

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE COLETA EM UM LAVADOR VENTURI**  
**COM INJEÇÃO DE LÍQUIDO POR MULTI-ORIFÍCIOS**

Ana Paula Rodrigues Alves Ribeiro

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Renato Coury

Agência Financiadora: CNPq

**São Carlos - SP**

**2005**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

R484ee

Ribeiro, Ana Paula Rodrigues Alves.

Estudo da eficiência de coleta em Lavador Venturi com injeção de líquido por multi-orifícios / Ana Paula Rodrigues Alves Ribeiro. -- São Carlos : UFSCar, 2005.  
93 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2005.

1. Ar - poluição. 2. Coletas de partículas. 3. Lavador Venturi. 4. Limpeza de gases industriais. I. Título.

CDD: 628.53 (20<sup>a</sup>)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE ANA PAULA RODRIGUES ALVES RIBEIRO, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 7 DE ABRIL DE 2005.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Renato Coury  
**Orientador, PPGEQ/UFSCar**

Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno  
**FEQ/UFU**

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Angélica Martins Costa  
**UNESP**

Prof. Dr. José Antonio Silveira Gonçalves  
**PPGEQ/UFSCar**

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Mônica Lopes Aguiar  
**PPGEQ/UFSCar**

## AGRADECIMENTOS

Em especial à minha mãe Marilene por ser a pessoa mais importante em minha vida.

Às minhas irmãs Juliane e Luciana pela força nos momentos difíceis.

Ao professor José Renato Coury pela orientação e apoio fundamentais na concretização deste trabalho.

Ao professor José Antônio Gonçalves pela co-orientação e disponibilidade.

À dra. Márcia Alves Pötter pela paciência e por ter acreditado na minha recuperação.

À minha companheira Érica Tognetti pela ajuda na parte experimental deste trabalho.

À Maria Angélica Martins Costa pelo seu importante auxílio no início deste trabalho.

Aos meus colegas de laboratório Carol, Edinalda, Edmundo, Érica, Feliceti, Juliana, Karina, Lisandra, Marquinhos, Normanda, Ricardo e Simone pelo apoio e amizade.

Ao funcionário Oscar pela sua disponibilidade durante todo o trabalho experimental.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido.

## RESUMO

Este trabalho teve por objetivo estudar a influência das variáveis vazão de líquido, comprimento da garganta, número de orifícios e velocidade do gás na garganta na eficiência de coleta de um lavador Venturi. Como material particulado a ser removido de uma corrente gasosa utilizou-se um concentrado fosfático de densidade  $2,9 \text{ g/cm}^3$  na vazão mássica de  $3,16 \text{ g/min}$ . O sistema experimental utilizado neste trabalho consistiu de um lavador Venturi de geometria retangular operando horizontalmente e com injeção de líquido através de 1 a 5 orifícios de 1 mm de diâmetro distribuídos na garganta do mesmo. Para a realização dos experimentos utilizou-se dois planejamentos experimentais do tipo completo, com três fatores em três diferentes níveis. No primeiro planejamento foi estudada a influência das variáveis vazão de líquido na faixa de  $300$  a  $900 \text{ cm}^3/\text{min}$ , comprimento da garganta na faixa de  $6,5$  a  $18,5 \text{ cm}$  e número de orifícios na faixa de 1 a 5 orifícios, mantendo-se constante a velocidade do gás na garganta com um valor de  $69,33 \text{ m/s}$ . No segundo planejamento foi estudada a influência da variável velocidade do gás na garganta na faixa de  $58,66$  a  $69,33 \text{ m/s}$ , utilizando-se apenas 1 orifício para injeção de líquido. Verificou-se que os percentuais de eficiência de coleta no lavador Venturi ficaram na faixa de 50 a 91% para o primeiro planejamento. Observou-se uma tendência de aumento da eficiência de remoção de partículas com o aumento da vazão de líquido e do comprimento da garganta. Quanto ao fator número de orifícios verificou-se um melhor desempenho do lavador quando utilizou-se apenas 1 orifício. Verificou-se que os percentuais de eficiência de coleta no lavador Venturi ficaram na faixa de 52 a 93% para o segundo planejamento. Observou-se que o aumento da velocidade do gás na garganta provocou um aumento na eficiência de coleta. Comparou-se as predições das clássicas equações de eficiência de Johnstone et al. (1954), Calvert et al. (1972) e Leith e Cooper (1980) com os valores experimentais. Observou-se que para os resultados experimentais e para os modelos avaliados que a eficiência global é crescente com o aumento da vazão de líquido. No entanto, verificou-se que os modelos de Johnstone et al. e Calvert et al. subestimaram os valores de eficiência global obtidos experimentalmente enquanto o modelo de Leith e Cooper superestimou os mesmos. Com isso, tornou-se necessário ter um modelo para ajustar aos pontos experimentais. Tomou-se como base o modelo de Calvert et al. por ser um modelo clássico e ser amplamente utilizado na indústria. Propôs-se então uma equação de ajuste para o fator empírico  $f$  utilizando os dados experimentais. Como verificou-se em testes anteriores que a variável comprimento de garganta é relevante na eficiência de coleta e a mesma não aparece na equação proposta por Calvert et al., decidiu-se ajustar uma equação de  $f$  em função de  $L_G$  da forma  $f=0,5161.L_G^{0,3005}$ . Verificou-se a validade do ajuste pela boa concordância dos valores experimentais de eficiência observados experimentalmente com os valores estimados pelo modelo de Calvert modificado.

Palavras-chave: Poluição do ar. Lavador Venturi. Limpeza de gases industriais. Coleta de partículas.

## ABSTRACT

This work had for objective to study the influence of the variables liquid flow, throat length, number of orifices and gas velocity in the throat in the collection efficiency of a Venturi scrubber. As particulate matter to be removed from the gas, a phosphate concentrate of density  $2.9 \text{ g/cm}^3$  was used, fed at a mass flow rate of  $3.16 \text{ g/min}$ . The experimental system used in this work consisted of a Venturi scrubber of rectangular geometry operating horizontally, with liquid injection through 1 to 5 orifices with 1 diameter mm each, distributed in the scrubber throat. For the experiments, two experimental planning were used, with three factors in three different levels. In the first planning was studied the influence of the variables liquid flow in the range from 300 to  $900 \text{ cm}^3/\text{min}$ , throat length in the range from 6.5 to 18.5 cm and number of orifices in the range from 1 to 5 holes; the gas velocity in the throat was kept constant at value of  $69.33 \text{ m/s}$ . In the second planning was studied the influence of the variable gas velocity in the throat in the range from 58.66 to  $69.33 \text{ m/s}$ , with the liquid injected by a single orifice. It was verified that the overall collection efficiency of the Venturi scrubber varied within the range from 50 to 91%, for the studied conditions in the first planning. A tendency of increase of the efficiency was observed with the increase of the liquid flow and of the throat length. As for the number of orifices, a better performance of the scrubber was verified when only 1 orifice was used. It was verified that the overall collection efficiency of the Venturi scrubber varied within the range from 52 to 93%, for the studied conditions in the second planning. Was observed that the increase in the gas velocity in the throat resulted in an increase in the overall collection efficiency. The predictions of the classical equations for collection efficiency of Johnstone et al. (1954), Calvert et al. (1972) and Leith and Cooper (1980) were compared to the experimental values. It was observed that both for the experimental results and for the models that the global efficiency increases with the increase of the liquid flow. However, it was verified that the models of Johnstone et al. and Calvert et al. underestimated the values of global efficiency obtained experimentally while the model of Leith and Cooper overestimated them. Therefore, it became necessary to adjust a model to the experimental points. It was taken as departure point the model of Calvert et al., for being a classic model and because it is widely used industrially. An adjustment equation for the empiric factor  $f$  using the experimental data was then performed. As it was verified in previous tests that the variable throat length is relevant in the collection efficiency and the same does not appear in the equation proposed by Calvert et al., it was decided to adjust an equation of  $f$  in function as a function of  $L_G$  as  $f=0,5161.L_G^{0,3005}$ . The validity of the adjustment was verified by the good agreement of the experimental values of efficiency observed experimentally with the predicted values by the modified Calvert model.

Key words: Air Pollution. Venturi scrubber. Industrial gas cleaning. Particle collection.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	p.iv
<b>ABSTRACT</b> .....	p.v
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	p.ix
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	p.xii
<b>NOMENCLATURA</b> .....	p.xiv
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	p.1
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	p.2
2.1 Lavadores .....	p.2
2.2 Mecanismos de Coleta de Partículas em Lavadores .....	p.3
2.2.1 Impactação Inercial .....	p.4
2.2.2 Intercepção .....	p.6
2.2.3 Difusão .....	p.7
2.3 Tipos de Lavadores .....	p.8
2.3.1 Lavador Venturi .....	p.8
2.4 Artigos Experimentais com Lavadores Venturi .....	p.11
2.4.1 Experiments on an industrial Venturi scrubber (BRINK e CONTANT, 1958) .....	p.11
2.4.2 Venturi scrubber performance (CALVERT et al., 1972b) .....	p.12
2.4.3 Particle collection and pressure drop in Venturi scrubbers (BOLL, 1973) ....	p.12
2.4.4 Atomization and cloud behavior in Venturi scrubbing (HESKETH, 1973) ...	p.13
2.4.5 On the efficiency of a Venturi scrubber (BEHIE e BEECKMANS, 1973) ....	p.13
2.4.6 Effects of water injection arrangement on the performance of a Venturi scrubber (BEHIE e BEECKMANS, 1974) .....	p.14
2.4.7 Comparison of the performance of a single and two-stage variable-throat Venturi scrubber (MUIR e MIHESI, 1979) .....	p.15
2.4.8 Particle collection by a pilot plant Venturi scrubber downstream from a pilot plant (SPARKS et al., 1981) .....	p.15

2.4.9 Particle collection efficiency in a Venturi scrubber: comparison of experiments with theory (RUDNICK et al., 1986) .....	p.17
2.4.10 Operating results and aerosol deposition of a venturi scrubber in self-priming operation (MAYINGER e LEHNER, 1995) .....	p.18
2.4.11 Estudo do desempenho de um lavador de gases tipo Venturi para remoção de partículas na faixa respirável (OLIVEIRA, 1995) .....	p.19
2.4.12 Prediction of Venturi scrubber grade efficiency curves using the contacting power law (ALLEN, 1996) .....	p.20
2.4.13 Aspectos da modelagem matemática de lavadores Venturi (GONÇALVES, 2000) .....	p.21
2.4.14 Eficiência de coleta de partículas em lavadores Venturi (MARTINS COSTA, 2002) .....	p.22
2.5 Modelagem de Lavadores Venturi .....	p.22
2.5.1 Equação de Penetração do Jato .....	p.22
2.5.2 Modelos de Eficiência de Coleta .....	p.23
2.5.2.1 Modelo de Johnstone(1954) .....	p.23
2.5.2.2 Modelo de Calvert (1972) .....	p.24
2.5.2.3 Modelo de Leith e Cooper (1980) .....	p.24
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>p.26</b>
3.1 Material Particulado .....	p.26
3.2 Líquido de Limpeza .....	p.27
3.3 Aparato Experimental .....	p.27
3.4 Procedimento Experimental .....	p.32
3.5 Planejamento Experimental .....	p.33
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>p.38</b>
4.1 Realização da Matriz do Primeiro Planejamento Experimental .....	p.38
4.1.1 Influência da Vazão de Líquido na Eficiência Global .....	p.39
4.1.2 Influência do Comprimento de Garganta na Eficiência Global .....	p.40
4.1.3 Influência do Número de Orifícios na Eficiência Global .....	p.42



4.1.4 Efeito da Penetração do Jato na Eficiência Global .....	p.45
4.1.5 Obtenção do Modelo Estatístico para o Primeiro Planejamento .....	p.47
4.1.6 Verificação da Validade da Análise Estatística para o Primeiro Planejamento .....	p.48
4.2 Realização da Matriz do Segundo Planejamento Experimental .....	p.50
4.2.1 Influência da Velocidade do Gás na Garganta na Eficiência Global .....	p.51
4.2.2 Obtenção do Modelo Estatístico para o Segundo Planejamento .....	p.53
4.2.3 Verificação da Validade da Análise Estatística para o Segundo Planejamento .....	p.54
4.2.4 Comparação dos Resultados Experimentais com os Modelos Teóricos de Eficiência .....	p.56
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>p.62</b>
<b>6 SUGESTÕES .....</b>	<b>p.64</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>p.65</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>p.73</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mecanismo da impactação inercial .....	p.4
Figura 2.2 - Mecanismo da interceptação .....	p.6
Figura 2.3 - Mecanismo da difusão .....	p.7
Figura 2.4 - Configuração típica do lavador Venturi .....	p.9
Figura 2.5 - Variação da pressão do gás ao longo de um lavador Venturi .....	p.10
Figura 3.1 - Distribuição de tamanho de partícula do concentrado fosfático .....	p.27
Figura 3.2 - Lavador Venturi de geometria retangular .....	p.28
Figura 3.3 - Vista esquemática da posição dos orifícios .....	p.28
Figura 3.4 - Esquema do sistema experimental .....	p.30
Figura 3.5 - Esquema do gerador de pó do tipo prato rotatório .....	p.31
Figura 4.1 - Efeito da vazão de líquido na eficiência global para 1 orifício (vide Tabela 3.2) .....	p.39
Figura 4.2 - Efeito da vazão de líquido na eficiência global para 3 orifícios (Config. 1, vide Tabela 3.2) .....	p.40
Figura 4.3 - Efeito da vazão de líquido na eficiência global para 5 orifícios (vide Tabela 3.2) .....	p.40
Figura 4.4 - Efeito do comprimento de garganta na eficiência de global para $Q_L=300 \text{ cm}^3/\text{min}$ .....	p.41
Figura 4.5 - Efeito do comprimento de garganta na eficiência de global para $Q_L=600 \text{ cm}^3/\text{min}$ .....	p.41
Figura 4.6 - Efeito do comprimento de garganta na eficiência global para $Q_L=900 \text{ cm}^3/\text{min}$ .....	p.42
Figura 4.7 - Efeito do número de orifícios Config. 1 na eficiência global para $L_G = 6,5 \text{ cm}$ .....	p.43
Figura 4.8 - Efeito do número de orifícios Config. 2 na eficiência global para $L_G = 6,5 \text{ cm}$ .....	p.43
Figura 4.9 - Efeito do número de orifícios Config. 1 na eficiência global para $L_G = 12,5 \text{ cm}$ .....	p.44
Figura 4.10 - Efeito do número de orifícios Config. 1 na eficiência global para $L_G = 18,5 \text{ cm}$ .....	p.44

Figura 4.11 - Efeito da penetração do jato na eficiência global para $L_G = 6,5$ cm e $V_G=69,33$ m/s .....	p.46
Figura 4.12 - Gráfico dos valores observados versus os valores estimados para o primeiro planejamento .....	p.48
Figura 4.13 - Probabilidade normal dos resíduos do modelo estatístico para o primeiro planejamento .....	p.49
Figura 4.14 - Distribuição dos resíduos do modelo estatístico para o primeiro planejamento .....	p.49
Figura 4.15 - Efeito da velocidade do gás na garganta na eficiência de coleta para $Q_L=300$ cm <sup>3</sup> /min .....	p.51
Figura 4.16 - Efeito da velocidade do gás na garganta na eficiência de coleta para $Q_L=600$ cm <sup>3</sup> /min .....	p.52
Figura 4.17 - Efeito da velocidade do gás na garganta na eficiência de coleta para $Q_L=900$ cm <sup>3</sup> /min .....	p.52
Figura 4.18 - Gráfico dos valores observados versus os valores estimados para o segundo planejamento .....	p.54
Figura 4.19 - Probabilidade normal dos resíduos do modelo estatístico para o segundo planejamento .....	p.55
Figura 4.20 - Distribuição dos resíduos do modelo estatístico para o segundo planejamento .....	p.55
Figura 4.21 - Comparação entre as eficiências geradas pelos modelos e os valores experimentais para $L_G=6,5$ cm e $V_G=64$ m/s .....	p.56
Figura 4.22 - Comparação entre as eficiências geradas pelos modelos e os valores experimentais para $L_G=6,5$ cm e $V_G=69,33$ m/s .....	p.57
Figura 4.23 - Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para $V_G=64$ m/s e $L_G=6,5$ cm .....	p.58
Figura 4.24 - Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para $V_G=64$ m/s e $L_G=12,5$ cm .....	p.59
Figura 4.25 - Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para $V_G=64$ m/s e $L_G=18,5$ cm .....	p.59
Figura. 4.26 - Eficiência global teórica (Eqs. 2.10, 2.11, 4.2) vs. Experimental .....	p.60

Figura D.1 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para $V_G=58,66$ m/s e $L_G=6,5$ cm .....	p.89
Figura D.2 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para $V_G=58,66$ m/s e $L_G=12,5$ cm .....	p.89
Figura D.3 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para $V_G=58,66$ m/s e $L_G=18,5$ cm .....	p.90
Figura D.4 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para $V_G=64$ m/s e $L_G=6,5$ cm .....	p.90
Figura D.5 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para $V_G=64$ m/s e $L_G=12,5$ cm .....	p.91
Figura D.6 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para $V_G=64$ m/s e $L_G=18,5$ cm .....	p.91
Figura D.7 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para $V_G=69,33$ m/s e $L_G=6,5$ cm .....	p.92
Figura D.8 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para $V_G=69,33$ m/s e $L_G=12,5$ cm .....	p.92
Figura D.9 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para $V_G=69,33$ m/s e $L_G=18,5$ cm .....	p.93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Distribuição de tamanho de partícula do concentrado fosfático .....	p.26
Tabela 3.2 – Configurações de orifícios utilizadas nos testes .....	p.29
Tabela 3.3 - Dimensões do lavador Venturi de geometria retangular .....	p.29
Tabela 3.4 - Variáveis e níveis do primeiro planejamento .....	p.33
Tabela 3.5 - Matriz do primeiro planejamento experimental .....	p.34
Tabela 3.6 - Variáveis e níveis do segundo planejamento .....	p.35
Tabela 3.7 - Matriz do segundo planejamento experimental .....	p.36
Tabela 4.1 – Resultados da matriz do primeiro planejamento experimental .....	p.38
Tabela 4.2 – Valores dos coeficientes do modelo para o primeiro planejamento .....	p.47
Tabela 4.3 – Resultados da matriz do segundo planejamento experimental .....	p.50
Tabela 4.4 – Valores dos coeficientes do modelo para o segundo planejamento .....	p.53
Tabela 4.5- Desvios entre os valores experimentais e os do modelo de Calvert modificado .....	p.61
Tabela A.1 – Valores de vazão de líquido .....	p.73
Tabela B.1 – Resultado da calibração do gerador de pó .....	p.74
Tabela C.1 – Condições e resultados do teste 1 .....	p.75
Tabela C.2 – Condições e resultados do teste 2 .....	p.75
Tabela C.3 – Condições e resultados do teste 3 .....	p.76
Tabela C.4 – Condições e resultados do teste 4 .....	p.76
Tabela C.5 – Condições e resultados do teste 5 .....	p.77
Tabela C.6 – Condições e resultados do teste 6 .....	p.77
Tabela C.7 – Condições e resultados do teste 7 .....	p.78
Tabela C.8 – Condições e resultados do teste 8 .....	p.78
Tabela C.9 – Condições e resultados do teste 9 .....	p.79
Tabela C.10 – Condições e resultados do teste 10 .....	p.79
Tabela C.11 – Condições e resultados do teste 11 .....	p.80
Tabela C.12 – Condições e resultados do teste 12 .....	p.80
Tabela C.13 – Condições e resultados do teste 13 .....	p.81
Tabela C.14 – Condições e resultados do teste 14 .....	p.81
Tabela C.15 – Condições e resultados do teste 15 .....	p.82

