}\right)^2 + 13,62\left(\frac{Q_L-360}{180}\right) + 22,85\left(\frac{V_G-7}{3}\right) \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \eta = & 62,40 + 22,24\left(\frac{Q_L-360}{180}\right) + 4,18\left(\frac{Q_L-360}{180}\right)^2 + 21,55\left(\frac{V_G-7}{4}\right) \\ & + 3,89\left(\frac{V_G-7}{4}\right)^2 + 5,95\left[\left(\frac{Q_L-360}{180}\right)\left(\frac{V_G-7}{4}\right)\right] \end{aligned} \quad (4.4)$$

O bom ajuste do modelo estatístico para a eficiência global de coleta do lavador venturi foi verificado pelos moderados valores de desvio padrão dos parâmetros e pelos coeficientes de correlação de 90,13% e 93,04% para o primeiro e segundo planejamentos, respectivamente.

A validade da análise estatística foi verificada através da boa concordância dos valores observados (Figura 4.3 e 4.4) com os valores estimados pelos modelos estatísticos do primeiro e segundo planejamentos, respectivamente. O comportamento linear do gráfico de probabilidade normal dos resíduos (Figura 4.5 e 4.6), confirma a boa adequação dos modelos.

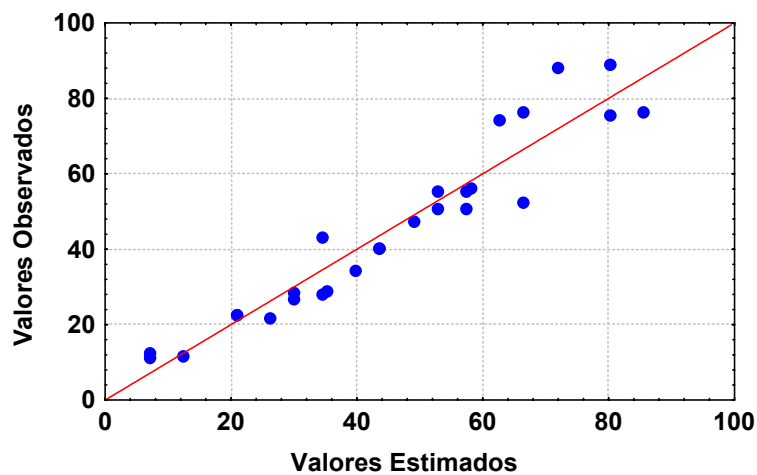


Figura 4.3 - Valores estimados Vs valores observados para o primeiro planejamento

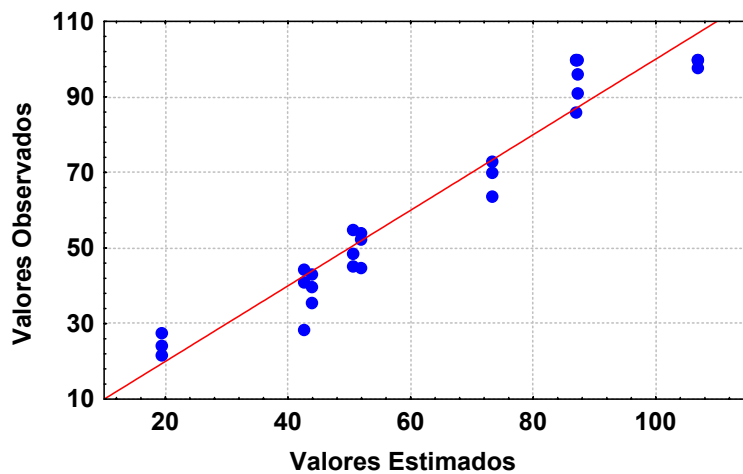


Figura 4.4 - Valores estimados V_s valores observados para o segundo planejamento

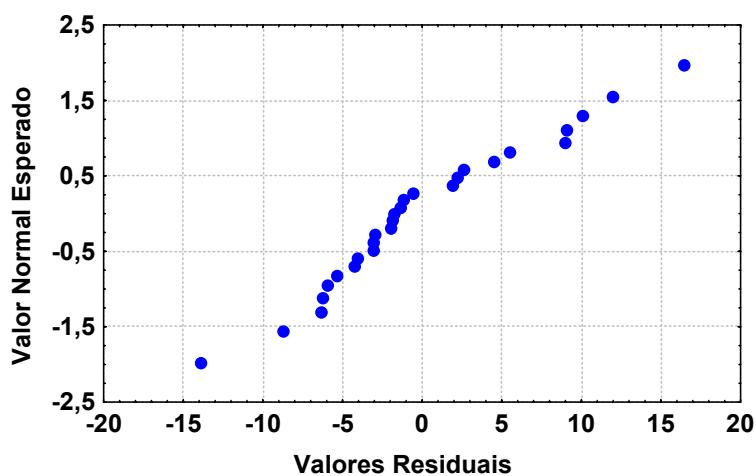


Figura 4.5 - Probabilidade normal dos resíduos para o primeiro planejamento

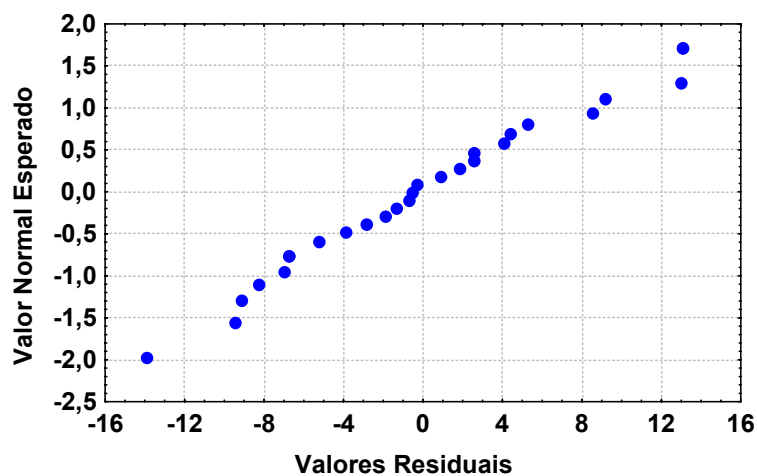


Figura 4.6 - Probabilidade normal dos resíduos para o segundo planejamento

Nos gráficos de distribuição dos resíduos, apresentados nas Figuras 4.7 (primeiro planejamento) e 4.8 (segundo planejamento), observa-se que há uma distribuição aleatória dos resíduos em torno do zero para o segundo planejamento, o que demonstra que não existiram vícios experimentais significativos.