Tabela C.16 – Condições e resultados do teste 16 .....	p.82
Tabela C.17 – Condições e resultados do teste 17 .....	p.83
Tabela C.18 – Condições e resultados do teste 18 .....	p.83
Tabela C.19 – Condições e resultados do teste 19 .....	p.84
Tabela C.20 – Condições e resultados do teste 20 .....	p.84
Tabela C.21 – Condições e resultados do teste 21 .....	p.85
Tabela C.22 – Condições e resultados do teste 22 .....	p.85
Tabela C.23 – Condições e resultados do teste 23 .....	p.86
Tabela C.24 – Condições e resultados do teste 24 .....	p.86
Tabela C.25 – Condições e resultados do teste 25 .....	p.87
Tabela C.26 – Condições e resultados do teste 26 .....	p.87
Tabela C.27 – Condições e resultados do teste 27 .....	p.88

## NOMENCLATURA

A	Fator empírico, adimensional
$A_O$	Área dos orifícios, $m^2$
B	Fator empírico, adimensional
C	Fator de correção de Cunningham, adimensional
D	Coefficiente de difusividade, $m^2/s$
$D_d$	Diâmetro da gota, $\mu m$
$d_o$	Diâmetro do orifício, mm
$d_p$	Diâmetro da partícula, $\mu m$
f	Fator empírico de Calvert, adimensional
F	Fator empírico função de f, adimensional
K	Fator empírico de Johnstone, adimensional
$K_B$	Constante de Boltzmann, J/K
$L_G$	Comprimento da garganta, cm
$l^{**}$	Penetração do jato, mm
$\dot{m}_E$	Vazão mássica de entrada do material particulado, g/s
$\dot{m}_S$	Vazão mássica de saída obtida após o separador centrífugo, g/s
$N_O$	Número de orifícios, adimensional
$Q_L$	Vazão volumétrica de líquido injetado na garganta do Venturi, $m^3/s$
$Q_G$	Vazão volumétrica do gás, $m^3/s$
T	Temperatura do gás, °C
$V_G$	Velocidade do gás na garganta, m/s
$V_j$	Velocidade do jato, m/s

**LETRAS GREGAS**

$\psi$	Parâmetro de impactação inercial, adimensional
$\rho_P$	Densidade da partícula, Kg/m <sup>3</sup>
$\rho_L$	Densidade do líquido, Kg/m <sup>3</sup>
$\rho_G$	Densidade do gás, Kg/m <sup>3</sup>
$\mu_G$	Viscosidade do gás, Kg/m.s
$\mu_L$	Viscosidade do líquido, Kg/m.s
$\sigma_L$	Tensão superficial do líquido (N/m)
$\eta$	Eficiência de coleta (%)
$\Delta P$	Queda de pressão (Pa)
$\beta$	Fator de correção para a queda de pressão, adimensional
$\varepsilon$	Porosidade, adimensional



## 1 INTRODUÇÃO

O interesse atual no controle da poluição do ar tem aumentado a importância de avaliar-se métodos eficientes e econômicos para a remoção de pequenas partículas em uma corrente gasosa. Um destes métodos de grande aplicação industrial envolve o contato entre uma corrente gasosa, contendo partículas, e um líquido, normalmente a água, sendo que os equipamentos que utilizam este princípio são conhecidos como lavadores [LAPPLE et al., 1955].

A primeira instalação de um lavador Venturi em escala industrial ocorreu em 1947, sendo que a partir daí muitas importantes aplicações tem sido obtidas na coleta de aerossóis, evaporação e absorção de gases [BRINK et al., 1958]. Os lavadores Venturi são muito utilizados para a coleta de material particulado em uma corrente gasosa em função de removerem eficientemente partículas numa larga faixa granulométrica, serem compactos e de simples construção [RUDNICK et al., 1986]. Os lavadores Venturi também são os únicos coletores de alta eficiência que podem remover simultaneamente gases e material particulado de uma corrente gasosa [CHEREMISINOFF et al., 1977; VISWANATHAN, 1997].

Diversas pesquisas em lavadores Venturi demonstraram que as eficiências de coleta destes equipamentos são dependentes de muitas variáveis, como o tamanho da partícula, a velocidade do gás, a taxa de líquido e o tipo de injeção de líquido [BRINK et al., 1958].

Este trabalho tem por objetivo estudar a influência das variáveis vazão de líquido, comprimento da garganta, número de orifícios e velocidade do gás na garganta na eficiência de coleta de um lavador Venturi.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Lavadores

O rigor atual da legislação ambiental requer cada vez mais a utilização de equipamentos de limpeza de gases para a remoção de partículas suspensas em efluentes gasosos. Um destes equipamentos de grande aplicação industrial é o lavador de gases [VISWANATHAN, 1998].

Os lavadores constituem a categoria mais nova de coletores de partículas, existindo uma enorme variedade de tipos que podem ser empregados para partículas de tamanhos compreendidos entre 0,1 e 100 $\mu$ m. A eficiência de captação guarda uma relação direta com a perda de carga e o custo do equipamento [GOMIDE, 1980].

Os lavadores são utilizados na remoção de contaminantes sólidos ou gasosos da corrente de efluentes gasosos, com as aplicações industriais incluindo o uso em caldeiras, fornos de cal, incineradores de resíduo urbano e equipamentos de controle de odor, entre outros [DULLIEN, 1989]. Estes separadores são os únicos que podem auxiliar no controle das emissões de metais tóxicos e compostos metálicos de sistemas de incineração [HESKETH, 1996].

Nos modelos mais simples de lavadores as partículas incidem em um anteparo úmido, sendo após arrastadas pela corrente líquida. Nos modelos de maior eficiência, chamados de lavadores de gases, as partículas incidem diretamente em gotículas líquidas que se movimentam através do gás. Em certos tipos de equipamentos desta classe, o líquido é parcialmente vaporizado e logo depois condensa sobre as partículas sólidas que atuam como núcleos de condensação. Por esse mecanismo, o tamanho das partículas pode aumentar consideravelmente, o que facilita a sua captação.

O líquido geralmente utilizado nos lavadores é a água, muito embora os óleos minerais também sejam empregados em algumas situações. O sólido a separar deve ser molhável pelo líquido, porém deve-se verificar com especial cuidado a eventualidade de se produzirem compostos corrosivos durante a lavagem. É o caso da lavagem de gases de combustão que sempre vem acompanhada da produção de ácido sulfuroso, que ataca o aço, e dos gases produzidos nos fornos de fundição de alumínio, que contém Cl<sub>2</sub>, F<sub>2</sub>, HCl e NaCl gaseificado [GOMIDE, 1980].

As vantagens da coleta úmida de partículas em relação aos métodos a seco são:

- O custo inicial do equipamento é geralmente menor em comparação por exemplo aos filtros de manga e precipitadores eletrostáticos;
- Gases a altas temperaturas podem ser economicamente resfriados e subseqüentemente absorvidos;
- Os contaminantes gasosos e particulados podem ser coletados no mesmo equipamento;
- Muitos materiais combustíveis e explosivos são coletados com segurança;
- Materiais higroscópicos ou pegajosos podem ser manuseados sem problemas;
- Os sistemas são usualmente mais simples e compactos.

O coletores úmidos também apresentam algumas desvantagens, incluindo:

- Os problemas de disposição do efluente líquido, cujo custo de tratamento pode ser elevado;
- O consumo de energia que pode ser mais alto em comparação aos outros tipos de equipamentos;
- Os problemas de corrosão que podem ocorrer;
- Os gases de saída são saturados com umidade, resultando, muitas vezes, em uma pluma de vapor ou condensação na chaminé [HEUMANN, 1997; DULLIEN, 1989].

## **2.2 Mecanismos de Coleta de Partículas em Lavadores**

Os lavadores removem material particulado de uma corrente gasosa por um ou mais mecanismos de coleta de partículas, sendo que os principais são a impactione inercial, a interceptação e a difusão.

A eficiência destes mecanismos é influenciada pelo tamanho das partículas e das gotas, pelas condições operacionais do lavador e pela turbulência do sistema [TAHERI et al., 1969].

### 2.2.1 Impactação Inercial

A impactação inercial é, em geral, considerada o mecanismo predominante de coleta de partículas em um lavador, sendo efetiva para diâmetros maiores que  $0,5\mu\text{m}$  [TAHERI et al., 1969; ALLEN, 1996].

No mecanismo da impactação inercial (Figura 2.1), as partículas arrastadas pela corrente gasosa, ao se aproximarem do corpo coletor (gota líquida), tendem a seguir na sua trajetória original em virtude da sua inércia, podendo atingir o obstáculo e serem então coletadas [PERRY, 1980]. Nos lavadores este mecanismo ocorre entre partículas e gotas relativamente grandes [HEUMANN, 1997].

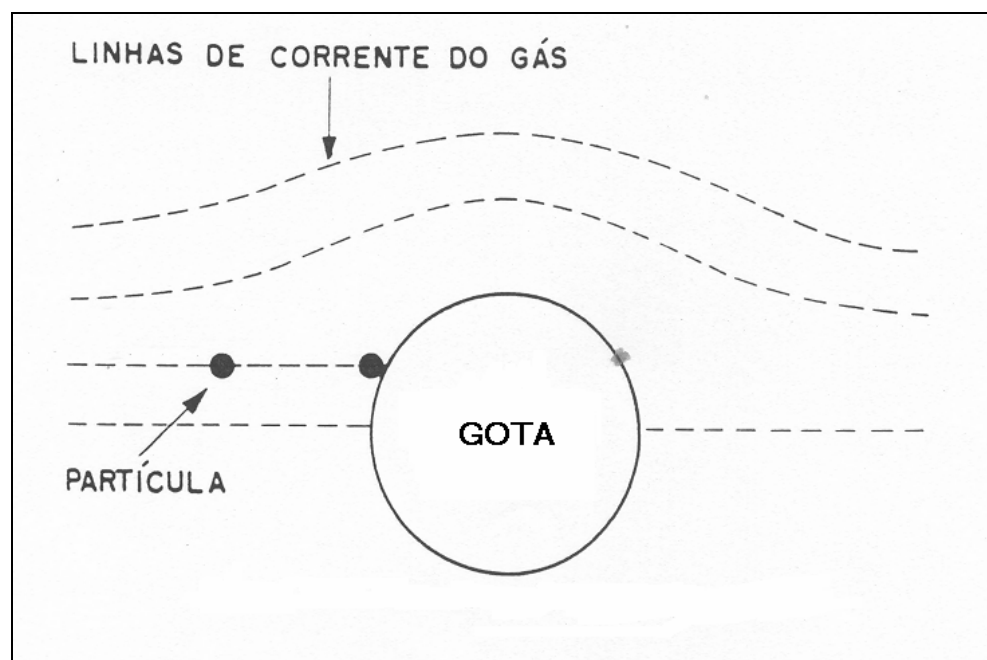


Figura 2.1 - Mecanismo da impactação inercial [HEUMANN, 1997]

O mecanismo inercial de coleta pode ser caracterizado por um número adimensional característico, conhecido como parâmetro de impactação inercial ( $\psi$ ), que é igual a metade do número de Stokes, e representa a razão entre a força necessária para parar uma partícula movendo-se inicialmente a uma dada velocidade e a resistência viscosa apresentada pelo fluido [GONÇALVES, 2000]:

$$\psi = \frac{\rho_p \cdot (d_p)^2 \cdot V_G \cdot C}{18 \cdot \mu_G \cdot D_d} \quad (2.1)$$

onde:

$\rho_p$  = densidade da partícula

$d_p$  = diâmetro de partícula

$V_G$  = velocidade do gás na garganta

$\mu_G$  = viscosidade do gás

$D_d$  = diâmetro médio de Sauter da gota de líquido

$C$  = fator de correção de Cunningham, igual na CNTP a

$$C = 1 + \frac{1,65 \cdot 10^{-7}}{d_p} \quad (2.1a)$$

Na equação (2.1a) deve-se usar valores em S.I..

Para o cálculo do diâmetro da gota  $D_d$ , utilizado na equação (2.1), emprega-se o diâmetro médio de Sauter, o qual é obtido a partir da correlação proposta por Nukiyama e Tanasawa (1938):

$$D_d = \frac{58600}{V_G} \left( \frac{\sigma_L}{\rho_L} \right)^{1/2} + 597 \cdot \left( \frac{\mu_L}{\sqrt{\rho_L \cdot \sigma_L}} \right)^{0,45} \cdot \left( 1000 \cdot \frac{Q_L}{Q_G} \right)^{1,5} \quad (2.2)$$

onde:

$\sigma_L$  = tensão superficial do líquido

$\rho_L$  = densidade do líquido

$\mu_L$  = viscosidade do líquido

$Q_L$  = vazão volumétrica de líquido injetado na garganta do Venturi

$Q_G$  = vazão volumétrica do gás

Na equação (2.2) deve-se usar valores em CGS para obter  $D_d$  em  $\mu\text{m}$ .

No caso de coleta num meio de porosidade  $\varepsilon$ , a equação semi-empírica de Thambimuthu (apud COURY, 1986) se aplica:

$$\eta = \left[ \frac{2\psi}{2\psi + 0.062\varepsilon} \right]^3 \quad (2.3)$$

### 2.2.2 Intercepção

O mecanismo da intercepção considera que uma partícula se movendo ao redor de um corpo coletor (gota líquida), em uma corrente gasosa, pode vir a entrar em contato com o mesmo devido ao tamanho físico desta partícula (Figura 2.2) [HEUMANN, 1997].

Este mecanismo leva em conta o fato que, ainda que o centro de gravidade da partícula possa não atingir a superfície do coletor, a colisão ocorre se a distância entre a partícula e o coletor for menor que o raio da partícula [PERRY et al., 1980].

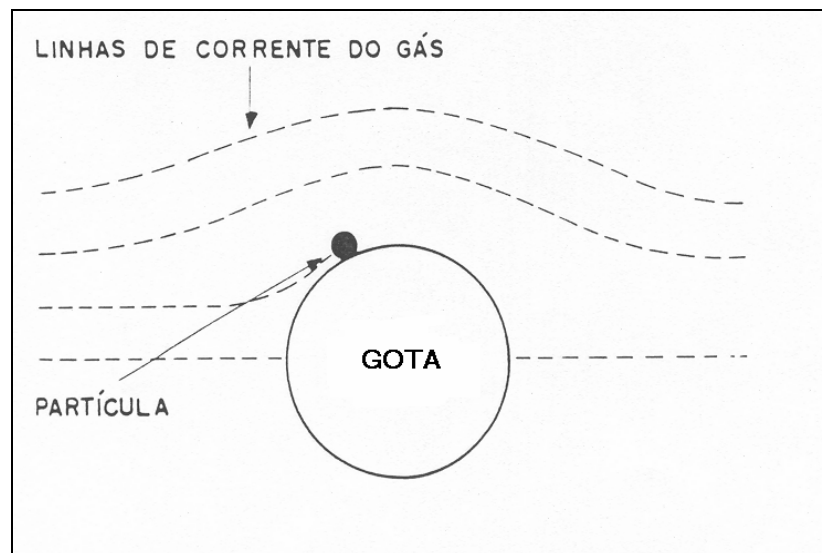


Figura 2.2 - Mecanismo da intercepção [HEUMANN, 1997]

Considera-se normalmente que este mecanismo tem importância para partículas grandes, podendo ser dominante sobre o mecanismo inercial no caso da filtração de líquidos. Existem várias expressões teóricas e empíricas para o cálculo da eficiência de coleta de acordo com este mecanismo. A equação de eficiência de coleta para esse mecanismo, deduzida por Tien (apud COURY, 1986) a partir do modelo da esfera isolada, é dada por:

$$\eta = 1,5 \left( \frac{d_p}{D_d} \right)^2 \quad (2.4)$$

### 2.2.3 Difusão

As partículas extremamente pequenas são principalmente removidas de uma corrente gasosa pelo mecanismo da difusão (Figura 2.3), movendo-se de uma zona de alta concentração para uma zona de baixa concentração nas proximidades do corpo coletor [HEUMANN, 1997; SCHIFFTNER et al., 1996].

A difusão é em grande parte um efeito do movimento Browniano, que é o movimento irregular em ziguezague de partículas muito pequenas, as quais migram em direção à superfície de coleta, sendo então removidas da corrente gasosa.

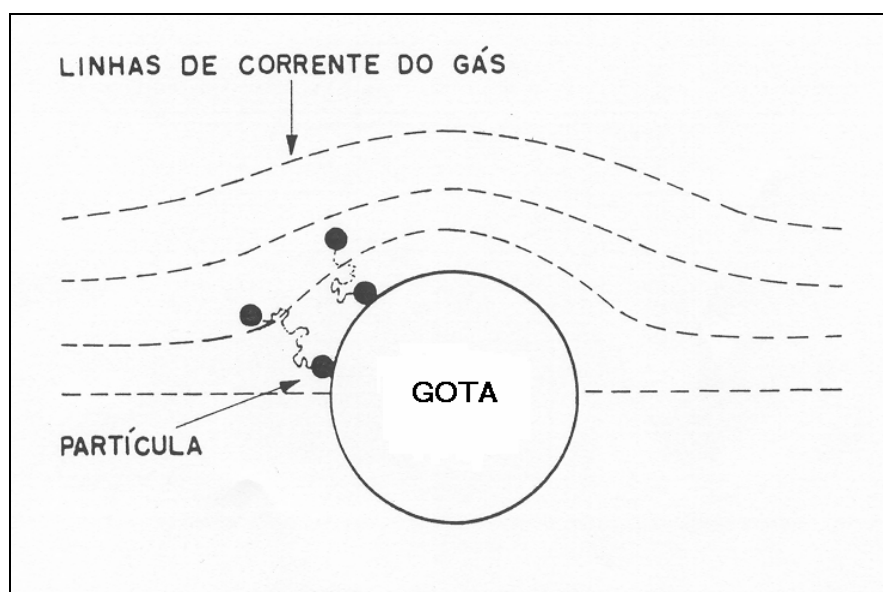


Figura 2.3 - Mecanismo da difusão [HEUMANN, 1997]

O mecanismo da difusão é dominante para partículas submicrômicas e pode ser estudado como um processo de transferência de massa. No caso de escoamento num meio de porosidade  $\varepsilon$ , a equação semi-empírica de Wilson e Geankoplis (apud COURRY, 1986) se aplica:

$$\eta = \frac{4,36}{\varepsilon} \left( \frac{V_G \cdot D_d}{D} \right)^{-2/3} \quad (2.5)$$

onde  $D$  = coeficiente de Difusividade associado ao movimento Browniano que é dado por:

$$D = \frac{K_B \cdot T \cdot C}{3 \cdot \pi \cdot \mu_G \cdot d_p} \quad (2.6)$$

onde  $K_B$  é a constante de Boltzmann e  $T$  a temperatura do gás.

## 2.3 Tipos de Lavadores

Há uma grande variedade de diferentes tipos de lavadores em uso, sendo que o melhor critério de classificação é o mecanismo utilizado na separação. Industrialmente encontramos separadores úmidos gravitacionais, inerciais, centrífugos, dinâmicos, de orifício, de condensação e Venturi [GOMIDE, 1980].

### 2.3.1 Lavador Venturi

O desenvolvimento do lavador Venturi resultou da necessidade de separar, por um custo moderado, partículas extremamente finas presentes nos gases de exaustão industriais [HALLER, 1989].

A configuração típica de um lavador Venturi é apresentada na Figura 2.4, a qual inclui uma seção convergente, uma garganta e uma seção divergente ou difusor. Dois tipos alternativos de lavador Venturi são comumente utilizados, sendo que no primeiro tipo o líquido é introduzido ao longo das paredes do lavador como um filme.



No segundo tipo o líquido é injetado através de bocais na forma de um jato perpendicular à corrente gasosa, ou seja, na direção radial.

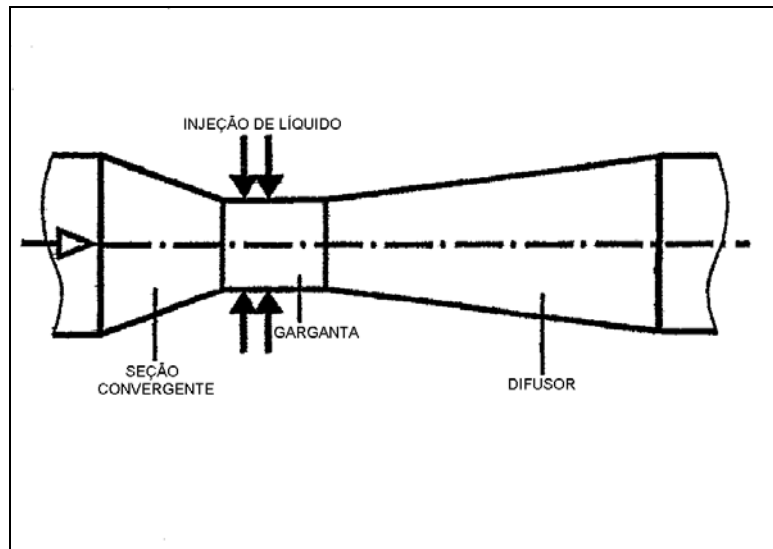


Figura 2.4 – Configuração típica do lavador Venturi [MAYINGER et al., 1995]

Em ambos equipamentos, uma corrente gasosa contendo material particulado é alimentada no lavador e, em seguida, é acelerada na seção convergente até a velocidade máxima na garganta [TIGGES et al., 1984]. Os lavadores Venturi operam com velocidades na garganta tipicamente entre 150 e 800 ft/s [PERRY et al., 1980]. Na garganta do lavador ocorre a colisão entre o gás em alta velocidade e o líquido, sendo este último atomizado em um grande número de pequenas gotas, as quais atuam como coletores de partículas [LIPTÁK, 1974]. Na seção divergente (difusor) do lavador ocorre a desaceleração do gás, com a conseqüente recuperação de energia na forma de queda de pressão. Uma vez que o material particulado é coletado nas gotas líquidas, este pode então ser facilmente removido por um separador centrífugo, como por exemplo um ciclone [ANANTHANARAYANAN et al., 1999].

A coleta de partículas em lavadores Venturi é influenciada principalmente pelo mecanismo da impactação inercial, com a difusão somente sendo importante para partículas menores que  $0,3 \mu\text{m}$  [ALLEN, 1996].

Energia na forma de queda de pressão é requerida para realizar a operação do lavador, sendo que alguns autores correlacionam a queda de pressão com a

eficiência de coleta. Verifica-se que, quanto maior a queda de pressão, maior a eficiência de coleta de partículas submicrônicas em uma corrente gasosa [LIPTÁK, 1974].

O termo queda de pressão se refere à diferença de pressão do gás na entrada e saída do lavador Venturi. A Figura 2.5 ilustra um perfil de pressão típico de um lavador Venturi. Como o gás é acelerado na seção convergente, a pressão na corrente gasosa decresce até o seu menor valor na garganta, sendo que o gás começa então a desacelerar na seção divergente, onde a pressão começa a aumentar e atinge um valor somente um pouco menor que o da entrada [GONÇALVES, 2000].

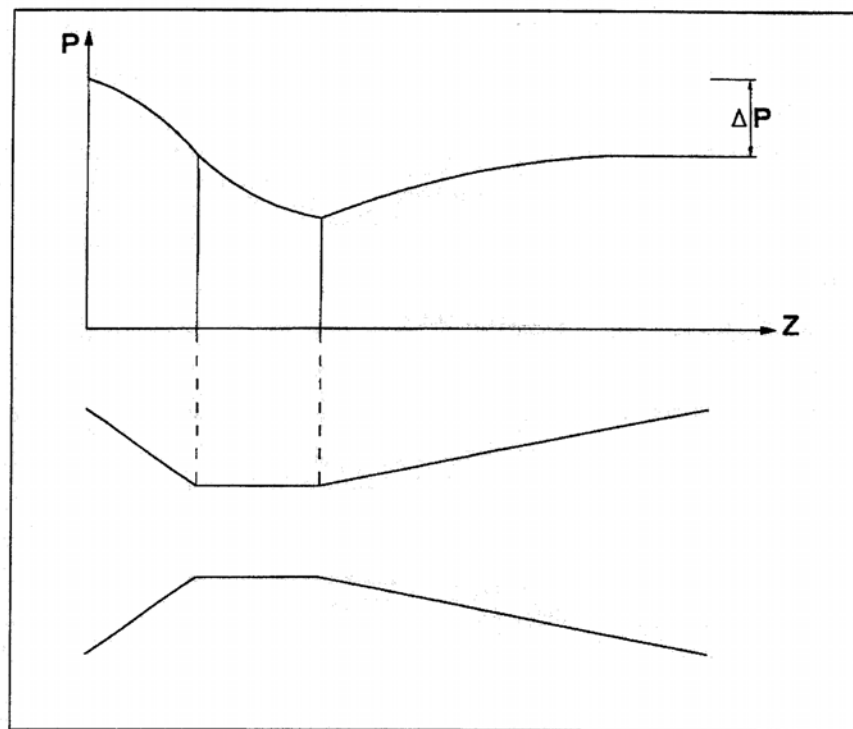


Figura 2.5 - Variação da pressão do gás ao longo de um lavador Venturi [GONÇALVES, 2000]

## **2.4 Artigos Experimentais com Lavadores Venturi**

Como o trabalho desta tese de doutorado é essencialmente experimental realizou-se uma pesquisa especificamente nos artigos experimentais com lavadores Venturi publicados na literatura científica visando-se obter uma descrição das metodologias e equipamentos utilizados até o presente.

### **2.4.1 Experiments on an industrial Venturi scrubber (BRINK e CONTANT, 1958)**

No presente trabalho um lavador Venturi Pease-Anthony instalado em uma planta de ácido fosfórico foi estudado para que se pudesse obter as condições ótimas de operação.

O lavador Venturi apresentava uma seção transversal retangular, com uma garganta de 6 x 34 in e uma seção reta de 12 in de comprimento. O ângulo da seção convergente era de 25° e a seção divergente teve um ângulo de 2,2°. O lavador Venturi foi seguido por um ciclone projetado para remover o líquido atomizado do Venturi.

O líquido foi introduzido dentro da corrente gasosa através de dois jatos de spray horizontal, cada um com 45 orifícios em duas filas localizadas a  $\frac{3}{4}$  in uma da outra. A linha central da primeira fila estava localizada a  $3\frac{3}{4}$  in do início da seção reta de 12 in. Uma fila de cada jato de spray tinha 23 orifícios e a outra fila tinha 22 orifícios nas distâncias centrais de  $1\frac{1}{2}$  in. Os orifícios da segunda fila estavam no meio do caminho entre aqueles da primeira fila.

As amostras foram coletadas com um sistema contendo uma sonda de amostragem seguida por três fibras de amianto. As sondas de amostragem foram feitas nas dimensões para uma amostragem isocinética. O fluxo de gás foi determinado com um medidor de gás seco. Após cada teste as fibras de amianto e a sonda de amostragem foram limpas com água e o pentóxido de fósforo foi determinado na solução resultante por um procedimento de titulação por precipitação com molibdato de amônio.

A distribuição de tamanho de partícula foi determinada com um impactor cascata de alta velocidade projetado para amostragem adiabática. O impactor tinha cinco estágios, sendo precedido por um ciclone de vidro e seguido por dois filtros de lã de vidro.

### **2.4.2 Venturi scrubber performance (CALVERT et al., 1972b)**

O objetivo deste trabalho foi estudar a eficiência de coleta de partículas em lavadores Venturi levando em consideração os efeitos do tamanho e umidade da partícula, tamanho do Venturi e razão líquido/gás.

Na presente investigação dois lavadores Venturi foram utilizados. Um foi uma unidade em escala laboratorial com uma garganta de 2 in de diâmetro por 1 in de comprimento e com um difusor de 12 in de comprimento e 4 in de diâmetro. O outro foi um Venturi retangular com uma garganta de 4 x 12 in. O Venturi maior tinha um comprimento de garganta de 4 in e um difusor de 32 in de comprimento. Esses dois sistemas foram utilizados para analisar o efeito dos vários parâmetros estudados.

As partículas foram geradas por um atomizador de prato rotatório ou um atomizador de jato de ar tipo colisão, com 12 orifícios. Enquanto o disco rotatório forneceu partículas monodispersas, o atomizador de colisão forneceu a alta carga requerida, onde o método analítico não foi sensível o suficiente, embora a distribuição de tamanho produzida foi mais ampla.

A eficiência de remoção foi medida pela coleta da amostra de gás por uma bomba de vácuo através de um filtro e um medidor de gás seco. A concentração do aerossol foi determinada pela relação da massa das partículas no filtro com o fluxo de ar através do filtro. Azul de metileno foi extraído do filtro e analisado por um fluorímetro Turner. A distribuição de tamanho foi determinada pelo amostrador Anderson. Os resultados foram confirmados por microscopia com uma precisão dentro de 10%.

### **2.4.3 Particle collection and pressure drop in Venturi scrubbers (BOLL, 1973)**

Neste trabalho um modelo para o desempenho de um lavador Venturi é desenvolvido e comparado com dados experimentais de queda de pressão e eficiência de coleta de partículas.

Este trabalho utilizou os dados experimentais de Güntheroth (1966, apud Boll, 1973), o qual coletou partículas de parafina sólida em um lavador Venturi de 2 in de diâmetro de garganta e com injeção radial de líquido na mesma. As distribuições de

tamanho de partícula foram obtidas antes e após o Venturi por um microscópio eletrônico.

#### **2.4.4 Atomization and cloud behavior in Venturi scrubbing (HESKETH, 1973)**

Este trabalho apresenta os resultados de vários estudos relacionados a lavadores Venturi.

Dois lavadores Venturi foram construídos para este estudo, sendo que o lavador menor opera com 600 ft<sup>3</sup>/min de gás e a unidade maior opera com 2000 ft<sup>3</sup>/min.

O sistema de 2000 ft<sup>3</sup>/min, o qual foi instalado em uma caldeira de vapor de 80000 lb/h não esteve em operação o suficiente para fornecer dados confiáveis.

O sistema de 600 ft<sup>3</sup>/min foi semelhante ao sistema construído e testado por Hesketh (1970).

Um lavador Venturi padrão com uma seção convergente de 25° e uma seção divergente de 7° foi utilizado, com uma razão de áreas de 4:1 entre a entrada e a garganta. A entrada e a saída do lavador Venturi são retangulares.

A água foi injetada perpendicularmente na garganta em ambos lados da mesma através de bocais uniformemente espaçados. A unidade de 600 ft<sup>3</sup>/min tinha 6 bocais de 1,6 mm de diâmetro.

#### **2.4.5 On the efficiency of a Venturi scrubber (BEHIE e BEECKMANS, 1973)**

Este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de um lavador Venturi utilizando aerossóis de diferentes tamanhos e variando as velocidades do ar na garganta do equipamento.

No aparato experimental utilizado o ar ambiente foi alimentado ao sistema por meio de um ventilador centrífugo, sendo medido por uma placa de orifício na entrada do ventilador. As linhas de distribuição de ar asseguraram que o ar entrando no sistema foi bem distribuído através do duto de 4 in. Aerossóis monodispersos foram obtidos por um gerador de prato rotatório. As soluções geradas consistiram de uranine e azul de metileno (razão em peso de 1:2) em 75% de álcool e 25% de água destilada. Uma seringa foi utilizada para alimentar a solução produzida no gerador de aerossol,

sendo que o gerador puxa o ar do duto de entrada. A seção de teste consistiu de um lavador Venturi de 18,5 in de comprimento com ângulos das seções convergente e divergente de 50° e 14°, respectivamente. A garganta do equipamento era de 3 in de largura por 1 in de profundidade e por 3 in de comprimento, sendo que a água foi alimentada na mesma por uma bomba. O fluxo de água foi controlado por uma válvula e determinado por um medidor de fluxo. A pressão de injeção da água foi medida por um manômetro e a água foi filtrada previamente para sua injeção no sistema. Isto evitou o entupimento dos múltiplos orifícios. A água foi separada do ar por meio de um separador úmido especialmente projetado, sendo que a mesma retornou ao reservatório em um sistema fechado. Para minimizar a evaporação das gotas de água atomizadas dentro do sistema a água foi resfriada por bombeamento de água fria através de serpentinas de resfriamento no reservatório.

O aerossol foi amostrado isocineticamente em dois pontos utilizando bocais de amostragem de 1,1 cm de diâmetro interno. As amostras de aerossol foram coletadas em filtros de fibra de vidro de 47 mm de diâmetro e foram analisadas fluorimetricamente. A sonda de amostragem podia ser ajustada em diferentes posições radiais, permitindo que os perfis de concentração do aerossol pudessem ser obtidos. Os diâmetros do aerossol foram determinados microscopicamente após amostragem nos filtros.

#### **2.4.6 Effects of water injection arrangement on the performance of a Venturi scrubber (BEHIE e BEECKMANS, 1974)**

Neste trabalho estudou-se o efeito de três diferentes arranjos dos sistemas de injeção de líquido no desempenho de um lavador Venturi.

Este trabalho apresenta os resultados obtidos com um lavador Venturi em escala piloto utilizando técnicas experimentais. Três arranjos de injeção de líquido de dois diferentes sistemas múltiplos foram estudados para velocidades na garganta na faixa de 23,4 a 49,7 m/s. Em cada caso utilizou-se partículas de azul de metileno e uranine monodispersas, tendo diâmetros de 0,8; 1,6; 2,9 e 5 $\mu$  e densidade de 1,42 g/cm<sup>3</sup>.

O aparato experimental consistiu de um lavador Venturi seguido por um separador ciclônico. As partículas de aerossol foram obtidas por um gerador de prato

rotatório e passaram em um tubo de 20 cm de diâmetro e 1,5 m de comprimento, sendo que a amostragem foi isocinética na saída do tubo e antes da entrada do lavador. Nos testes realizados para medir a eficiência do lavador o aerossol foi introduzido na corrente do equipamento. A seção de teste de 127 cm de comprimento tinha as dimensões da garganta de 19 cm de largura por 6,45 cm de profundidade e 7,62 cm de comprimento. O ângulo da seção convergente foi de 25 ° enquanto que o ângulo do difusor foi de 7°.

#### **2.4.7 Comparison of the performance of a single and two-stage variable-throat Venturi scrubber (MUIR e MIHESI, 1979)**

Este artigo apresenta uma investigação teórica dos efeitos da operação de um lavador Venturi de dois estágios, sendo que as predições teóricas são validadas qualitativamente por um trabalho experimental.

Os testes foram realizados em lavadores Venturi de um único estágio e de dois estágios, sendo que dois pós de teste dispersos foram utilizados nestes experimentos. Os Venturis eram de seção transversal retangular. Em ambos Venturis a área da garganta foi variada através de parafusos do lado das paredes do lavador. Um separador ciclônico de projeto padrão foi instalado após o lavador Venturi.

#### **2.4.8 Particle collection by a pilot plant Venturi scrubber downstream from a pilot plant (SPARKS et al., 1981)**

Este trabalho apresenta os resultados dos experimentos realizados em uma planta piloto na coleta de material particulado por um lavador Venturi localizado após um precipitador eletrostático.

Um sistema de um lavador em escala piloto testado em conjunto com um precipitador eletrostático consistiu de um lavador Venturi, um separador e um soprador. O lavador Venturi tinha uma seção transversal cilíndrica com um comprimento de garganta de 25,4 cm. A seção da garganta poderia ser removida e então vários diâmetros da garganta poderiam ser testados. Os testes no sistema precipitador eletrostático-lavador envolveram somente dois diâmetros de garganta: 7,62 e 10,16 cm. A água foi

alimentada tangencialmente em dois pontos na parte de cima do lavador, sendo que o fluxo de água podia ser variado até um máximo de  $6,43 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$ . O fluxo mássico de gás foi de aproximadamente  $28 \text{ m}^3/\text{min}$ .

Após o lavador Venturi a corrente gasosa entrou em um separador ciclônico, o qual tinha um diâmetro de 50,8 cm e 1,22 m de altura. O gás entrou no separador pelo fundo e saiu tangencialmente pela parte de cima.

O gás moveu-se através do sistema por um soprador com um motor de 15hp. A instalação do lavador na saída do precipitador eletrostático envolveu a remoção de uma seção de 3 m do duto do precipitador e passagem da corrente gasosa através do lavador e retorno para o duto original de exaustão do precipitador eletrostático. Uma seção de transição foi adicionada no duto do precipitador para reduzir o diâmetro de 30,48 para 15,24 cm para acomodar o lavador.

Um duto flexível foi utilizado para conectar a seção de transição ao lavador. O gás foi exaurido do separador através de um duto de 15,24 cm do ventilador e através do duto flexível de 30,48 cm de diâmetro para conectar o ventilador ao precipitador eletrostático original.

Válvulas de pressão foram adicionadas ao duto na entrada do lavador, entre o lavador e o separador e na saída do separador. As válvulas de pressão permitiram a medição da queda de pressão no lavador e separador.

O precipitador eletrostático utilizado para o experimento foi descrito por Lawless et al. (1979).

O gerador de aerossol forneceu cinza leve por um alimentador vibratório. Um ciclone foi colocado na linha do gerador para remover partículas grandes, sendo que experiências prévias mostraram que este gerador de aerossol foi estável. A curva de distribuição de tamanho de partícula foi lognormal, com um diâmetro mássico médio de aproximadamente  $5,5 \mu\text{m}$  e desvio padrão de 2,3 quando o ciclone foi utilizado.

Todas as medições de distribuição de tamanho de partícula foram feitas com impactores cascata.



#### **2.4.9 Particle collection efficiency in a Venturi scrubber: comparison of experiments with theory (RUDNICK et al., 1986)**

O objetivo do presente trabalho foi obter dados de desempenho de lavadores Venturi para uma ampla faixa de condições de operação e comparar estes dados com as predições de eficiência de coleta para lavadores Venturi de vários importantes modelos.

Três lavadores Venturis foram utilizados neste estudo, cada um tendo uma seção transversal com diâmetros de 127 mm na entrada e saída e sendo construídos em acrílico transparente.

O Venturi de garganta pequena tinha uma seção convergente de 251 mm de comprimento, uma garganta com diâmetro e comprimento de 32 mm e uma seção divergente de 556 mm de comprimento; o Venturi de garganta média tinha uma seção convergente de 203 mm de comprimento, uma garganta de 54 mm de diâmetro e 51 mm comprimento e uma seção divergente de 435 mm de comprimento; o Venturi de garganta grande tinha uma seção convergente de 138 mm de comprimento, uma garganta com diâmetro e comprimento de 76 mm e uma seção divergente de 305 mm de comprimento. Estes Venturis foram orientados para que o fluxo de ar fosse direcionado para baixo.

Foi controlada a umidade do fluxo de ar e determinou-se a queda de pressão através de um disco Stairmand, sendo que o ar de entrada foi filtrado para remover-se todas as partículas. O aerossol de teste, introduzido na corrente de saída do filtro de ar, foi gerado de um óleo Wesson, um óleo comercial de cozinha com uma densidade de  $0,92 \text{ g/cm}^3$ , utilizando um nebulizador pneumático mantido na pressão de entrada de 30 kPa.