Para o primeiro planejamento pode-se observar uma distribuição dos resíduos na forma de cone. Isto pode ser explicado pelo fato de que o modelo estatístico obtido para o primeiro planejamento é praticamente linear, ou seja, é função das variáveis vazão de líquido e velocidade do ar com mais intensidade em relação à interação quadrática do comprimento da garganta. Portanto, este modelo consegue explicar os resultados obtidos de maneira eficiente para determinadas condições, porém, para outras há a necessidade de outras variáveis não lineares para que ocorra um melhor ajuste, o que compromete a distribuição de resíduos.

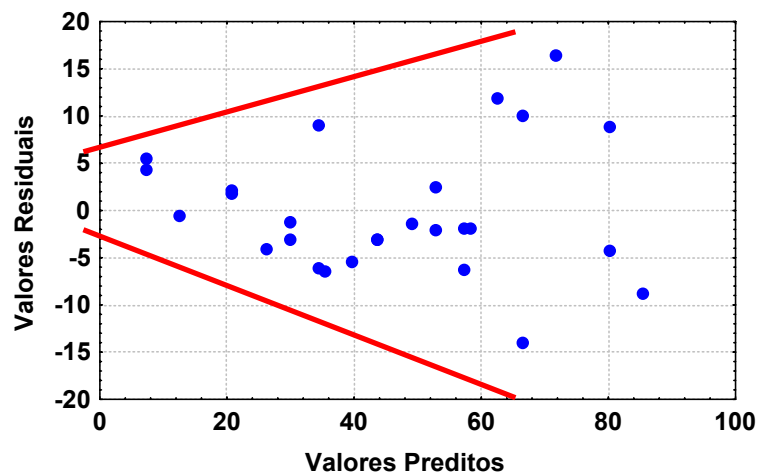


Figura 4.7 - Distribuição de resíduos para o primeiro planejamento

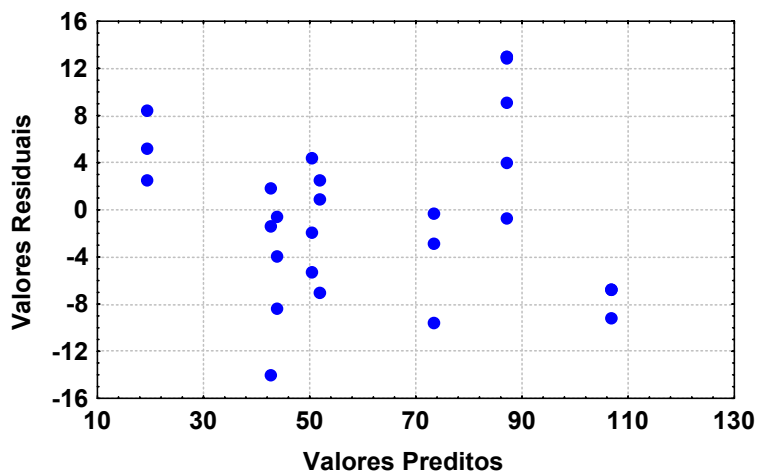


Figura 4.8 - Distribuição de resíduos para o segundo planejamento

O comportamento da resposta eficiência frente a alterações nas variáveis estudadas pode ser avaliado nos gráficos de superfície de resposta. Nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 estão apresentadas as superfícies de resposta dos lavadores venturi 1, 2 e 3 (diâmetros de garganta de 23mm), respectivamente, já nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 estão apresentadas superfícies de resposta para os lavadores venturi 4, 5 e 6 (diâmetros de garganta de 33mm), respectivamente.

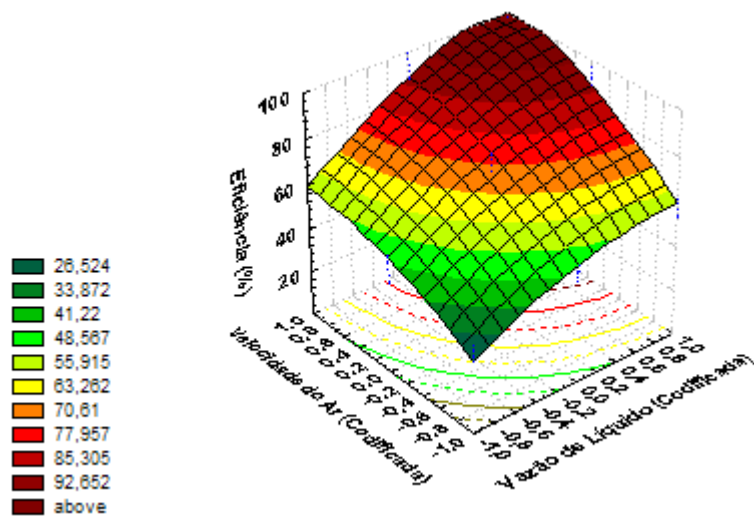


Figura 4.9 - Superfície de resposta para o lavador venturi nº 1.

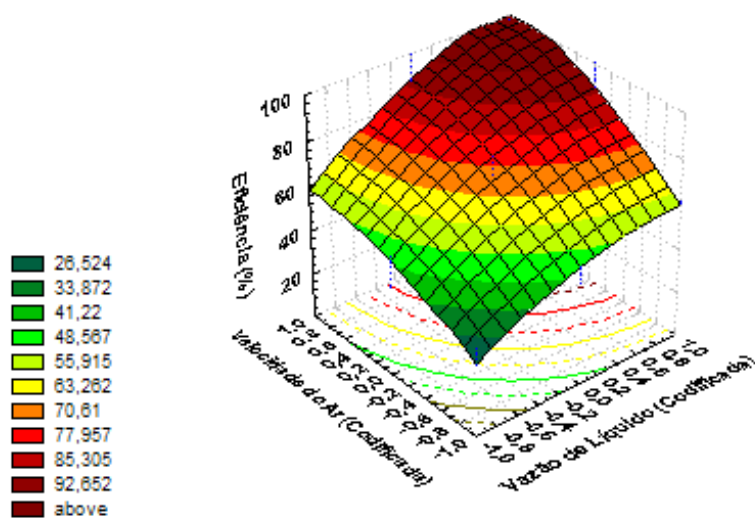


Figura 4.10 - Superfície de resposta para o lavador venturi nº 2.

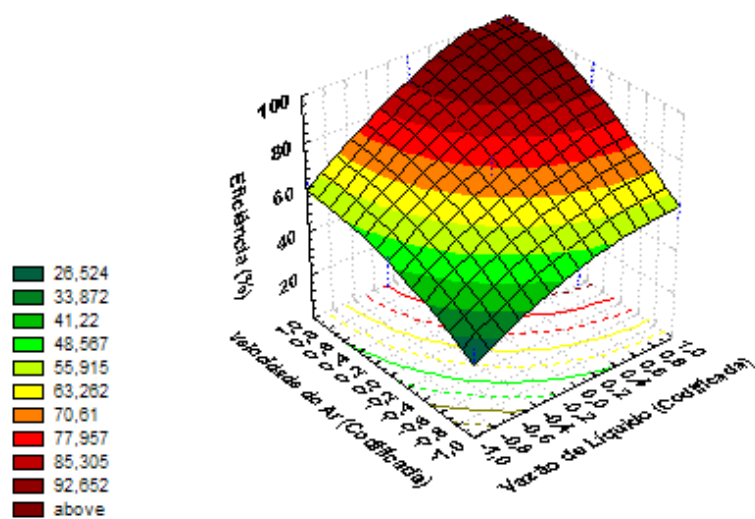


Figura 4.11 - Superfície de resposta para o lavador venturi nº 3.