Água destilada foi utilizada como líquido no lavador, sendo filtrada através de uma membrana Milipore de  $0,2 \text{ }\mu\text{m}$  e um filtro de fibra de vidro MAS 1106BH em série. O fluxo de água foi medido com rotâmetro e controlado com uma válvula. A água foi introduzida no lavador de quatro maneiras: (1) água foi introduzida 20,9 mm acima da entrada da seção convergente através de uma fenda circunferencial de 0,6 mm de largura na parede do duto; (2) água foi introduzida para baixo na parede a 15 mm acima da entrada da seção convergente através de uma abertura anular de 1 mm

de largura; (3) água foi introduzida para baixo na entrada da seção convergente através de uma abertura concêntrica de 14,2 mm de diâmetro e (4) água foi introduzida para baixo na entrada da seção convergente através de 12 aberturas de 4,8 mm de diâmetro arranjados para se obter uma distribuição radialmente uniforme de água.

Um ciclone de acrílico transparente de 305 mm de diâmetro e 1,22 m de altura foi utilizado como separador centrífugo. A água foi descarregada paralelamente ao eixo do ciclone a partir de uma abertura de 64 mm de diâmetro na parte de baixo do ciclone, com o ar saindo pela parte de cima do ciclone através de um duto de 127 mm de diâmetro.

A queda de pressão no lavador Venturi foi medida com um manômetro.

As amostras do aerossol foram coletadas isocineticamente através de sondas de 7,5 mm de diâmetro interno. Para obter-se amostras representativas as sondas foram alinhadas com o eixo do duto e as entradas da sonda estavam localizadas a pelo menos 7 diâmetros das interferências na corrente. Cinco amostras foram coletadas seqüencialmente para cada corrida experimental. As partículas de aerossol foram contadas e medidas dentro de 23 intervalos de tamanho com um espectrofotômetro óptico de aerossol, abrangendo uma faixa de diâmetros de 0,32 a 2,8  $\mu\text{m}$ .

#### **2.4.10 Operating results and aerosol deposition of a venturi scrubber in self-priming operation (MAYINGER e LEHNER, 1995)**

Este trabalho estuda o comportamento e eficiência de coleta de um lavador Venturi.

No aparato de teste o ventilador succionou o ar do ambiente e soprou o mesmo através do equipamento experimental. O fluxo de gás foi medido por uma placa de orifício. O transporte do gás com as minúsculas partículas foi acompanhado pela injeção de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), sendo que esta substância foi utilizada como um aerossol de teste devido aos seus diâmetros de partícula muito pequenos na faixa de 0,1 a 1,4  $\mu\text{m}$ . O diâmetro médio de partícula foi de 0,8 $\mu\text{m}$ .

O líquido foi injetado em vários planos através de bocais cilíndricos na garganta do Venturi, os quais estavam localizados perpendicularmente à corrente gasosa. A garganta do Venturi era retangular para atingir uma distribuição uniforme do

líquido em toda seção transversal. O líquido foi injetado devido a uma diferença de pressão  $\Delta P$  entre o exterior e o interior da garganta do Venturi surgindo da pressão hidrostática do líquido e da pressão estática do gás. A água foi suprida a partir de um tanque elevado, sendo que a pressão hidrostática poderia ser variada usando diferentes níveis no tanque. O fluxo de água foi determinado por meio de um medidor de fluxo magnético.

Para medição da distribuição das partículas e avaliação da eficiência fracionária de coleta utilizou-se um impactor de baixa pressão, no qual um fluxo isocinético foi aspirado por meio de um equipamento de amostragem.

#### **2.4.11 Estudo do desempenho de um lavador de gases tipo Venturi para remoção de partículas na faixa respirável (OLIVEIRA, 1995)**

Com o objetivo de analisar a eficiência na remoção de partículas na faixa respirável, foi projetado um lavador Venturi para tratamento de uma vazão de ar de  $0,056 \text{ m}^3/\text{s}$ , para um diâmetro aerodinâmico de corte de  $0,9 \text{ }\mu\text{m}$ . Isso resultou num Venturi com uma garganta fixa de  $8,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  de área e comprimento total de  $1,5 \text{ m}$ . Tal equipamento foi testado em laboratório, trabalhando na remoção de partículas sólidas variando-se a quantidade de líquido injetado ( $5 \cdot 10^{-6}$  a  $55 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ) na garganta do Venturi e o comprimento da garganta do Venturi ( $L_G = 0,023, 0,063$  e  $0,096 \text{ m}$ ), mantendo-se constante a vazão mássica de pó de  $0,0476 \text{ g/s}$ . Utilizou-se como material particulado o concentrado fosfático de Patos de Minas – MG de densidade  $2730 \text{ Kg/m}^3$  e diâmetro óptico médio de partícula  $4,2 \text{ }\mu\text{m}$ . Como líquido para captura das partículas, utilizou-se água a temperatura ambiente.

Para o cálculo da eficiência foi analisada a concentração de pó na saída do gás do lavador com o auxílio de um contador óptico de partículas, onde pode-se avaliar a eficiência por faixa de diâmetro óptico.

#### **2.4.12 Prediction of Venturi scrubber grade efficiency curves using the contacting power law (ALLEN, 1996)**

Este artigo apresenta as medições de eficiência fracionária de coleta realizadas em um lavador Venturi de uma planta piloto.

O programa experimental foi desenvolvido em um equipamento de teste de planta piloto de 2 m<sup>3</sup>/s. A eficiência do lavador Venturi como uma função do tamanho de partícula foi avaliada em relação aos seguintes parâmetros operacionais:

- queda de pressão global
- fluxo de gás e velocidade na garganta
- geometria do Venturi
- tipo de pó.

Duas geometrias do lavador Venturi foram testadas: uma unidade industrial prismática e um projeto de garganta longo com uma razão de comprimentos de 1,3:1. As medidas de eficiência fracionária foram realizadas pela dispersão de um pó pré-caracterizado, mantendo-se uma taxa controlada no duto de entrada, e medição da fração que penetrou o lavador pela amostragem extrativa no duto de saída, utilizando-se um impactor cascata Andersen MkIII. Duas classes de óxido de silício pulverizado foram utilizadas nos testes. Estes são designados tipo A e B e tem uma distribuição de tamanho em massa menor que 5 e 15 µm, respectivamente. Estas distribuições de tamanho foram medidas por sedimentação. O ar foi pré-ionizado usando fontes de polônio radioativo para reduzir qualquer carga estática induzida nas partículas por esta técnica de dispersão. O grau de dispersão foi testado de duas maneiras. Em primeiro lugar as amostras extraídas usando um mini-lavador foram reanalisadas por sedimentação. Em segundo lugar as medições de distribuição de tamanho foram feitas pela amostragem no duto de entrada com o impactor cascata. A concordância dos resultados indica que ambas técnicas podem ser utilizadas.

A amostragem isocinética foi utilizada em todos os experimentos com tamanhos de bocais diferentes, sendo utilizados onde é necessário manter uma taxa de amostragem requerida no impactor de 15 a 20 l/min. A taxa de alimentação de pó foi ajustada para cada medição para dar um peso coletado de aproximadamente 10 mg em um período de amostragem de 2 minutos. Um único filtro de fibra de vidro Whatman foi

utilizado como um coletor, sendo que a pesagem foi realizada em uma balança de precisão.

As medidas de eficiência foram realizadas em ambos lavadores Venturi com as duas classes de pó, sendo que as condições investigadas foram: velocidade na garganta (67 a 103 m/s), razão líquido/gás (0,36 a 1,15 l/m<sup>3</sup>) e queda de pressão global (270 a 840 mm de água).

#### **2.4.13 Aspectos da modelagem matemática de lavadores Venturi (GONÇALVES, 2000)**

Os experimentos foram realizados em dois lavadores Venturi em escala de laboratório, um de seção transversal circular, e outro retangular. As velocidade de gás na garganta variaram de 50 a 90 m/s, e as razões entre as vazões volumétricas de líquido e gás variaram entre 0,075 e 2,0 l/m<sup>3</sup>.

- A trajetória e a atomização de um jato transversal foram estudados através de imagens fotográficas e uma nova descrição matemática destes fenômenos é apresentada.
- A evolução da distribuição do tamanho das gotas ao longo do lavador Venturi, para a injeção de líquido tanto na forma de jatos quanto na forma de filme, foi estudada experimentalmente, através da técnica da difração de raios laser, e os principais modelos que tem sido utilizados para descrever este fenômeno foram avaliados à luz dos resultados. Uma descrição alternativa é proposta.
- A distribuição da concentração de gotas na garganta de um lavador Venturi com injeção através de um único jato foi medida experimentalmente através de amostragem isocinética. O modelo de FATHIKALAJAHI *et al.* (1995) para descrever este fenômeno foi avaliado à luz dos resultados, e um novo modelo, que leva em conta a trajetória, o momento, e o processo gradual de perda de massa do jato é apresentado.
- A fração de líquido escoando na forma de filme para dois lavadores Venturi com injeção na forma de jatos foi medida experimentalmente. Os modelos disponíveis para estimar esta fração foram avaliados, e uma nova correlação é proposta.

#### **2.4.14 Eficiência de coleta de partículas em lavadores Venturi (MARTINS COSTA, 2002)**

Com o objetivo de avaliar o comportamento de um lavador Venturi de seção retangular atuando na coleta de partículas finas dispersas em corrente gasosa, testes experimentais de eficiência de coleta foram realizados. Eficiências de coleta foram obtidas variando-se o diâmetro médio de partícula de 5,8  $\mu\text{m}$  a 28  $\mu\text{m}$ , razões de líquido/gás (L/G) de 0,07, 0,17 e 0,27  $\text{l/m}^3$ , e velocidades do gás na garganta ( $V_G$ ) de 58,33, 66,6 e 74,6 m/s, para três diferentes comprimentos de garganta ( $L_G = 0,063, 0,09$  e 0,140 m).

Alguns dos principais fenômenos que afetam a eficiência de coleta de um lavador Venturi foram também estudados experimentalmente, tais como a penetração do jato, a fração do líquido atomizado que se deposita como filme na parede, a dispersão das gotas, o tamanho e a evolução das gotas ao longo da garganta do Venturi.

### **2.5 Modelagem de Lavadores Venturi**

A modelagem de lavadores Venturi apresenta como principais objetivos:

- Explicar os mecanismos que operam nos lavadores Venturi;
- Predizer a queda de pressão e a eficiência de coleta como uma função das condições operacionais e de projeto do Venturi;
- Otimizar o lavador pela estimativa dos parâmetros operacionais requeridos para se obter a menor queda de pressão em uma dada eficiência de coleta [ALLEN, 1996].

#### **2.5.1 Equação de Penetração do Jato**

A penetração do jato na garganta do lavador Venturi é determinada teoricamente pela equação desenvolvida por Viswanathan et al. em 1983 (apud GONÇALVES, 2000), mostrada pela Equação (2.7)

$$l^* = \frac{0,1145 \cdot \rho_L \cdot V_j \cdot d_o}{\rho_G \cdot V_G} \quad (2.7)$$

em que  $l^*$  é a penetração do jato,  $d_o$  é o diâmetro do orifício,  $\rho_g$  é a densidade do gás e  $V_j$  a velocidade do jato calculado pela expressão

$$V_j = \frac{Q_l}{A_o} = \frac{Q_l}{\frac{\pi \cdot d_o^2}{4} \cdot N_o} \quad (2.8)$$

onde  $N_o$  é o número de orifícios.

## 2.5.2 Modelos de Eficiência de Coleta

A eficiência de coleta de partículas em um lavador Venturi é uma função complexa de inúmeras variáveis, incluindo o tamanho da partícula, a razão líquido/gás, a velocidade do gás na garganta, a penetração do jato, a distribuição do tamanho das gotas, a dispersão das gotas líquidas na garganta, as taxas de filme líquido e a configuração geométrica do lavador [ANANTHANARAYANAN, 1998; JONES, 1949].

Uma grande quantidade de trabalhos teóricos, empíricos e semi-empíricos, foram publicados com o intuito de prever a eficiência de coleta de lavadores Venturi [GONÇALVES, 2000]. São descritas a seguir as três correlações clássicas (JOHNSTONE et al., 1954; CALVERT et al., 1972; LEITH & COOPER, 1980), que tem sido largamente utilizadas.

### 2.5.2.1 Modelo de Johnstone et al. (1954)

Uma correlação simples e a mais antiga utilizada para prever a eficiência de coleta em um lavador Venturi foi proposta por JOHNSTONE et al. (1954):

$$\eta = \exp\left(-K \cdot \frac{Q_L}{Q_G} \cdot \sqrt{\psi}\right) \quad (2.9)$$

onde:

K = fator empírico de Johnstone (valor usualmente entre 13 e 27)

### 2.5.2.2 Modelo de Calvert et al. (1972)

Uma outra correlação utilizada para estimar a eficiência de coleta ( $\eta$ ) em um lavador Venturi foi proposta por CALVERT et al. (1972), sendo representada por:

$$\eta = 1 - \exp\left[\frac{2 \cdot Q_L \cdot V_G \cdot \rho_L \cdot D}{55 \cdot Q_G \cdot \mu_G} F(\psi, f)\right] \quad (2.10)$$

onde:

f = fator empírico ( valor usualmente entre 0,1 e 0,5).

sendo que o fator F é representado por:

$$F = \frac{1}{2 \cdot \psi} \left[ -0,7 - 2 \cdot \psi \cdot f + 1,4 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot \psi \cdot f + 0,7}{0,7}\right) + \left(\frac{0,49}{0,7 + 2 \cdot \psi \cdot f}\right) \right] \quad (2.11)$$

### 2.5.2.3 Modelo de Leith e Cooper (1980)

Leith e Cooper (1980) propuseram uma equação para avaliar a performance de um lavador Venturi, sendo representada por:

$$\eta = 1 - \exp\left[-0,124 \cdot \left(\frac{f^2}{\beta}\right) \cdot N_p\right] \quad (2.12)$$



onde  $f$  é o fator empírico utilizado por Calvert para a avaliação da performance do lavador Venturi,  $\beta$  é o fator de correção para  $\Delta P$  e  $N_p$  é dado por:

$$N_p = \frac{C \cdot \rho_p \cdot (d_p)^2 \cdot \Delta P}{18 \cdot (\mu_G)^2} \quad (2.13)$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Material Particulado

Como material particulado a ser removido de uma corrente gasosa através do lavador Venturi utilizou-se um concentrado fosfático de Patos de Minas na vazão mássica de 0,0526 g/s. A densidade deste material foi obtida por um picnômetro de Hélio modelo micromeritics accupyc 1330 e o valor resultante foi de 2900 Kg/m<sup>3</sup>.

O material particulado foi mantido em uma estufa com o objetivo de mantê-lo seco antes de sua dispersão na corrente gasosa para que as partículas fossem alimentadas com a menor umidade possível.

A distribuição de tamanho de partícula do concentrado fosfático foi obtida utilizando-se o equipamento Malvern Mastersizer, cujo resultado da análise é apresentado na Tabela 3.1 e na Figura 3.1 onde verifica-se um diâmetro médio de aproximadamente 3,7 µm.

Tabela 3.1 - Distribuição de tamanho de partícula do concentrado fosfático

Faixa de diâmetros (µm)	Diâmetro médio (µm)	Fração mássica (%)
0,05 – 0,11	0,08	0,16
0,11 – 0,23	0,17	4,14
0,23 – 0,49	0,36	13,97
0,49 – 1,06	0,77	10,49
1,06 – 2,28	1,67	10,28
2,28 – 4,88	3,58	10,35
4,88 – 10,48	7,68	12,99
10,48 – 22,49	16,48	17,27
22,49 – 48,27	35,38	16,24
48,27 – 103,58	75,92	3,69
103,58 – 222,28	162,93	0,41

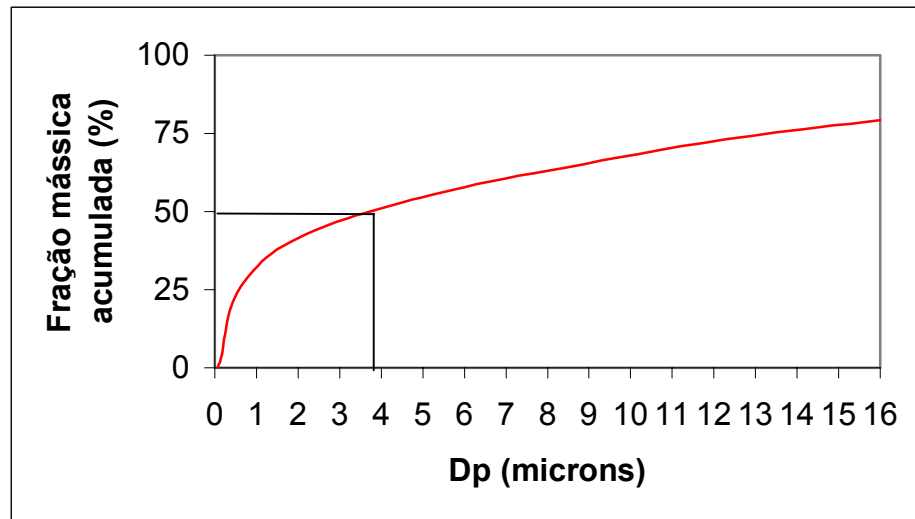


Figura 3.1 – Distribuição de tamanho de partícula do concentrado fosfático

### 3.2 Líquido de Limpeza

O líquido utilizado para remover o material particulado da corrente gasosa foi a água à temperatura ambiente.

### 3.3 Aparato Experimental

O sistema experimental utilizado neste trabalho apresenta um lavador Venturi de geometria retangular (Figura 3.2) operando horizontalmente e com injeção de líquido através de 1 a 5 orifícios de 1 mm de diâmetro distribuídos na garganta do Venturi, os quais são detalhados na Figura 3.3. Estes orifícios podiam ser utilizados individual ou simultaneamente.

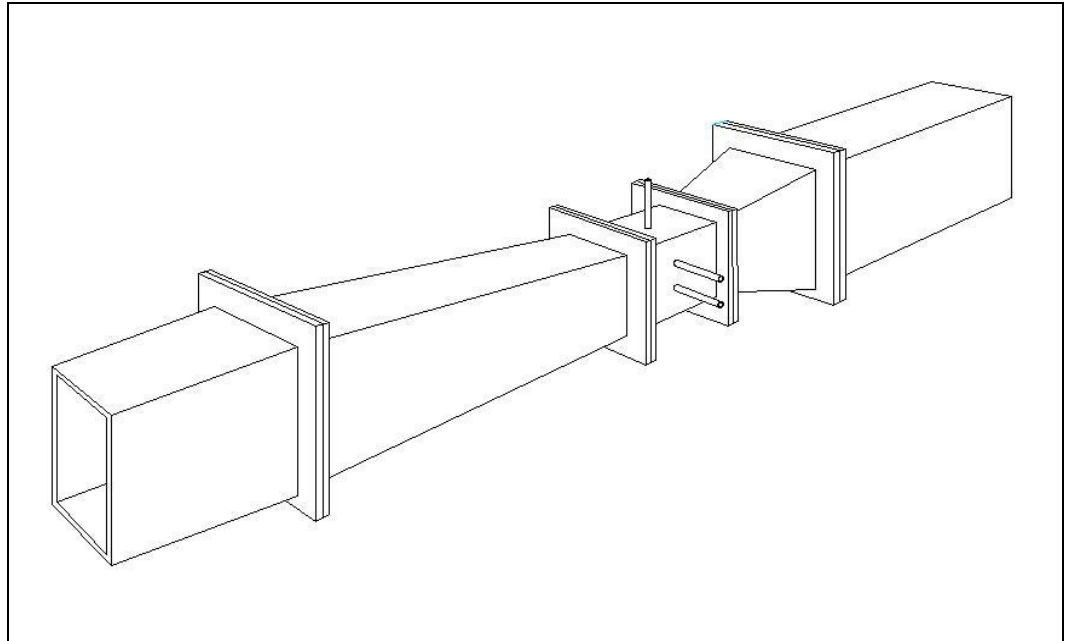


Figura 3.2 – Lavador Venturi de geometria retangular

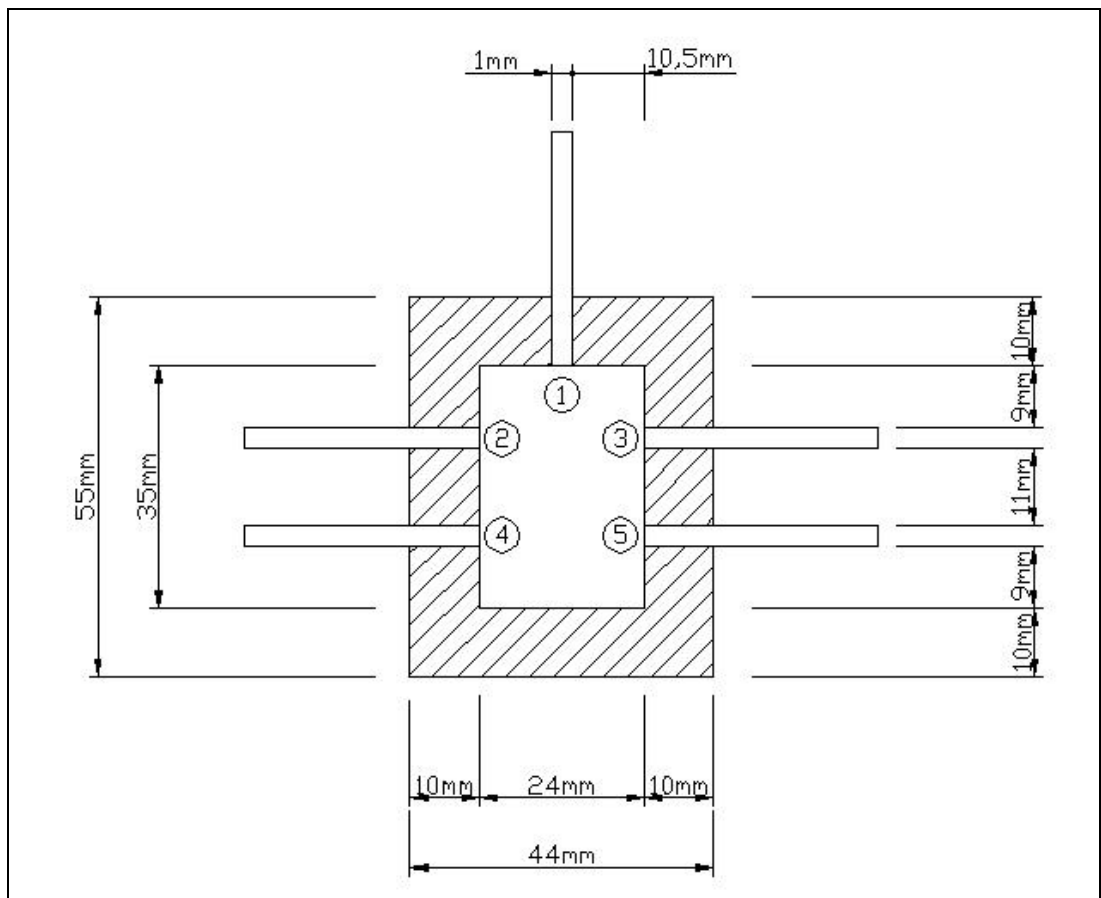


Figura 3.3 – Vista esquemática da posição dos orifícios

A Tabela 3.2 apresenta as configurações de orifícios utilizadas nos testes.

Tabela 3.2 – Configurações de orifícios utilizadas nos testes

Número de orifícios ativos	Orifícios em funcionamento (vide Fig.3.2)
1	1
3	1, 2 e 3 Config. 1
5	1, 4 e 5 Config. 2
5	1 a 5

A Tabela 3.3 apresenta as dimensões do lavador Venturi estudado neste trabalho.

Tabela 3.3 - Dimensões do lavador Venturi de geometria retangular

<b>Grandeza</b>	<b>Valor</b>
Altura de todas as peças	35 mm
Largura na entrada e saída do equipamento	64 mm
Largura da garganta	24 mm
Comprimento da seção convergente	99 mm
Comprimento da garganta	65 - 125 - 185 mm
Comprimento da seção divergente	280 mm
Meio ângulo convergente	11,4 °
Meio ângulo divergente	4,1°

O sistema experimental utilizado apresenta, além do lavador Venturi, uma série de equipamentos periféricos, como o soprador, o gerador de pó e o separador centrífugo, os quais são ilustrados na Figura 3.4.

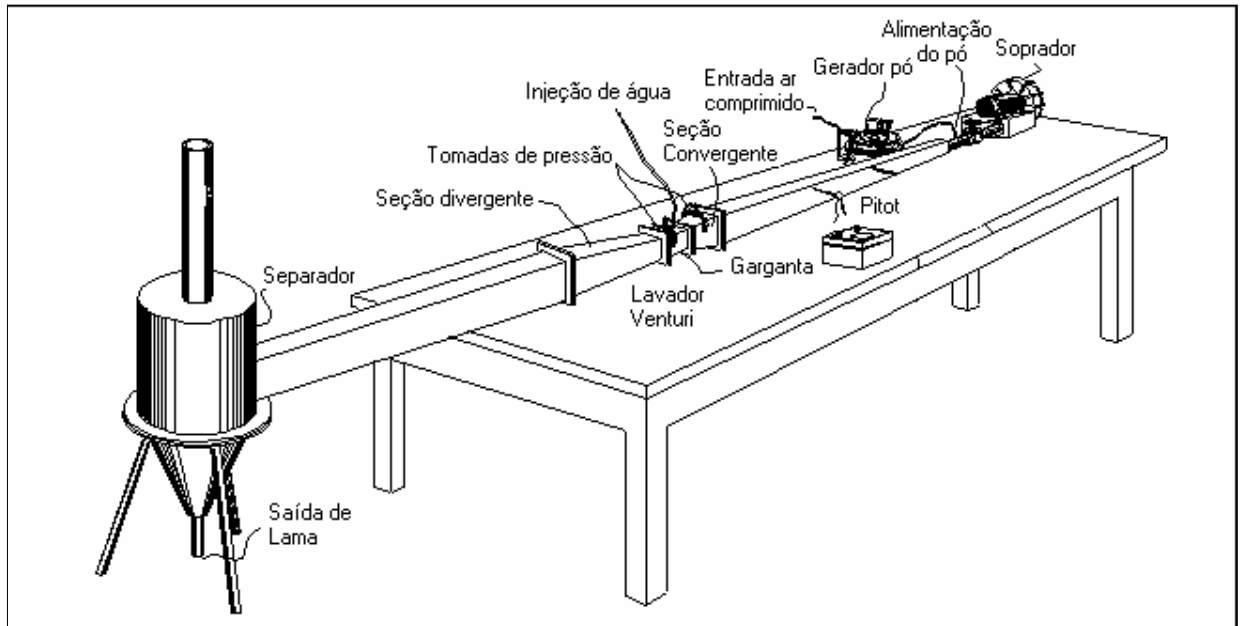


Figura 3.4 - Esquema do sistema experimental

O soprador radial modelo Cr-6 possui uma potência nominal de 6 HP e opera com vazões entre 0,008 e 0,167 m<sup>3</sup>/s.

A vazão de ar foi medida utilizando um tubo de Pitot acoplado a um micromanômetro digital modelo FCO 14, sendo que as vazões de ar foram ajustadas e mantidas constantes durante os testes.

A injeção de líquido na garganta do Venturi foi efetuada por uma bomba helicoidal tipo MS, injetando a água por meio dos orifícios de 1 mm de diâmetro.

As vazões de água foram medidas por um rotâmetro, cuja calibração encontra-se no Apêndice A.

O separador centrífugo utilizado foi um ciclone, com a coleta de lama pela parte inferior e descarga de gás limpo pela parte superior do equipamento.

A alimentação do material particulado ao lavador Venturi foi realizada utilizando-se um gerador de pó do tipo prato rotatório (calibração no Apêndice B), conforme apresentado na Figura 3.5. Este gerador possui um prato de aço inox, o qual contém um sulco semicircular onde o pó é depositado, sendo impulsionado a girar por um pequeno motor de velocidade variável, permitindo controlar as taxas de alimentação de pó. Neste prato foi fixado um cone de alimentação do pó e neste foi acoplado um vibrador cuja função é evitar o empacotamento do pó a ser disperso. Um aspirador do tipo Venturi succiona o pó contido no sulco semicircular do prato por meio da passagem a alta velocidade de ar comprimido, injetando-o na corrente gerada pelo soprador.

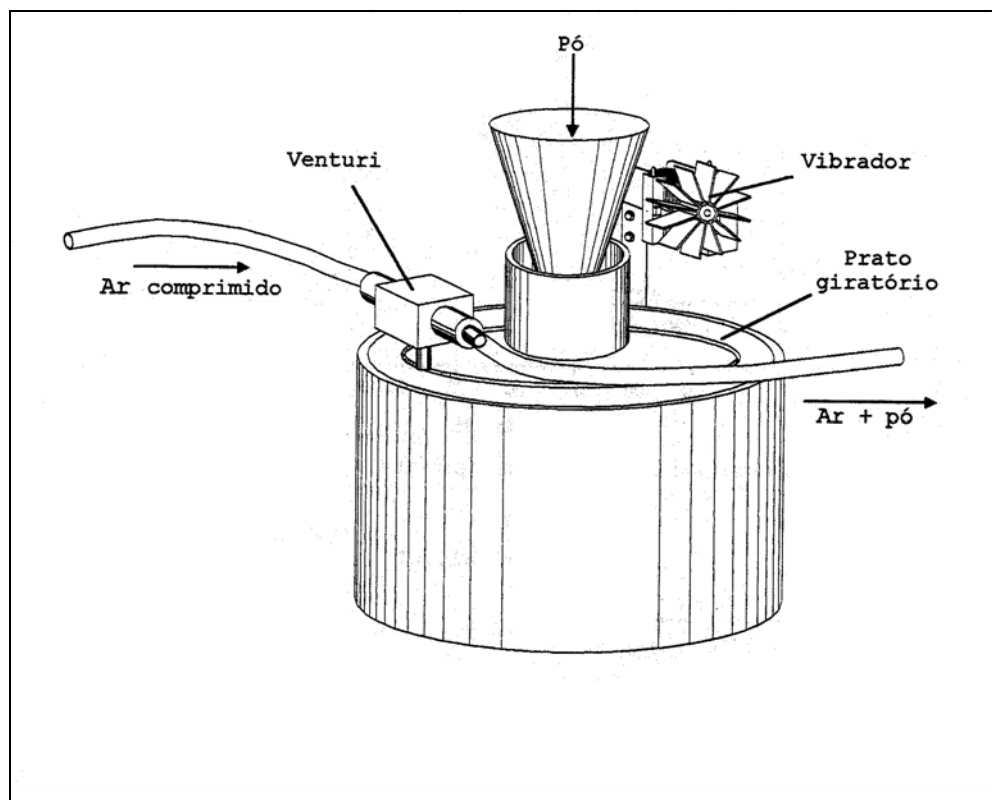


Figura 3.5 - Esquema do gerador de pó do tipo prato rotatório

### 3.4 Procedimento Experimental

Para a realização dos experimentos foi inicialmente gerada uma corrente de ar limpo no interior do equipamento por meio do soprador. A dispersão das partículas do concentrado fosfático foi efetuada com a introdução de uma corrente de ar comprimido, previamente seco, na saída do soprador, contendo concentração conhecida de partículas (calculada pela razão entre a vazão mássica de entrada do pó e a vazão de ar na entrada do equipamento). Esta corrente foi produzida pelo gerador de pó e introduzida ao fluxo de ar do soprador, de forma que as partículas pudessem ser desaglomeradas e homogeneizadas.

A eficiência global de coleta do lavador Venturi ( $\eta_G$ ) em cada teste foi obtida mediante uma análise gravimétrica do pó de entrada e de saída do lavador, sendo calculada pela equação:

$$\eta_G = \left( \frac{\dot{m}_E - \dot{m}_S}{\dot{m}_E} \right) \quad (3.1)$$

onde  $\dot{m}_E$  é a vazão mássica de entrada do material particulado obtida antes do lavador e  $\dot{m}_S$  é a vazão mássica de saída obtida após o separador centrífugo.

A vazão mássica de entrada foi obtida diretamente sabendo-se a rotação do prato de alimentação e a massa de pó contida em cada volta. Para obter-se a massa de pó contida em cada volta retirou-se com um pincel o pó contido no sulco semicircular do prato rotatório e pesou-se o mesmo em um papel previamente tarado.

A vazão mássica de saída foi obtida por diferença entre a vazão mássica de entrada e a vazão mássica de lama. A vazão mássica de lama foi obtida através da coleta em um balde colocado na parte inferior do ciclone de um volume de lama por um tempo de 5 minutos para suavizar as flutuações do sistema, retirando-se desse volume uma alíquota de 100 ml que foi transferida para um béquer e em seguida foi submetida à secagem em uma estufa e posterior pesagem em uma balança com precisão de duas casas decimais.



### 3.5 Planejamento Experimental

Visando-se estudar a influência das variáveis vazão de líquido, comprimento da garganta, número de orifícios e velocidade do gás na garganta na eficiência de coleta de um lavador Venturi, foram realizados dois planejamentos experimentais do tipo completo e os resultados foram tratados no *software* Statistica 99.

A Tabela 3.4 apresenta os fatores que foram estudados e os respectivos níveis para o primeiro planejamento. Neste planejamento foi estudada a influência das variáveis vazão de líquido ( $Q_L$ ), comprimento da garganta ( $L_G$ ) e número de orifícios ( $N_O$ ) na eficiência global de coleta do lavador Venturi ( $\eta_G$ ), mantendo-se constante a velocidade do gás na garganta, com um valor de 69,33 m/s.

Tabela 3.4 - Variáveis e níveis do primeiro planejamento

Variáveis	Níveis		
	-1	0	+1
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	300	600	900
$L_G$ (cm)	6,5	12,5	18,5
$N_O$	1	3	5

Na matriz de planejamento experimental os valores das variáveis são representados de forma codificada, sendo neste caso os níveis -1, 0 e +1.

A Tabela 3.5 apresenta os testes que foram realizados com réplica para o primeiro planejamento.

Tabela 3.5 - Matriz do primeiro planejamento experimental

Teste	Q <sub>L</sub> (cm <sup>3</sup> /min)	L <sub>G</sub> (cm)	N <sub>O</sub>	L/G (l/m <sup>3</sup> )	Penetração Jato (mm)
1	-1	-1	-1	0,085	8,76
2	0	-1	-1	0,171	17,52
3	+1	-1	-1	0,257	26,28
4	-1	0	-1	0,085	8,76
5	0	0	-1	0,171	17,52
6	+1	0	-1	0,257	26,28
7	-1	+1	-1	0,085	8,76
8	0	+1	-1	0,171	17,52
9	+1	+1	-1	0,257	26,28
10	-1	-1	0	0,085	2,92
11	0	-1	0	0,171	5,84
12	+1	-1	0	0,257	8,76
13	-1	0	0	0,085	2,92
14	0	0	0	0,171	5,84
15	+1	0	0	0,257	8,76
16	-1	+1	0	0,085	2,92
17	0	+1	0	0,171	5,84
18	+1	+1	0	0,257	8,76
19	-1	-1	+1	0,085	1,75
20	0	-1	+1	0,171	3,50
21	+1	-1	+1	0,257	5,26
22	-1	0	+1	0,085	1,75
23	0	0	+1	0,171	3,50
24	+1	0	+1	0,257	5,26
25	-1	+1	+1	0,085	1,75
26	0	+1	+1	0,171	3,50
27	+1	+1	+1	0,257	5,26

Os valores de penetração do jato foram calculados utilizando-se a densidade do líquido de  $1000 \text{ Kg/m}^3$ , a densidade do gás de  $1,2 \text{ kg/m}^3$  e o diâmetro do orifício de  $1 \text{ mm}$ , de acordo com a equação (2.7).

O modelo estatístico de segunda ordem para a eficiência de coleta do lavador Venturi, utilizando os dados do primeiro planejamento, considera as variáveis, as possíveis combinações entre elas e mais uma constante  $A_1$  correspondente a média, conforme a equação (3.2) [NETO et al., 2003]:

$$\eta = A_1 + B_1.Q_L + C_1.L_G + D_1.N_O + E_1.Q_L^2 + F_1.L_G^2 + G_1.N_O^2 + H_1.Q_L.L_G + I_1.Q_L.N_O + J_1.L_G.N_O \quad (3.2)$$

Os parâmetros estatísticos deste modelo foram estimados pelo método da regressão não linear. Estes parâmetros serão avaliados com base no nível de significância de 95%.

A Tabela 3.6 apresenta os fatores que foram estudados e os respectivos níveis para o segundo planejamento. Neste planejamento foi estudada a influência da variável velocidade do gás na garganta ( $V_G$ ) e suas interações com a vazão de líquido ( $Q_L$ ) e comprimento da garganta ( $L_G$ ) na eficiência de coleta do lavador Venturi, utilizando-se apenas 1 orifício para injeção do líquido.

Tabela 3.6 - Variáveis e níveis do segundo planejamento

Variáveis	Níveis		
	-1	0	+1
$Q_L$ ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )	300	600	900
$L_G$ (cm)	6,5	12,5	18,5
$V_G$ (m/s)	58,66	64,00	69,33

A Tabela 3.7 apresenta os testes que foram realizados para o segundo planejamento.

Tabela 3.7 - Matriz do segundo planejamento experimental

Teste	$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	$L_G$ (cm)	$V_G$ (m/s)	$L/G$ (l/m <sup>3</sup> )	Penetração Jato (mm)
1	-1	-1	-1	0,1014	10,35
2	0	-1	-1	0,2029	20,71
3	+1	-1	-1	0,3044	31,06
4	-1	-1	0	0,093	9,49
5	0	-1	0	0,186	18,98
6	+1	-1	0	0,279	28,47
7	-1	-1	+1	0,0858	8,76
8	0	-1	+1	0,171	17,52
9	+1	-1	+1	0,257	26,28
10	-1	0	-1	0,1014	10,35
11	0	0	-1	0,2029	20,71
12	+1	0	-1	0,3044	31,06
13	-1	0	0	0,093	9,49
14	0	0	0	0,186	18,98
15	+1	0	0	0,279	28,47
16	-1	0	+1	0,0858	8,76
17	0	0	+1	0,171	17,52
18	+1	0	+1	0,257	26,28
19	-1	+1	-1	0,1014	10,35
20	0	+1	-1	0,2029	20,71
21	+1	+1	-1	0,3044	31,06
22	-1	+1	0	0,093	9,49
23	0	+1	0	0,186	18,98
24	+1	+1	0	0,279	28,47
25	-1	+1	+1	0,0858	8,76
26	0	+1	+1	0,171	17,52
27	+1	+1	+1	0,257	26,28

O modelo estatístico de segunda ordem para a eficiência de coleta do lavador Venturi, utilizando os dados do segundo planejamento experimental é representado pela equação (3.3):

$$\eta = A_2 + B_2 \cdot Q_L + C_2 \cdot L_G + D_2 \cdot V_G + E_2 \cdot Q_L^2 + F_2 \cdot L_G^2 + G_2 \cdot V_G^2 + H_2 \cdot Q_L \cdot L_G + I_2 \cdot Q_L \cdot V_G + J_2 \cdot L_G \cdot V_G \quad (3.3)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos em todos os testes experimentais realizados estão listados no Apêndice C.