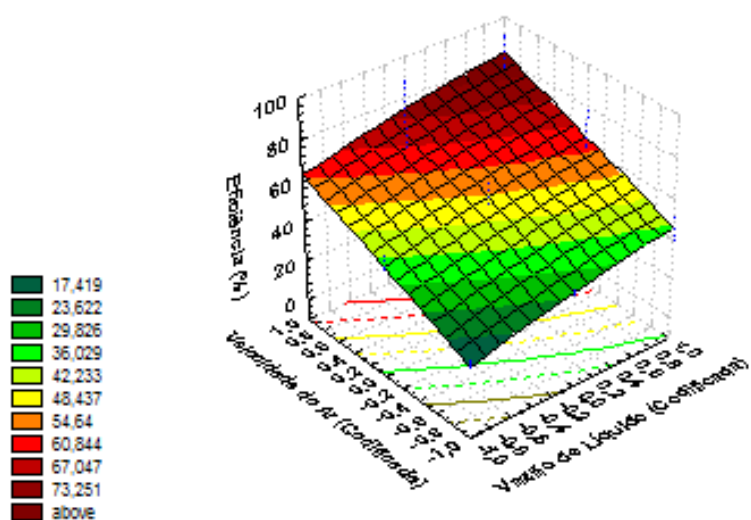


Figura 4.12 - Superfície de resposta para o lavador venturi n° 4.

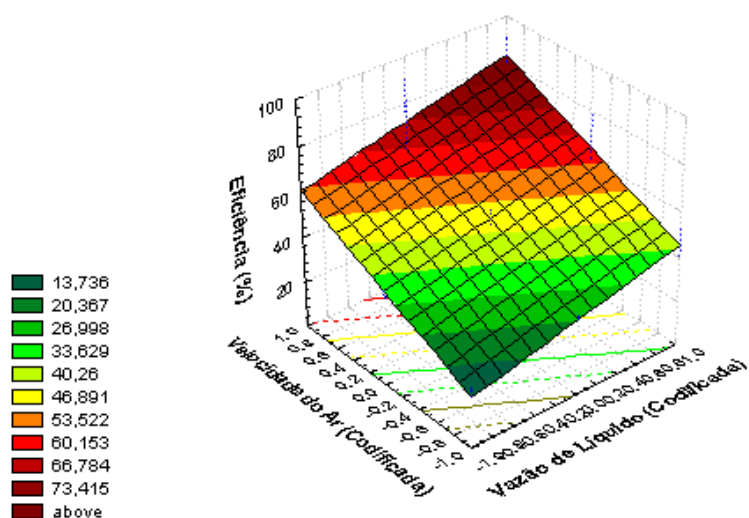


Figura 4.13 - Superfície de resposta para o lavador venturi n° 5.

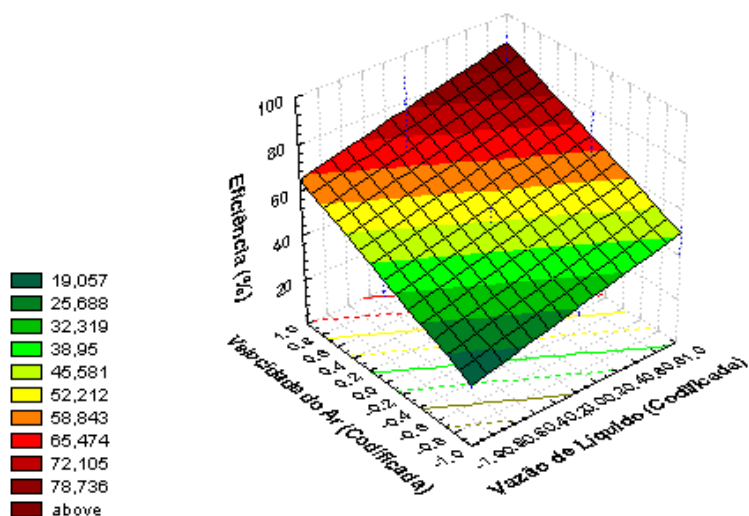


Figura 4.14 - Superfície de resposta para o lavador venturi nº 6.

Nas figuras apresentadas anteriormente pôde-se observar em todos os casos que a resposta eficiência sofria um aumento com qualquer incremento na variável velocidade do ar, ou seja, quando a variável velocidade sai de seu menor valor, código -1, para o maior valor, código +1, ocorre um acréscimo nos valores de eficiência global de coleta. Para a variável vazão de líquido ocorreu um comportamento similar, ou seja, quando esta variável sai de seu menor valor, código -1, para o maior valor, código +1, ocorreu um aumento nos valores de eficiência global de coleta. As características citadas acima são melhores explicadas no tópico a seguir.

4.2 - Influência da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência global de coleta

De acordo com RIBEIRO (2005) o aumento da velocidade do ar provoca aumento na eficiência global de coleta em lavadores venturi. Este mesmo comportamento foi observado nos experimentos realizados. As Figuras 4.15 a 4.17 mostram a eficiência global de coleta como uma função da velocidade do gás em três vazões de líquido diferentes (180, 360 e 540mL/min) e para os comprimentos de garganta de 66, 99 e 132mm, respectivamente.

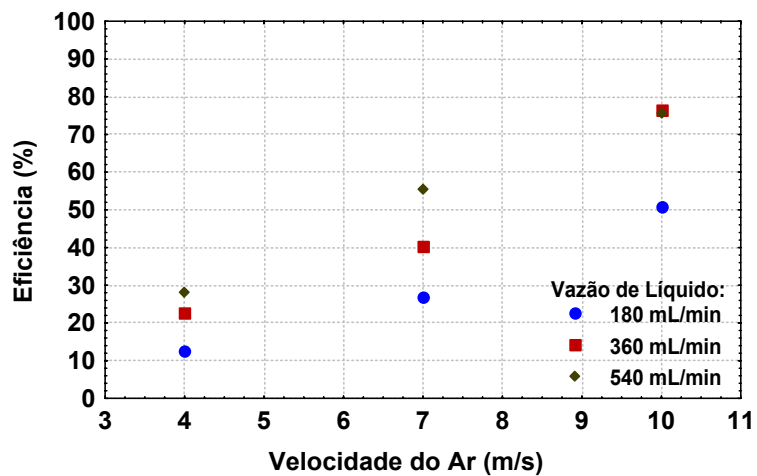


Figura 4.15 - Efeito da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência global para comprimento de garganta de 66 mm para o primeiro planeamento.