### 4.1 Realização da Matriz do Primeiro Planejamento Experimental

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos para as 27 corridas experimentais do primeiro planejamento em termos de eficiência global de coleta no lavador Venturi.

Tabela 4.1 – Resultados da matriz do primeiro planejamento experimental

Teste	$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	$L_G$ (cm)	$N_O$	$\Delta P$ (Pa)	$\eta$ (%)
1	-1	-1	-1	1599,8	56,32
2	0	-1	-1	2533,1	72,74
3	+1	-1	-1	3066,4	80,03
4	-1	0	-1	2266,4	73,45
5	0	0	-1	3333,0	83,7
6	+1	0	-1	4266,31	84,4
7	-1	+1	-1	1733,1	61,72
8	0	+1	-1	2666,4	84,7
9	+1	+1	-1	3066,4	90,22
10	-1	-1	0	2533,1	57,3
11	0	-1	0	2799,7	65,77
12	+1	-1	0	2799,7	68,39
13	-1	0	0	3199,7	60,73
14	0	0	0	3866,3	67,76
15	+1	0	0	3199,7	69,85
16	-1	+1	0	2133,1	57,79
17	0	+1	0	2933,1	76,72
18	+1	+1	0	3199,7	84,4
19	-1	-1	+1	2399,8	50,94
20	0	-1	+1	2799,7	65,77
21	+1	-1	+1	3199,7	69,85
22	-1	0	+1	3066,4	53,87
23	0	0	+1	3599,7	67,76
24	+1	0	+1	4132,9	69,85
25	-1	+1	+1	1999,8	66,61
26	0	+1	+1	2666,4	84,7
27	+1	+1	+1	3199,7	91,67

Verificou-se que os percentuais de eficiência de coleta ficaram na faixa de 50% quando utilizou-se a menor vazão de líquido e o menor comprimento de garganta e de 91% quando utilizou-se a maior vazão de líquido e o maior comprimento de garganta.

#### 4.1.1 Influência da Vazão de Líquido na Eficiência Global

As Figuras 4.1 a 4.3 mostram a eficiência global de coleta como uma função da vazão de líquido para os três comprimentos de garganta ( $L_G = 6,5, 12,5$  e  $18,5$  cm) utilizando-se 1 orifício, 3 orifícios e 5 orifícios. Observa-se que nos três comprimentos de garganta a eficiência de coleta foi maior para a maior vazão de líquido de  $900 \text{ cm}^3/\text{min}$ , demonstrando a tendência de aumento da eficiência com o aumento da vazão de líquido. Isso ocorre porque na vazão de líquido de  $900 \text{ cm}^3/\text{min}$  ocorreram as maiores penetrações do jato (Tabela 3.5) dentro da área da garganta do Venturi em comparação com as vazões de  $300$  e  $600 \text{ cm}^3/\text{min}$  o que promoveu um melhor espalhamento das gotas na garganta com o conseqüente aumento na eficiência.

Comparando-se as Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 verifica-se que nas três configurações de orifício verificou-se o mesmo comportamento citado acima e as maiores eficiências foram encontradas quando utilizou-se somente 1 orifício, o que será explicado mais adiante.

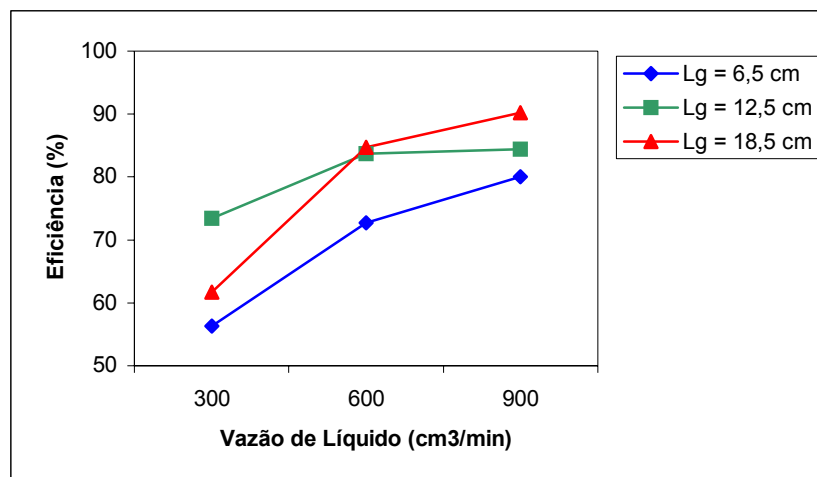


Figura 4.1 – Efeito da vazão de líquido na eficiência global para 1 orifício (vide Tabela 3.2)

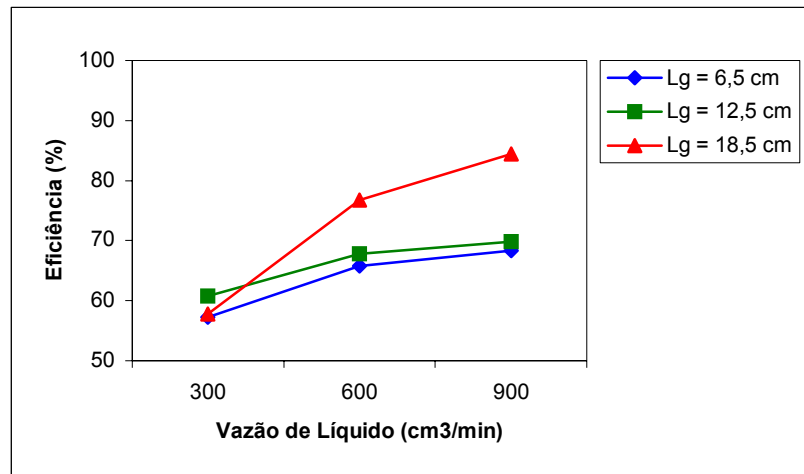


Figura 4.2 – Efeito da vazão de líquido na eficiência global para 3 orifícios (Config. 1, vide Tabela 3.2)

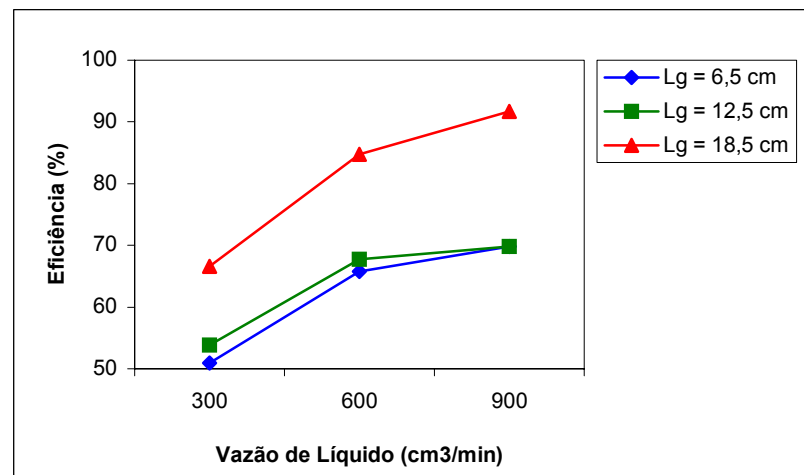


Figura 4.3 – Efeito da vazão de líquido na eficiência global para 5 orifícios (vide Tabela 3.2)

#### 4.1.2 Influência do Comprimento de Garganta na Eficiência Global

As Figuras 4.4 a 4.6 mostram a eficiência global de coleta como uma função do comprimento da garganta para os três números de orifício ( $N_o = 1, 3$  e  $5$  orifícios), utilizando-se a vazão de líquido de  $300, 600$  e  $900 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Observa-se que nos três números de orifício predominantemente a eficiência de coleta foi maior para o maior comprimento de garganta de  $18,5 \text{ cm}$ , demonstrando que um aumento do comprimento de garganta produziu crescentes valores de eficiência de coleta. Pela



análise dos efeitos que interferem na eficiência, realizada em trabalho anterior [MARTINS COSTA, 2002], verificou-se que quanto mais se afasta do ponto de injeção de líquido mais uniforme é a distribuição das gotas na direção transversal ao longo do Venturi e esse efeito tende a aumentar a eficiência de coleta.

Comparando-se as Figuras 4.4 a 4.6 verifica-se que as mesmas apresentam predominantemente o mesmo comportamento citado acima, sendo que as eficiências de coleta foram maiores na vazão de líquido de  $900 \text{ cm}^3/\text{min}$  devido à maior penetração do jato.

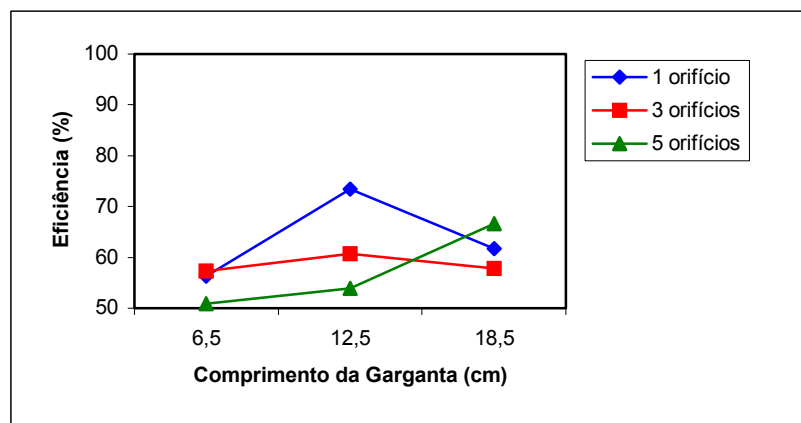


Figura 4.4 – Efeito do comprimento de garganta na eficiência de global para  $Q_L=300 \text{ cm}^3/\text{min}$

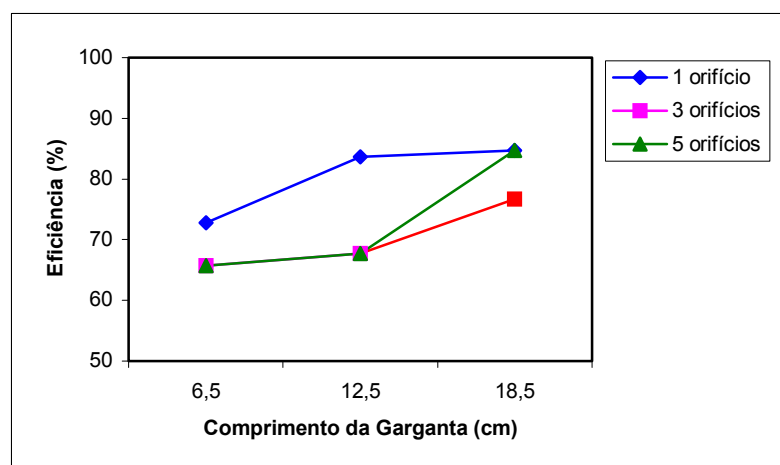


Figura 4.5 – Efeito do comprimento de garganta na eficiência de global para  $Q_L=600 \text{ cm}^3/\text{min}$

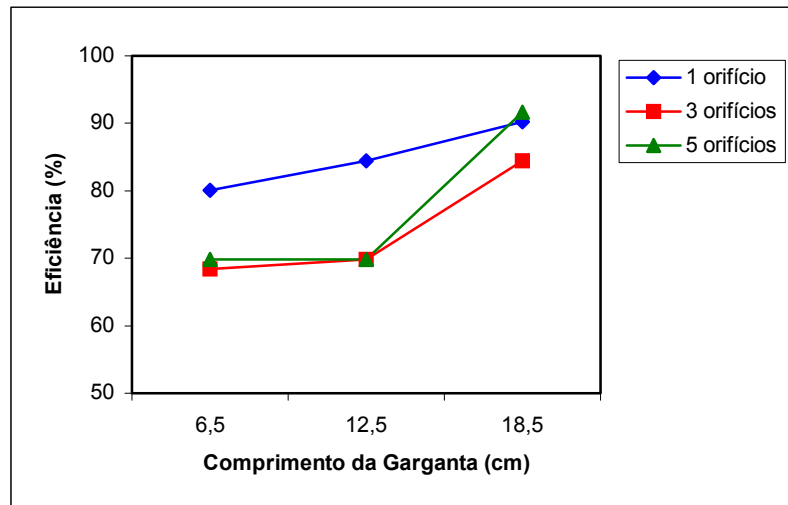


Figura 4.6 – Efeito do comprimento de garganta na eficiência global para  $Q_L=900 \text{ cm}^3/\text{min}$

#### 4.1.3 Influência do Número de Orifícios na Eficiência Global

As Figuras 4.7 a 4.10 mostram a eficiência global de coleta como uma função do número de orifícios para as três vazões de líquido ( $Q_L= 300, 600$  e  $900 \text{ cm}^3/\text{min}$ ) utilizando-se o comprimento de garganta de 6,5 cm Config.1 e Config.2, 12,5 cm e 18,5 cm. Observa-se que nas três vazões de líquido predominantemente a eficiência de coleta foi maior quando utilizou-se somente 1 orifício. As razões para tal comportamento são discutidas na próxima seção.

Comparando-se as Figuras 4.7 a 4.10 verifica-se que as mesmas apresentaram predominantemente o mesmo comportamento citado acima.

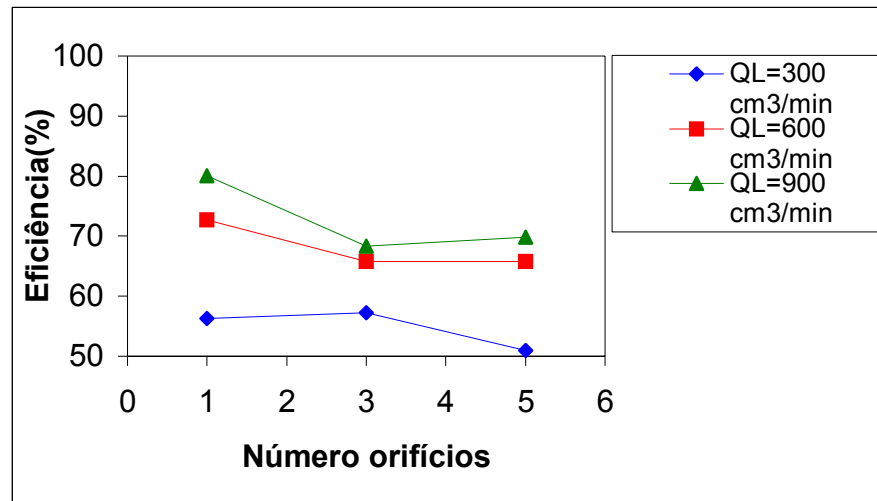


Figura 4.7 – Efeito do número de orifícios Config. 1 na eficiência global para  $L_G = 6,5$  cm

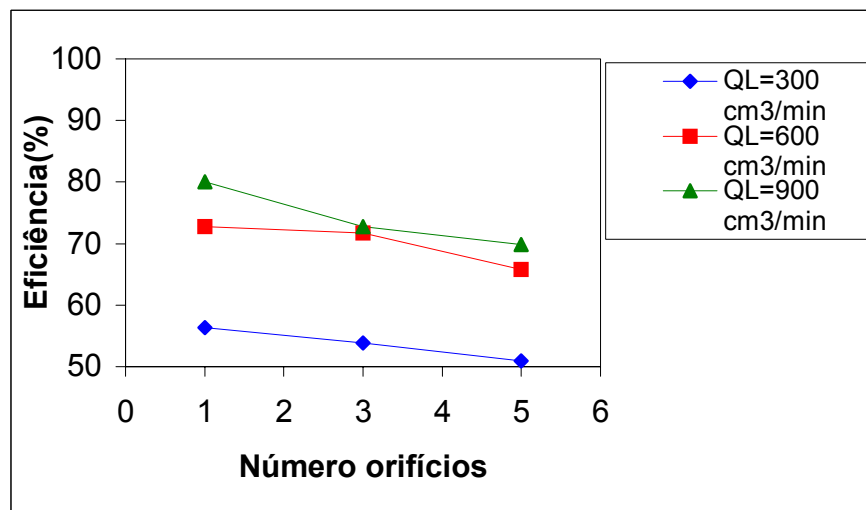


Figura 4.8 – Efeito do número de orifícios Config. 2 na eficiência global para  $L_G = 6,5$  cm

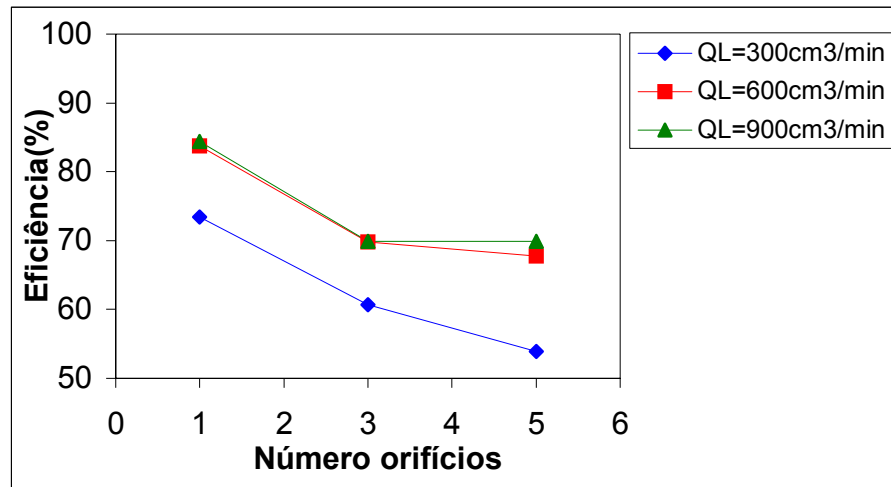


Figura 4.9 – Efeito do número de orifícios Config. 1 na eficiência global para  $L_G = 12,5$  cm

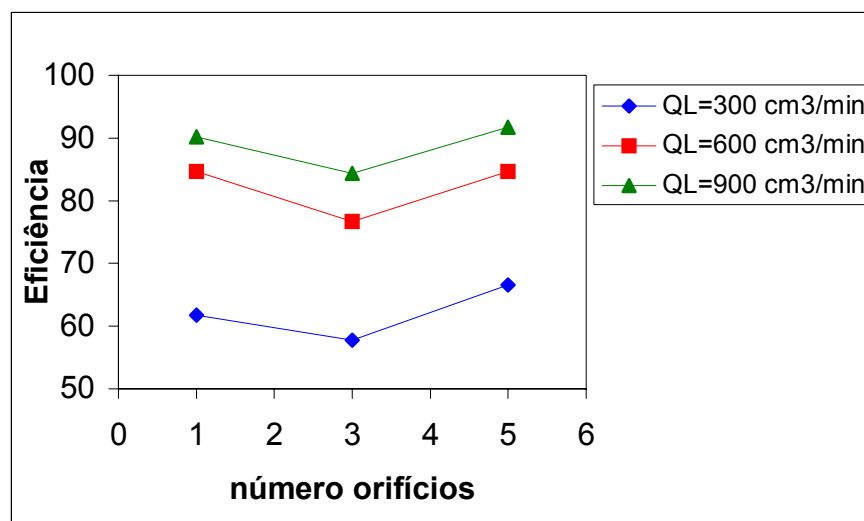


Figura 4.10 – Efeito do número de orifícios Config. 1 na eficiência global para  $L_G = 18,5$  cm

#### 4.1.4 Efeito da Penetração do Jato na Eficiência Global

A Figura 4.11 mostra a eficiência global de coleta como uma função da penetração do jato para as três vazões de líquido ( $Q_L=300, 600$  e  $900 \text{ cm}^3/\text{min}$ ), utilizando-se 1 orifício, 3 orifícios Config.1 e Config.2 e 5 orifícios (vide Tabela 3.2). A penetração do jato foi estimada a partir da equação 2.7. Pode-se observar que com a configuração de apenas 1 orifício a penetração do jato foi maior obtendo-se, conseqüentemente, uma maior eficiência. Já para as configurações de 3 orifícios Config.1 e Config.2 e 5 orifícios a penetração do jato diminuiu, deixando uma ampla faixa de área, localizada na parte debaixo da garganta, desprovida de líquido de limpeza. Como conseqüência, obteve-se uma eficiência global de coleta inferior à obtida com a configuração de 1 orifício.

Pode-se afirmar que a eficiência é uma função da distribuição do líquido de limpeza, o que justifica um melhor resultado de eficiência para a configuração de 3 orifícios Config.2 (dois orifícios laterais localizados na parte inferior da garganta) em comparação com a configuração de 3 orifícios Config.1 (dois orifícios laterais localizados na parte superior da garganta).

Acredita-se também que houve uma melhor dispersão do líquido quando este era inserido através do orifício vertical.

É importante ressaltar que este mesmo comportamento foi observado para os três comprimentos de garganta.

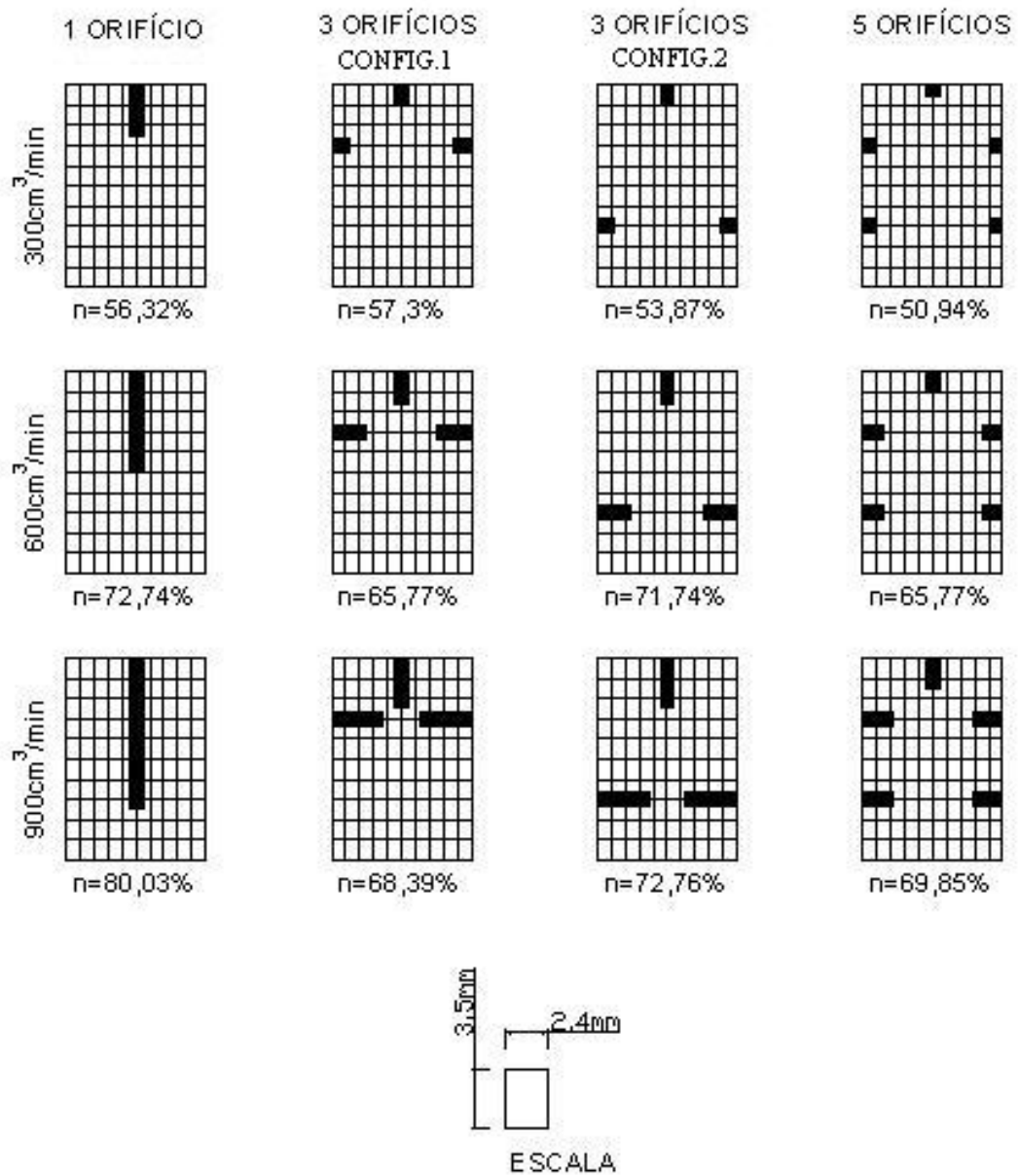


Figura 4.11 – Efeito da penetração do jato na eficiência global para  $L_G = 6,5$  cm e  $V_G = 69,33$  m/s

#### 4.1.5 Obtenção do Modelo Estatístico para o Primeiro Planejamento

A Tabela 4.2 mostra os resultados da análise estatística realizada para estimativa dos parâmetros do modelo através do método da regressão não linear.

Tabela 4.2 – Valores dos coeficientes do modelo para o primeiro planejamento

Coeficientes	Valor Estimado	Desvio Padrão	Nível de Significância
A <sub>1</sub>	56,3067	2,470	9,26.10 <sup>-16</sup>
B <sub>1</sub>	0,0855	1,145	2,42.10 <sup>-7</sup>
C <sub>1</sub>	-1,1882	1,145	4,73.10 <sup>-5</sup>
D <sub>1</sub>	-11,6525	1,145	5,08.10 <sup>-3</sup>
E <sub>1</sub>	-5,7.10 <sup>-5</sup>	1,983	1,97.10 <sup>-2</sup>
F <sub>1</sub>	0,0353	1,983	0,529
G <sub>1</sub>	1,2622	1,983	0,021
H <sub>1</sub>	1,225.10 <sup>-3</sup>	1,402	0,134
I <sub>1</sub>	-4,5.10 <sup>-4</sup>	1,402	0,851
J <sub>1</sub>	0,2004	1,402	0,104

R<sup>2</sup> = 88,15%

Verifica-se pela Tabela 4.2 que os parâmetros F<sub>1</sub>, H<sub>1</sub>, I<sub>1</sub> e J<sub>1</sub> apresentaram níveis de significância menores que os considerados na análise estatística (95%). Portanto estes parâmetros afetam pouco a resposta da eficiência de coleta.

A equação do modelo estatístico de segunda ordem para a eficiência de coleta é obtida substituindo-se os parâmetros estimados para o primeiro planejamento na Eq.(3.2), conforme mostrado abaixo, sendo Q<sub>L</sub> dado em cm<sup>3</sup>/min, L<sub>G</sub> em cm e N<sub>0</sub> adimensional:

$$\eta = 56,3067 + 0,0855.Q_L - 1,1882.L_G - 11,6525.N_0 - 5,7.10^{-5}.Q_L^2 + 0,0353.L_G^2 + 1,2622.N_0^2 + 1,225.10^{-3}.Q_L.L_G - 4,5.10^{-4}.Q_L.N_0 + 0,2004.L_G.N_0 \quad (4.1)$$

O bom ajuste do modelo estatístico para a eficiência de coleta do lavador Venturi foi verificado pelos baixos valores de desvio padrão e pelo coeficiente de correlação  $R^2$  (88,15%).

#### 4.1.6 Verificação da Validade da Análise Estatística para o Primeiro Planejamento

Verificou-se a validade da análise estatística pela boa concordância dos valores experimentais observados com os valores estimados pelo modelo para o primeiro planejamento, conforme apresentado na Figura 4.12.

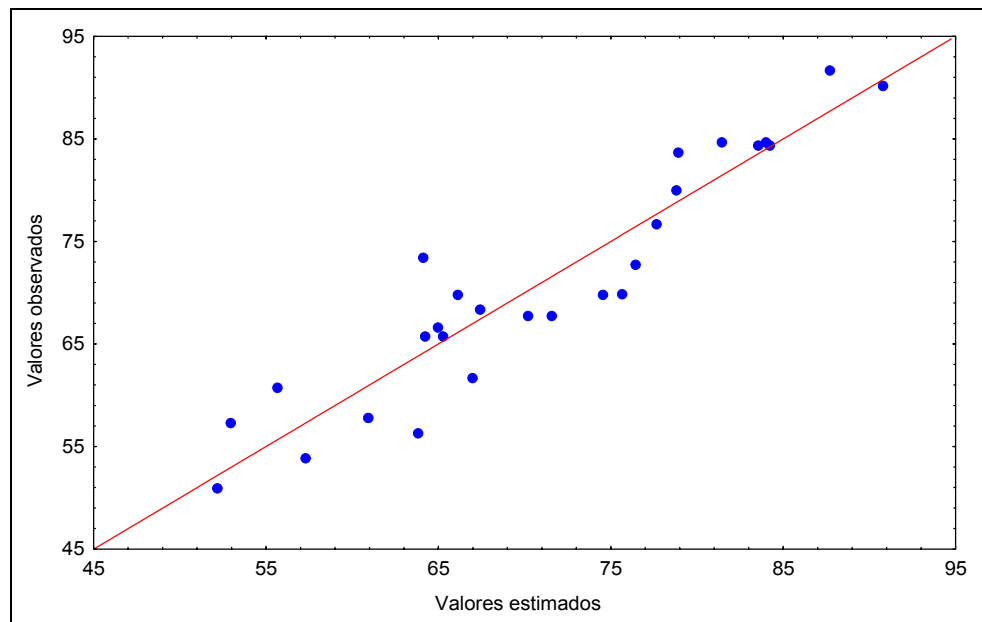


Figura 4.12 – Gráfico dos valores observados versus os valores estimados para o primeiro planejamento

Em relação ao gráfico de probabilidade normal (Figura 4.13) nota-se um comportamento linear dos resíduos, confirmando a boa adequação do modelo.



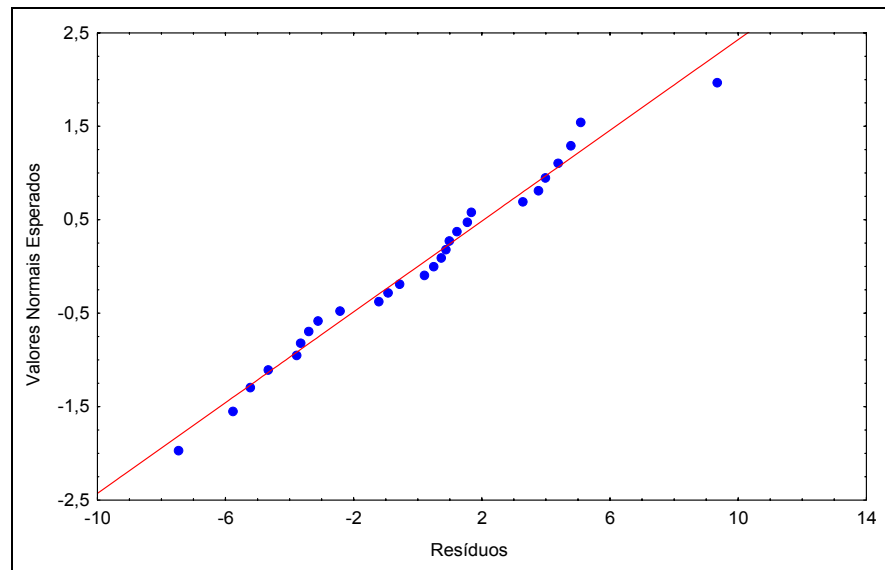


Figura 4.13 – Probabilidade normal dos resíduos do modelo estatístico para o primeiro planejamento

Também verificou-se a validade da análise estatística pela distribuição dos resíduos do modelo (Figura 4.14), a qual foi aleatória em torno do zero, demonstrando que não houveram vícios experimentais.

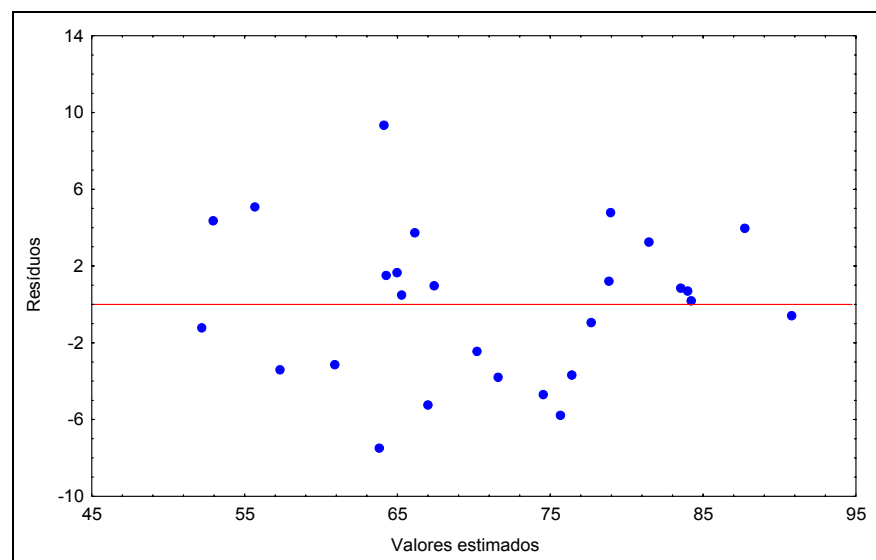


Figura 4.14 – Distribuição dos resíduos do modelo estatístico para o primeiro planejamento

## 4.2 Realização da Matriz do Segundo Planejamento Experimental

Uma vez constatado que as maiores eficiências foram obtidas para injeção de líquido por 1 orifício essa configuração foi adotada para os testes do segundo planejamento.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos para as 27 corridas experimentais do segundo planejamento em termos de eficiência global de coleta no lavador Venturi.

Tabela 4.3 – Resultados da matriz do segundo planejamento experimental

Teste	$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	$L_G$ (cm)	$V_G$ (m/s)	$\Delta P$ (Pa)	$\eta$ (%)
28	-1	-1	-1	1199,9	52,89
29	0	-1	-1	1999,8	65,77
30	+1	-1	-1	2666,4	74,21
31	-1	-1	0	1333,2	53,87
32	0	-1	0	2133,1	67,76
33	+1	-1	0	3066,4	75,67
34	-1	-1	+1	1599,8	56,32
35	0	-1	+1	2533,1	72,74
36	+1	-1	+1	3066,4	80,03
37	-1	0	-1	1733,1	53,87
38	0	0	-1	2266,4	65,77
39	+1	0	-1	2533,1	84,40
40	-1	0	0	1999,8	55,34
41	0	0	0	2666,4	74,73
42	+1	0	0	2933,1	87,31
43	-1	0	+1	1733,1	61,72
44	0	0	+1	2666,4	84,70
45	+1	0	+1	3066,4	90,22
46	-1	+1	-1	1599,86	58,28
47	0	+1	-1	2533,1	76,72
48	+1	+1	-1	3199,7	84,40
49	-1	+1	0	2266,4	62,20
50	0	+1	0	2666,4	77,72
51	+1	+1	0	3999,6	93,13
52	-1	+1	+1	2266,4	73,45
53	0	+1	+1	3333,0	83,70
54	+1	+1	+1	4266,3	84,40

Verificou-se que os percentuais de eficiência de coleta ficaram na faixa de 52 a 93%.

#### 4.2.1 Influência da Velocidade do Gás na Garganta na Eficiência Global

As Figuras 4.15 a 4.17 mostram a eficiência global de coleta como uma função da velocidade do gás na garganta os três comprimentos de garganta ( $L_G = 6,5, 12,5$  e  $18,5$  cm), utilizando-se a vazão de líquido de  $300, 600$  e  $900 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Observa-se que o aumento da velocidade do gás na garganta provocou um aumento na eficiência de coleta para os três comprimentos de garganta. Isso ocorre porque ao aumentar-se a velocidade do gás na garganta predominaram os aspectos positivos em relação à eficiência de coleta como o aumento da turbulência, geração de um número maior de gotas e um maior espalhamento das gotas no interior da garganta.

Comparando-se as Figuras 4.15 a 4.17 verifica-se que as mesmas apresentaram predominantemente o mesmo comportamento citado acima.

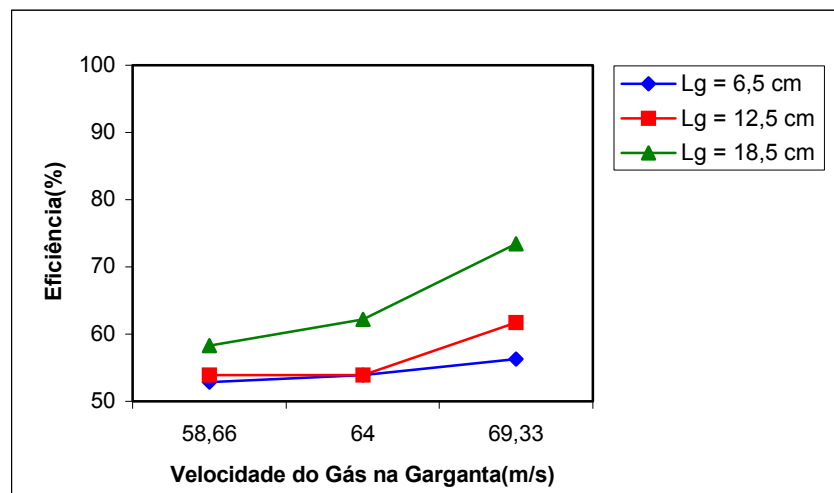


Figura 4.15 – Efeito da velocidade do gás na garganta na eficiência de coleta para  $Q_L = 300 \text{ cm}^3/\text{min}$

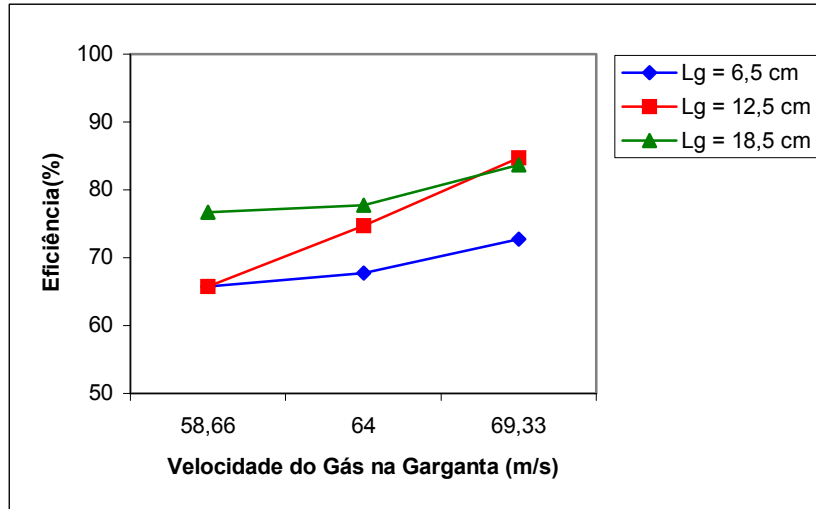


Figura 4.16 – Efeito da velocidade do gás na garganta na eficiência de coleta para  $Q_L = 600 \text{ cm}^3/\text{min}$

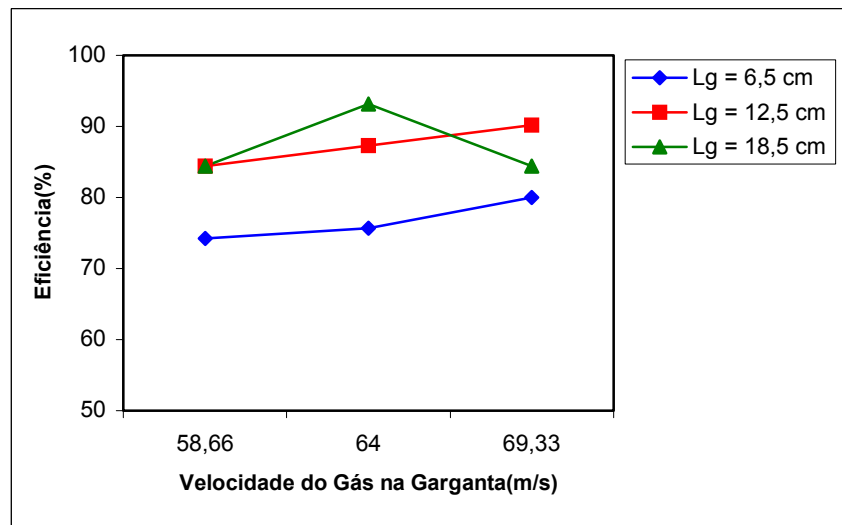


Figura 4.17 – Efeito da velocidade do gás na garganta na eficiência de coleta para  $Q_L = 900 \text{ cm}^3/\text{min}$

#### 4.2.2 Obtenção do Modelo Estatístico para o Segundo Planejamento

A Tabela 4.4 mostra os resultados da análise estatística realizada para estimativa dos parâmetros do modelo através do método da regressão não linear.