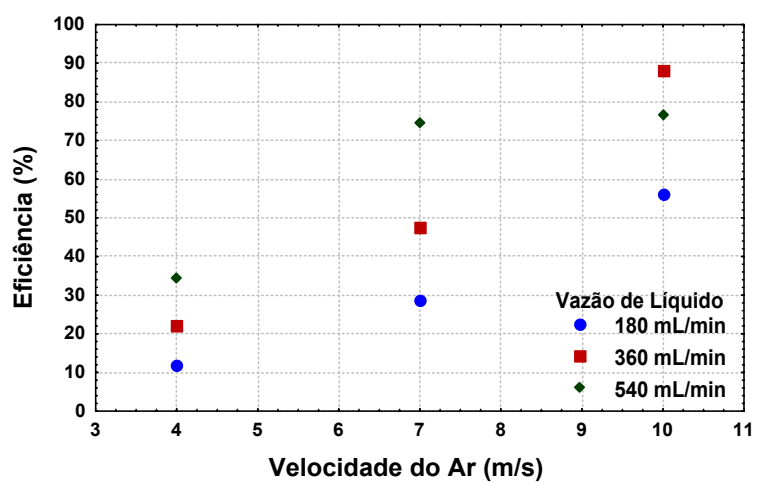


Figura 4.16 - Efeito da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência global para comprimento de garganta de 99 mm para o primeiro planeamento.

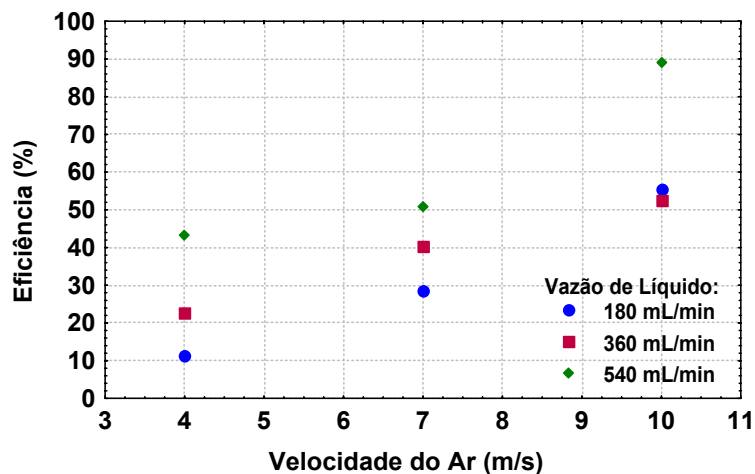


Figura 4.17 - Efeito da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência global para comprimento de garganta de 132 mm para o primeiro planejamento.

Observa-se que o aumento da velocidade do gás causa um aumento da eficiência global de coleta para as três condições. Segundo RIBEIRO (2005) isso ocorre porque ao aumentar-se a velocidade do gás ocorre um aumento na turbulência, aumento na geração do número de gotas, melhor espalhamento do jato, fato observado durante a realização dos experimentos e um aumento na inércia das partículas, favorecendo o mecanismo de impactação inercial. Pode-se observar também que para um mesmo valor de velocidade do ar a eficiência aumenta com o aumento da vazão de água. Isto pode ser explicado pelo aumento no número de gotículas de líquido o que facilita a colisão das partículas de rocha fosfática com as gotas aumentando, freqüentemente, a eficiência de coleta.

Este mesmo efeito da velocidade pode ser observado nas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 que apresentam os efeitos da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência global para os comprimentos de garganta de 66, 99 e 132 mm para o segundo planejamento.

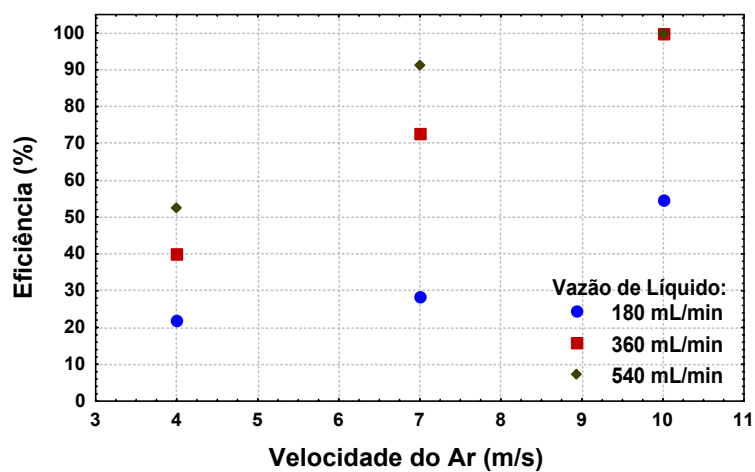


Figura 4.18 - Efeito da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência global para comprimento de garganta de 66 mm para o segundo planeamento.

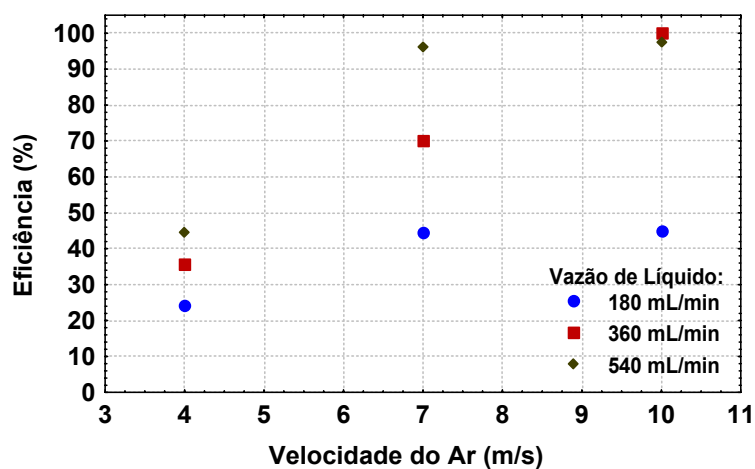


Figura 4.19 - Efeito da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência global para comprimento de garganta de 99 mm para o segundo planeamento.

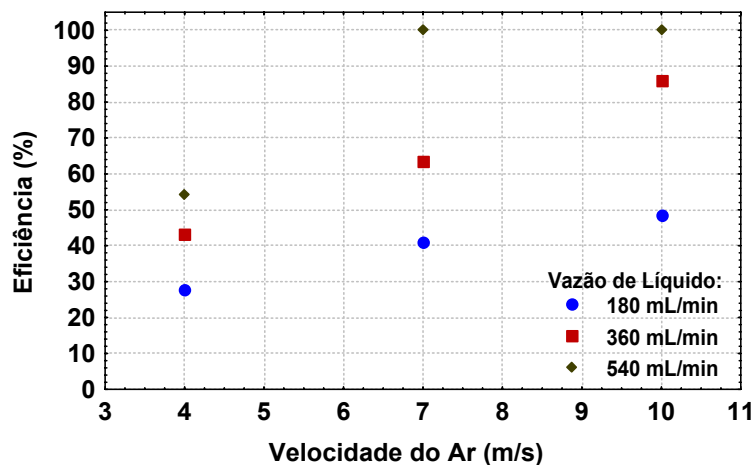


Figura 4.20 - Efeito da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência global para comprimento de garganta de 132 mm para o segundo planejamento.

4.3 - Influência do diâmetro da garganta na eficiência global de coleta

Foram realizados dois planejamentos experimentais idênticos, somente com uma diferença entre eles, o diâmetro da garganta dos lavadores venturi utilizados. Observou-se que ao trocar-se um lavador de diâmetro de 33mm por outro de 23mm, sem modificações nas condições operacionais, a eficiência global de coleta aumentava, o que pode ser observado nas Figuras 4.21 a 4.23.

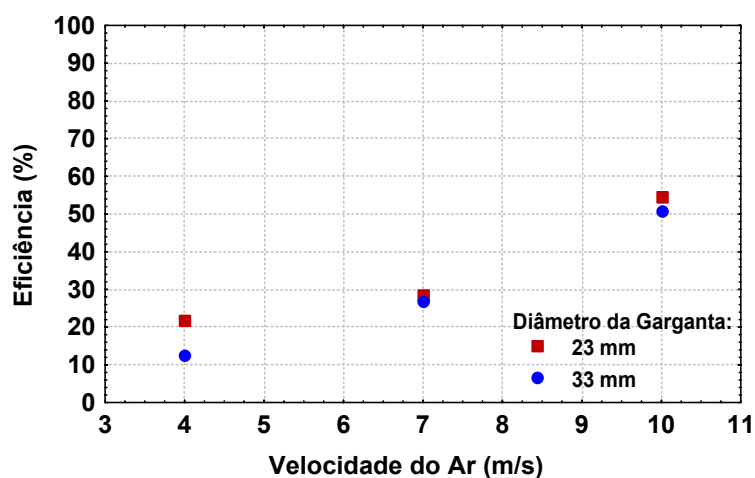


Figura 4.21 - Comparação entre diâmetros para comprimento de garganta de 66mm e vazão de líquido de 180 mL/min.

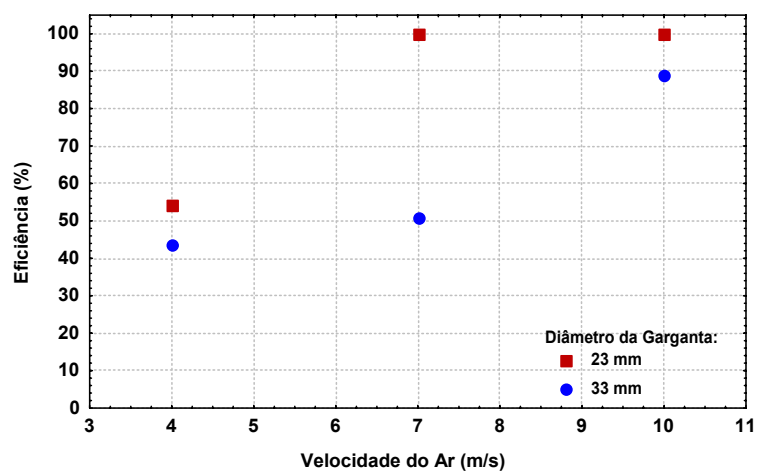


Figura 4.22 - Comparação entre diâmetros para comprimento de garganta de 132mm e vazão de líquido de 540mL/min.

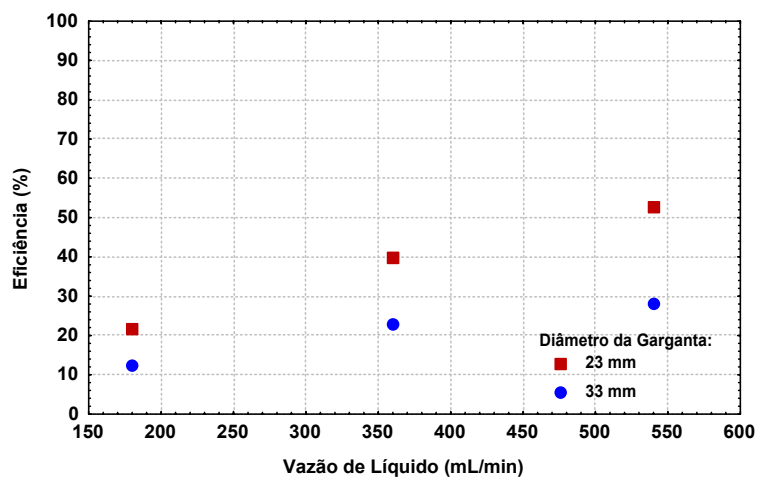


Figura 4.23 - Comparação entre diâmetros para comprimento de garganta de 66mm e velocidade do ar de 4m/s.

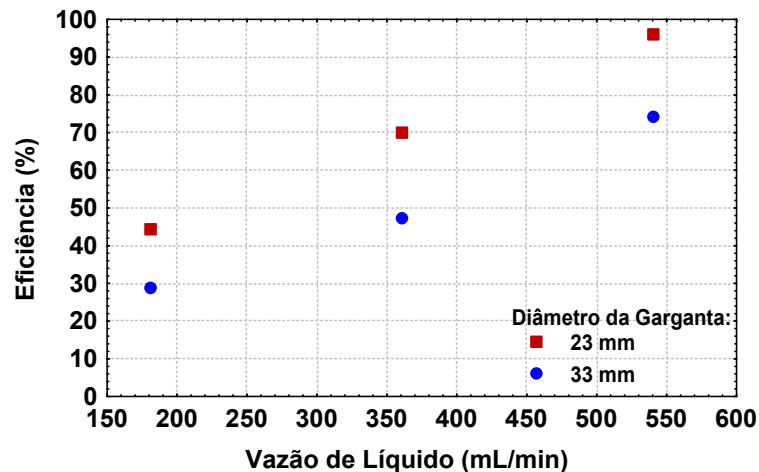


Figura 4.24 - Comparação entre diâmetros para comprimento de garganta de 99mm e velocidade do ar de 7m/s.

Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que ao trocar-se de um diâmetro maior por outro menor, mantendo-se as mesmas condições de operação, ocorria um aumento significativo na velocidade do ar na garganta do lavador. O aumento da velocidade é um fator muito importante, pois, aumenta a turbulência na garganta, ocasionando um maior contato entre as fases, e influencia diretamente na energia cinética das partículas. O incremento nos valores de energia cinética dificultam o desvio das partículas de obstáculos (gotas), ocasionando o choque, conseqüentemente, as partículas serão coletadas com maior eficiência. O aumento da velocidade também acarreta um melhor espalhamento do jato e um aumento na formação de gotas, fatores que influenciam diretamente a eficiência de coleta.

4.4 - Comparação da eficiência global de coleta experimental com as estimadas usando modelos semi-empíricos

Os valores experimentais de eficiência global de coleta foram comparados com os valores obtidos através dos modelos de CALVERT, CALVERT modificado e JOHNSTONE. Nas Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 estão apresentados os gráficos para a comparação dos resultados experimentais com os obtidos utilizando-se os modelos supracitados em três diferentes condições de vazão de líquido, variando-se a velocidade do ar. Observa-se que o modelo de CALVERT ajustou melhor os resultados em condições de maiores velocidades. Isto pode ser explicado pelo

fato de que a faixa de aplicação do modelo é entre 60 e 120 m/s de velocidade na garganta, velocidades superiores às utilizadas neste trabalho.

Os modelos de JOHNSTONE e CALVERT modificado subestimaram os valores de eficiência global de coleta. Isto pode ser explicado pelo fato de que o modelo de CALVERT modificado tem o parâmetro empírico de CALVERT como função do comprimento de garganta, no entanto, verificou-se que somente a interação quadrática do comprimento da garganta e não o comprimento da garganta teve um pequeno efeito na resposta eficiência global de coleta. No caso do modelo de JOHNSTONE, este é um modelo simplificado, que leva em conta somente a coleta de partículas por impactação inercial, mas há a presença de partículas com diâmetros inferiores a $0,5\ \mu\text{m}$ o que acarreta o aparecimento de outros mecanismos de coleta como o difusivo e o de interceptação direta. Os modelos estudados tiveram o mesmo comportamento em todas as condições de operação avaliadas para o primeiro planejamento. Pode-se observar, também, que os dados teóricos de eficiência global de coleta aumentam com o aumento da velocidade do ar, mostrando que estão de acordo com as afirmações feitas respeito do comportamento da eficiência frente a variações na velocidade do gás.

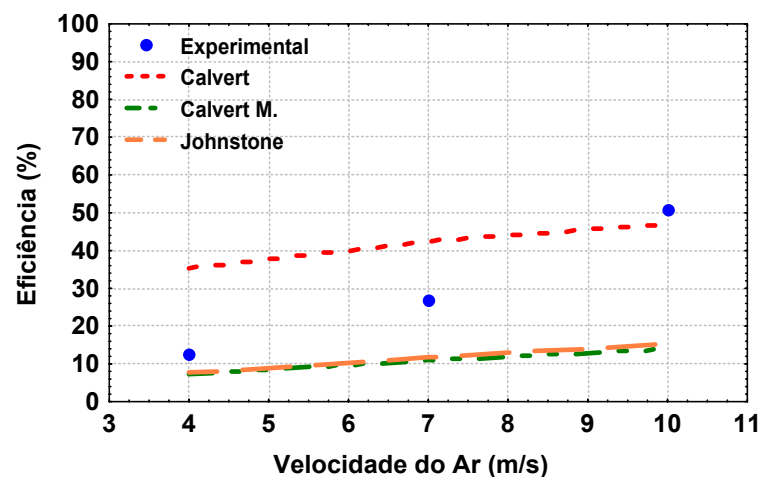


Figura 4.25 - Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos para 66 mm de comprimento de garganta, 180 mL/min de vazão de líquido para o primeiro planejamento.

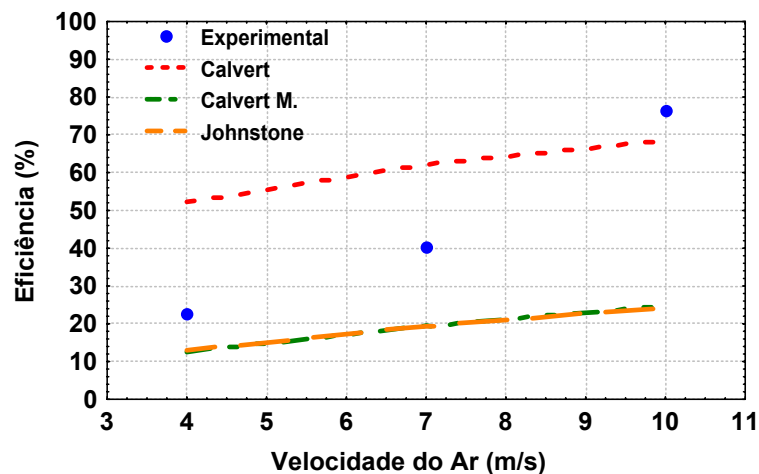


Figura 4.26 - Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos para 66 mm de comprimento de garganta, 360 mL/min de vazão de líquido e para o primeiro planeamento.

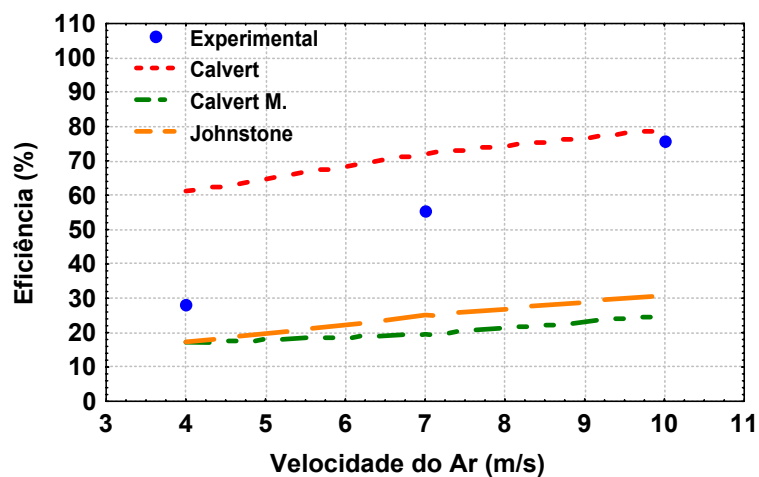


Figura 4.27 - Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos para 66 mm de comprimento de garganta, 540 mL/min de vazão de líquido e para o primeiro planeamento.

Nas Figuras 4.28, 4.29 e 4.30 estão apresentados os resultados da comparação entre as eficiência globais teóricas, obtidas pelos modelos de CALVERT, CALVERT modificado e JOHNSTONE, e as eficiências experimentais obtidas no segundo planeamento (diâmetro de garganta de 23 mm). Para os modelos de CALVERT e JOHNSTONE se aplica o afirmado

anteriormente para o primeiro planejamento. Já o modelo de CALVERT modificado não ajustou satisfatoriamente os dados experimentais pelo fato de que no segundo planejamento a variável comprimento de garganta, a interação quadrática desta variável ou sua interação com outra variável não tiveram efeito significativo na resposta eficiência global de coleta.

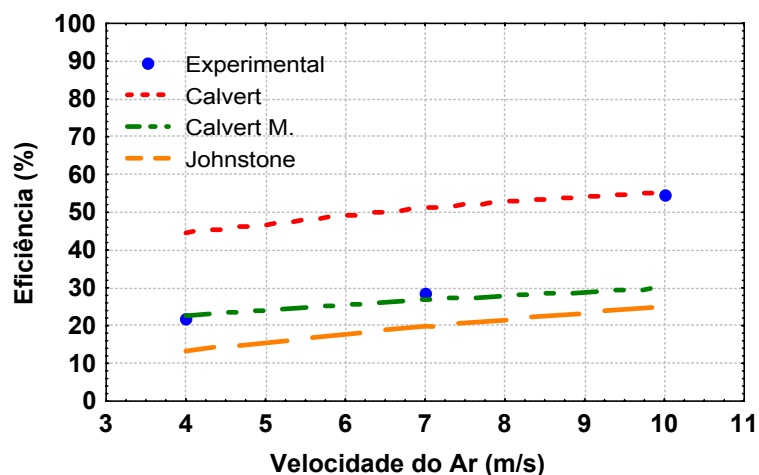


Figura 4.28 - Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos para 66 mm de comprimento de garganta, 180 mL/min vazão de líquido e para o segundo planejamento.

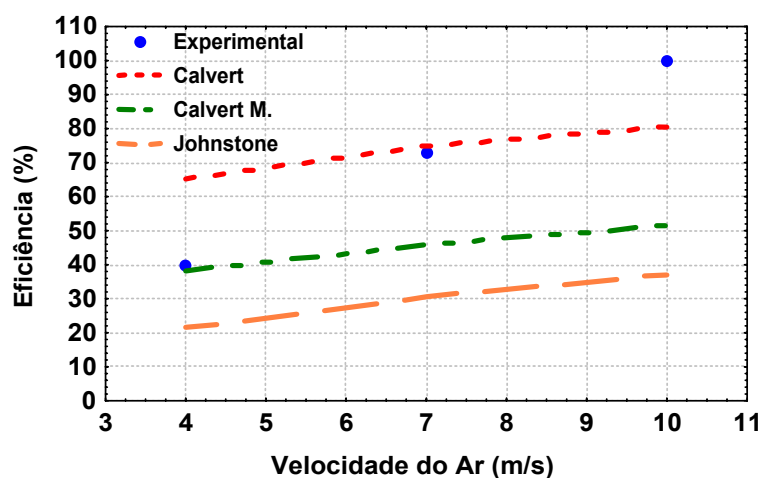


Figura 4.29 - Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos para 66 mm de comprimento de garganta, 360 mL/min de vazão de líquido e para o segundo planejamento.

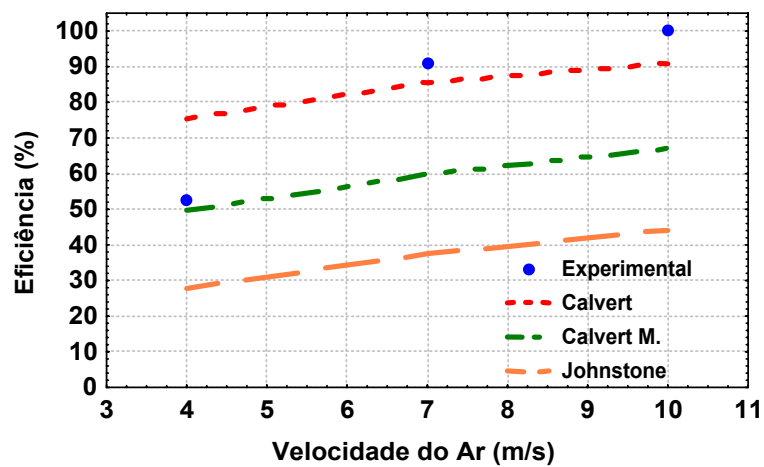


Figura 4.30 - Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos para 66 mm de comprimento de garganta, 540 mL/min de vazão de líquido e para o segundo planejamento

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A partir dos resultados obtidos e apresentados no capítulo anterior pode-se concluir que:

- Os percentuais médios de eficiência global de coleta ficaram na faixa de 45% para lavadores com diâmetro de garganta de 33 mm chegando a valores de no máximo 89% e mínimo de 11%.
- Para lavadores venturi com diâmetro de garganta de 23 mm os percentuais médios de eficiência global de coleta ficaram em 60% na média chegando a valores de 100% com mínimo de 21%.
- Considerando-se um nível de significância de 10% verificou-se que, para o primeiro planejamento, as variáveis vazão de líquido, velocidade do ar e a interação quadrática do comprimento de garganta tiveram influência significativa na resposta eficiência global de coleta.
- Para o segundo planejamento, considerando-se um nível de significância de 10%, as variáveis vazão de líquido, velocidade do ar, interação entre velocidade do ar e vazão de líquido e interações quadráticas da velocidade do ar e da vazão de líquido, foram as variáveis significativas na resposta eficiência global de coleta.
- Foram obtidos dois modelos estatísticos de segunda ordem para os dois planejamentos, onde os parâmetros de correlação foram obtidos através do método de regressão não-linear com níveis de significância inferiores a 10%.

- Para o primeiro planejamento, observou-se que tanto a distribuição de resíduos quanto o gráfico dos valores observados pelos valores estimados apresentavam a forma de cone. Isto pode ser explicado pelo fato de que o modelo estatístico obtido para o primeiro planejamento é praticamente linear, ou seja, é função das variáveis vazão de líquido e velocidade do ar com mais intensidade em relação à interação quadrática do comprimento da garganta. Portanto, este modelo consegue explicar os resultados obtidos de maneira eficiente para determinadas condições, porém, para outras há a necessidade de outras variáveis não lineares, que não aparecem no modelo, para que ocorra um melhor ajuste, o que compromete a distribuição de resíduos.
- A validade do modelo estatístico obtido para o segundo planejamento foi confirmada através da boa concordância dos valores observados com os valores estimados pelo modelo estatístico, pelo comportamento linear do gráfico de probabilidade normal dos resíduos, confirmando a boa adequação dos modelos e também através da distribuição aleatória dos resíduos em torno do zero demonstrando que não houve vícios experimentais.
- A eficiência é função da velocidade do ar e vazão de líquido, os quais influenciam diretamente o mecanismo de coleta de impactação inercial, predominante em lavadores venturi. Assim, o aumento nos valores das variáveis velocidade do ar e vazão de líquido ocasionam um incremento nos valores de eficiência global de coleta.
- A mudança de um lavador venturi de diâmetro maior para outro de menor diâmetro ocasiona um aumento na velocidade do ar na garganta, conseqüentemente, o aumento na energia cinética das partículas, aumento na turbulência na região da garganta, melhorando o contato entre as fases, melhor espalhamento do jato e aumento da formação de gotas, ocasionando, assim, o aumento da eficiência de coleta.
- Observou-se que o modelo de Calvert ajustou melhor os resultados em condições de maiores velocidades. Isto pode ser explicado pelo fato de que a faixa de aplicação do

modelo é entre 60 e 120 m/s de velocidade na garganta, velocidades superiores às utilizadas neste trabalho.

- O modelo de Calvert modificado subestimou a eficiência global de coleta o que pode ser explicado pelo fato de que o parâmetro empírico de Calvert é função do comprimento de garganta, no entanto, verificou-se que o comprimento da garganta não teve influência significativa no segundo planejamento e que a interação quadrática do comprimento da garganta teve uma influência fraca na resposta eficiência global de coleta.
- O modelo de Johnstone subestimou a eficiência global de coleta, isto explica-se pelo fato de que é um modelo mais simples, leva em conta somente a coleta de partículas por impactação inercial, mas observando-se os dados de análise granulométrica verificou-se há a presença de partículas com diâmetros inferiores a $0,5 \mu\text{m}$, portanto o mecanismo de coleta difusivo e de interceptação direta também devem ser levados em consideração.

Para trabalhos futuros propõe-se:

- Diminuir as restrições operacionais de velocidades do ar e vazão de líquido.
- Estudar o efeito das vazões de líquido sobre a penetração do jato na garganta do lavador venturi.
- Estudar o efeito da queda de pressão sobre a eficiência global de coleta em lavadores venturi.
- Avaliar o efeito das vazões sobre a formação de filme líquido nas paredes do lavador.
- Simular a operação de lavadores venturi utilizando técnica de fluidodinâmica computacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. W. K.. Prediction of venturi Scrubber Grade Efficiency Curves Using the Contacting Power Law. Powder Technology, 86, p. 137-144, 1996.
- ALONSO, D. F.; GONÇALVES, J. A. S.; AZZOPARDI, B. J.; COURY, J. R.. Drop Size Measurements in venturi Scrubbers. Chemical Engineering Science, p. 4901-4911, 2001.
- ANANTHANARAYANAN, N. V.; VISWANATHAN, S.. Estimating Maximum Removal Efficiency in venturi Scrubbers. AIChE Journal, vol. 44, nº 11, p. 2549-1560, 1998.
- BRINK JR., J. A.; CONTANT, C. E.. Experiments on an Industrial venturi Scrubber. Industrial and Engineering Chemistry, vol. 50, nº 8, p. 1157-1160, 1958.
- CALVERT, S.; LUNDGREN, D.; MEHTA, D.S. venturi scrubber performance. Journal of the Air Pollution Control Association, v.22, p.529-532, 1972.
- CALVERT, S. How to choose a particulate scrubber. Chemical Engineering, p.54-68, 29, 1977.
- CHEREMISINOFF, P. N.. Air Pollution Control and Design for Industry, Marcel Dekker Inc, 1993.
- DULLIEN, F.A.L. Industrial Gas Cleaning. New York, Academic Press, 1989.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIS ROESSLER – FEPAM – RS. Qualidade Ambiental. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br>>. Acesso em: 02/02/06.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE – FEEMA – RJ. Qualidade do Ar. Disponível em: <<http://www.feema.rj.gov.br>>. Acesso em: 02/02/06.
- GONÇALVES, J.A.S.; COSTA, M.A.M.; HENRIQUE, P.R.; COURY, J.R.. Atomization of liquids in a Pease-Anthony venturi scrubber Part I. Jet dynamics. Journal of Hazardous Materials, p. 267-279, 2003.

- GONÇALVES, J. A. S.. Aspectos da Modelagem Matemática de Lavadores venturi. Tese de Doutorado, UFSCar, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2000.
- GONÇALVES, J. A. S.; ALONSO, D. F.; COSTA, M. A. M.; AZZOPARDI, B. J.; COURY, J. R.. Evaluation of the Models Available for the Prediction of Pressure Drop in venturi Scrubbers. *Journal of Hazardous Materials*, p. 123-140, 2001.
- HEWITT, G.F.; HALL TAYLOR, N.S.. *Annular two-phase flow*. Oxford, Pergamon Press, 1970.
- JOHNSTONE, H.F.; FIELD, R.B.; TASSLER, M.C.. *Industrial Engineering Chemical*, 45, p. 1601, 1954.
- LEITH, D.; COOPER D.W. venturi scrubber optimization. *Atmospheric Environment*, v.14, p.657-664, 1980.
- MAYINGER, F.; LEHNER, M.. Operating Results and Aerosol Deposition of a venturi Scrubber in Self-Priming Operation. *Chemical Engineering and Processing*, vol. 34, p. 283-288, 1995.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Convenção Sobre a Mudança do Clima. O Brasil e a Convenção Quadro das Nações Unidas. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/clima>>. Acesso em: 10/09/05.
- MUIR, D. M.. *Dust and Fume Control, Revised 2nd Edition*. Industrial Chemical Engineering, Rugby, 1992.
- PERRY, R.; CHILTON, C. H.. *Manual de Engenharia Química*. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.
- PILAT, M.; NOLL, K. E.. Wet Scrubbers. In: DAVIS, W. T.. *Air Pollution Engineering Manual*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000, p. 73-85.

- RIBEIRO, A. P. R. A.. Estudo da Eficiência de Coleta em um Lavador venturi com Injeção de Líquido por Multi-Orifícios. Tese de Doutorado, UFSCar, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2005.
- ROBERTS, D.B.; HILL, J.C. Atomization in a venturi scrubber. Chemical Engineering Communication, v.12, p.33-68, 1981.
- RUDNICK, S.N.; KOEHLER, J.L.M.; MARTIN, K.P.; LEITH, D.; COOPER, D.W. Particle collection efficiency in a venturi scrubber: comparison of experiments with theory. Environmental Science and Technology, v.20, n.3, p.237-242, 1986.
- STANDER Jr, L. H.. Regulation Aspects of Air Pollution Control in the United States, In: DAVIS, W. T.. Air Pollution Engineering Manual, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000, p. 8-21.
- TAHERI, M.; HAINES, G.F. Optimisation of factors affecting scrubber performance. Journal of the Air Pollution Control Association, v.19, p.427-431, 1969.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 15/08/05.