Tabela 4.4 – Valores dos coeficientes do modelo para o segundo planejamento

Coeficientes	Valor Estimado	Desvio Padrão	Nível de Significância
A <sub>2</sub>	21,9919	1,931	4,88.10 <sup>-18</sup>
B <sub>2</sub>	0,1330	0,894	8,87.10 <sup>-11</sup>
C <sub>2</sub>	0,7380	0,894	1,79.10 <sup>-5</sup>
D <sub>2</sub>	-1,0393	0,894	3,83.10 <sup>-4</sup>
E <sub>2</sub>	-3,5.10 <sup>-5</sup>	1,548	5,47.10 <sup>-2</sup>
F <sub>2</sub>	-0,0352	1,548	0,432
G <sub>2</sub>	0,01599	1,548	0,774
H <sub>2</sub>	5,42.10 <sup>-5</sup>	1,094	0,930
I <sub>2</sub>	-0,00077	1,094	0,275
J <sub>2</sub>	0,0154	1,094	0,657

R<sup>2</sup> = 93,80%

Verifica-se pela Tabela 4.4 que os parâmetros E<sub>2</sub>, F<sub>2</sub>, G<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, I<sub>2</sub> e J<sub>2</sub> apresentaram níveis de significância menores que os considerados na análise estatística (95%). Portanto estes parâmetros afetam pouco a resposta da eficiência de coleta.

A equação do modelo estatístico de segunda ordem para a eficiência de coleta é obtida substituindo-se os parâmetros relevantes estimados para o segundo planejamento na Eq.(3.3), conforme mostrado abaixo, sendo Q<sub>L</sub> dado em cm<sup>3</sup>/min, L<sub>G</sub> em cm e V<sub>G</sub> em m/s:

$$\eta = 21,9919 + 0,1330.Q_L + 0,7380.L_G - 1,0393.V_G - 3,5.10^{-5}.Q_L^2 - 0,0352.L_G^2 + 0,01599.V_G^2 + 5,42.10^{-5}.Q_L.L_G - 0,00077.Q_L.V_G + 0,0154.L_G.V_G \quad (4.2)$$

O bom ajuste do modelo estatístico para a eficiência de coleta do lavador Venturi foi verificado pelos baixos valores de desvio padrão e pelo coeficiente de correlação  $R^2$  (93,80%).

#### 4.2.3 Verificação da Validade da Análise Estatística para o Segundo Planejamento

Verificou-se a validade da análise estatística pela boa concordância dos valores experimentais observados com os valores estimados pelo modelo para o segundo planejamento, conforme apresentado na Figura 4.18.

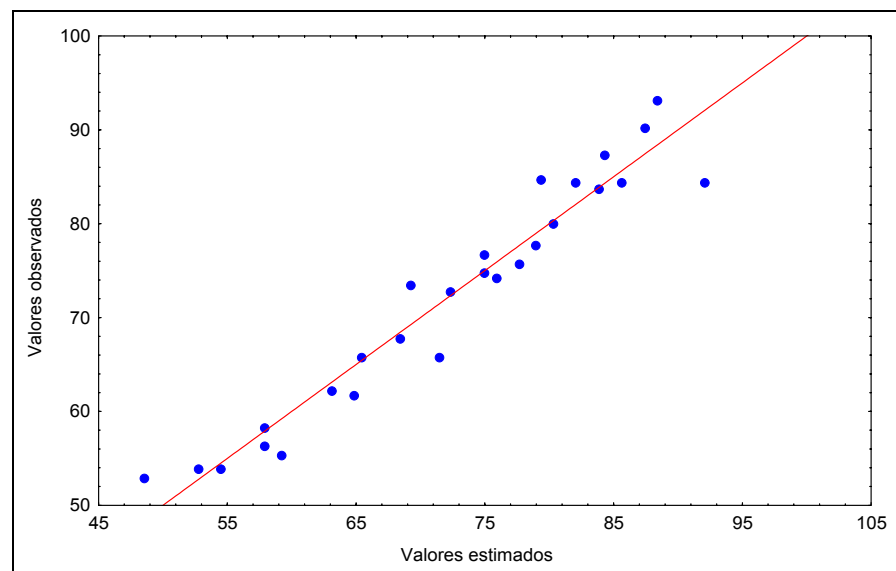


Figura 4.18 – Gráfico dos valores observados versus os valores estimados para o segundo planejamento

Em relação ao gráfico de probabilidade normal (Figura 4.19) nota-se um comportamento linear dos resíduos, confirmando a boa adequação do modelo.

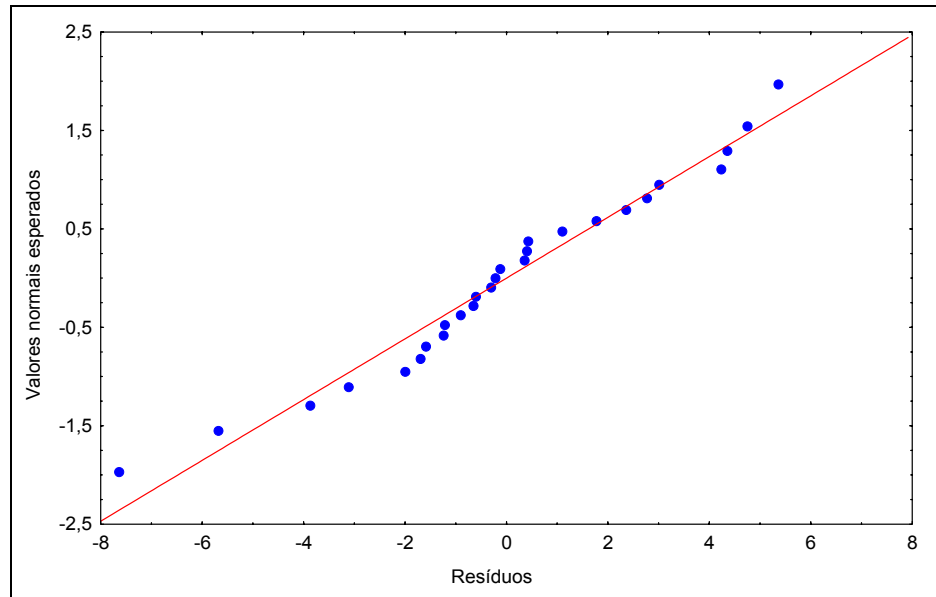


Figura 4.19 – Probabilidade normal dos resíduos do modelo estatístico para o segundo planejamento

Também verificou-se a validade da análise estatística pela distribuição dos resíduos do modelo (Figura 4.20), a qual foi aleatória em torno do zero, demonstrando que não houveram vícios experimentais.

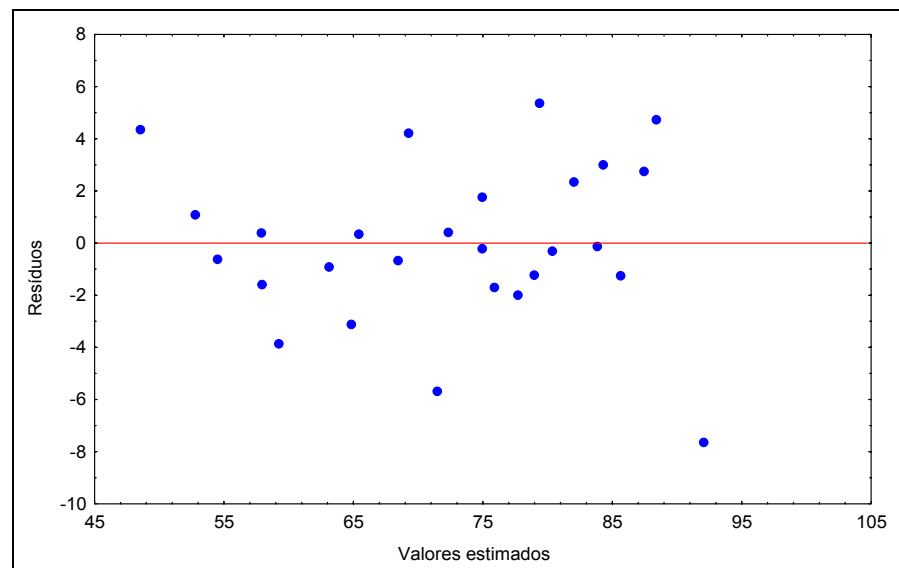


Figura 4.20 – Distribuição dos resíduos do modelo estatístico para o segundo planejamento

#### 4.2.4 Comparação dos Resultados Experimentais com os Modelos Teóricos de Eficiência

As Figuras 4.21 e 4.22 ilustram as curvas geradas pelas equações de eficiência de Johnstone (Eq. 2.9), Calvert (Eq. 2.10) e Leith e Cooper (Eq. 2.12) e os valores experimentais. Na equação de Johnstone utilizou-se o valor recomendado de  $K=20$ , na de Calvert o valor recomendado de  $f=0,25$  e na de Leith e Cooper o valor de  $\beta=0,85$ . Os dados experimentais utilizados correspondem aos testes 28 a 36. As Figuras mostram que para os resultados experimentais e para os modelos avaliados a eficiência global é crescente com o aumento da vazão de líquido. No entanto, verificou-se que os modelos de Johnstone e Calvert subestimaram os valores de eficiência global obtidos experimentalmente enquanto o modelo de Leith e Cooper superestimou os mesmos

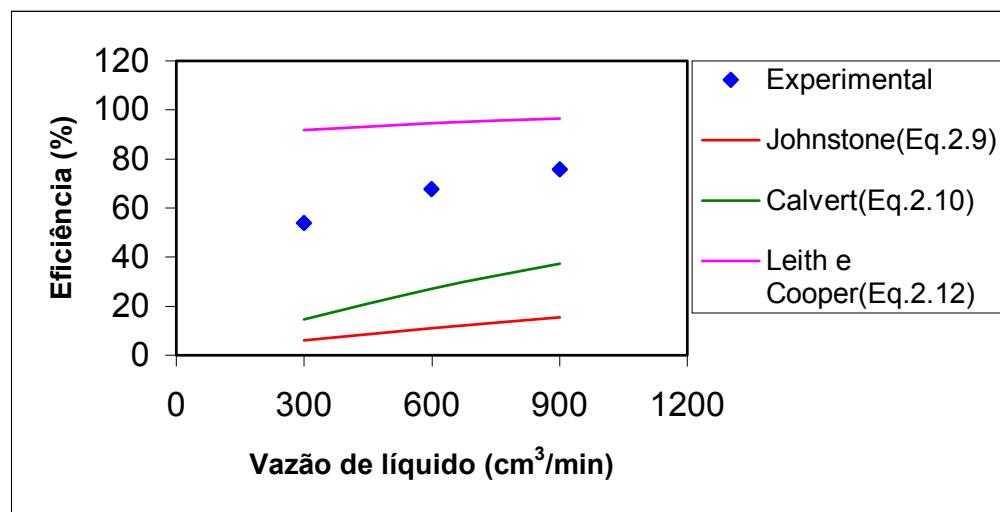


Figura 4.21 – Comparação entre as eficiências geradas pelos modelos e os valores experimentais para  $L_G=6,5$  cm e  $V_G=64$  m/s



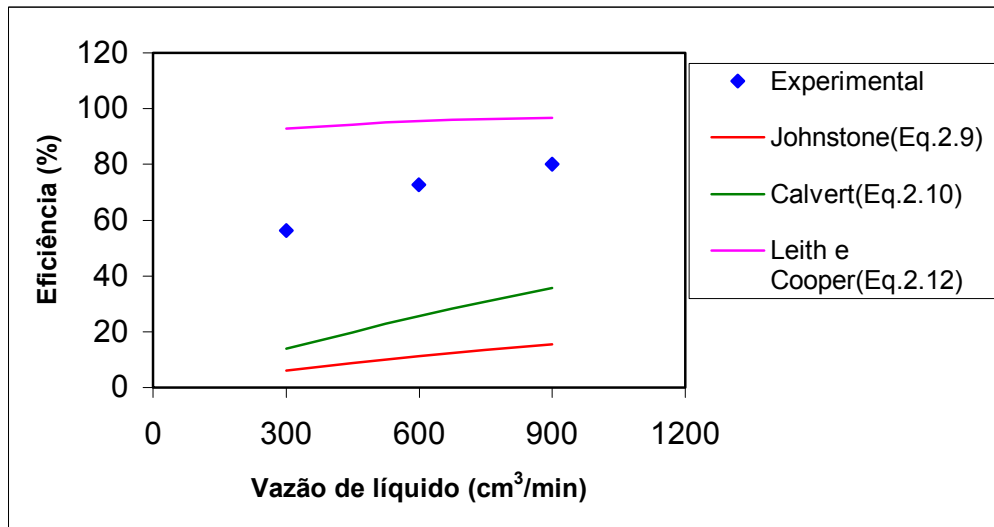


Figura 4.22 – Comparação entre as eficiências geradas pelos modelos e os valores experimentais para  $L_G=6,5$  cm e  $V_G=69,33$  m/s

Com esses resultados tornou-se necessário ter um modelo para ajustar os pontos teóricos aos experimentais. Tomou-se como base o modelo proposto por Calvert por ser um modelo clássico e ser amplamente utilizado na indústria, sendo representado pela Eq.(2.10):

$$\eta = 1 - \exp\left[\frac{2 \cdot Q_L \cdot V_G \cdot \rho_L \cdot D}{55 \cdot Q_G \cdot \mu_G} F(\psi, f)\right] \quad (2.10)$$

sendo que o fator F é representado por:

$$F = \frac{1}{2 \cdot \psi} \left[ -0,7 - 2 \cdot \psi \cdot f + 1,4 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot \psi \cdot f + 0,7}{0,7}\right) + \left(\frac{0,49}{0,7 + 2 \cdot \psi \cdot f}\right) \right] \quad (2.11)$$

Verificou-se pelas Figuras 4.21 e 4.22 que o valor do fator empírico  $f$  de 0,25 é muito baixo para ajustar aos dados experimentais. Para obter-se o valor do fator empírico  $f$  os autores consideraram apenas o mecanismo da impactação inercial, efetivo somente para partículas maiores. Como o material particulado utilizado neste trabalho apresenta uma quantidade apreciável de partículas submicrômicas propõe-se uma equação de ajuste para o fator empírico  $f$  utilizando os dados experimentais. Observou-se pelos resultados de eficiência que a variável comprimento de garganta é relevante na eficiência de coleta e, como a mesma não foi considerada no modelo de Calvert, optou-se por ajustar uma equação de  $f$  em função de  $L_G$  da forma:

$$f = A.L_G^B \quad (4.1)$$

sendo  $L_G$  dado em cm e obtendo-se por ajuste os parâmetros  $A=0,5161$  e  $B=0,3005$ , resultando

$$f=0,5161.L_G^{0,3005} \quad (4.2)$$

Verificou-se a validade do ajuste pela boa concordância dos valores experimentais de eficiência global observados com os valores estimados pelo modelo de Calvert modificado (Figuras 4.23 a 4.25 e Apêndice D).

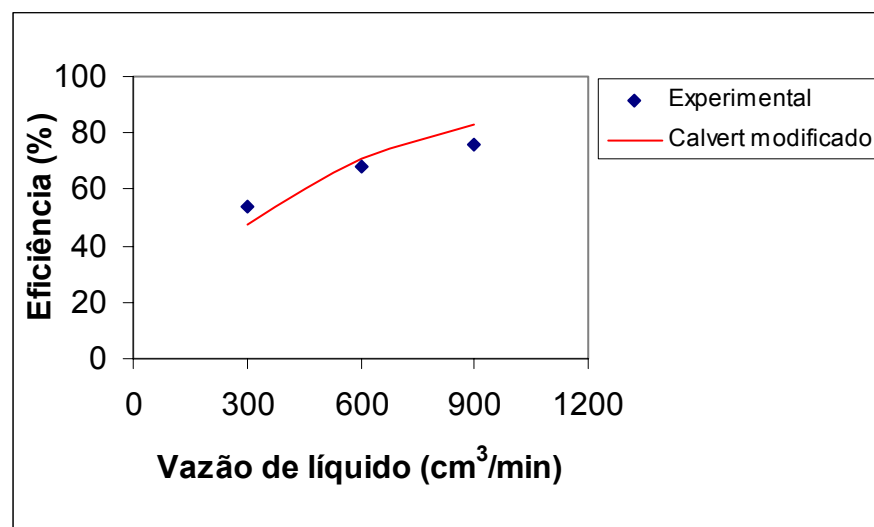


Figura 4.23 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para  $V_G=64$  m/s e  $L_G=6,5$  cm

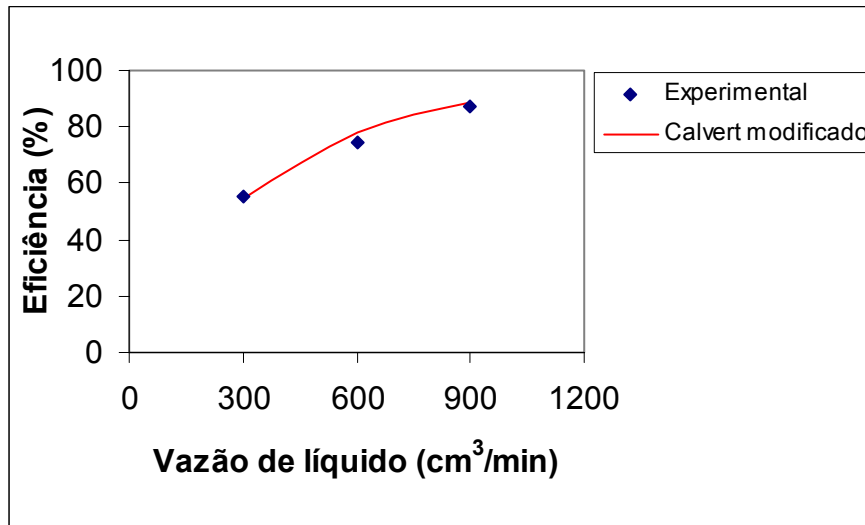


Figura 4.24 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para  $V_G=64$  m/s e  $L_G=12,5$  cm

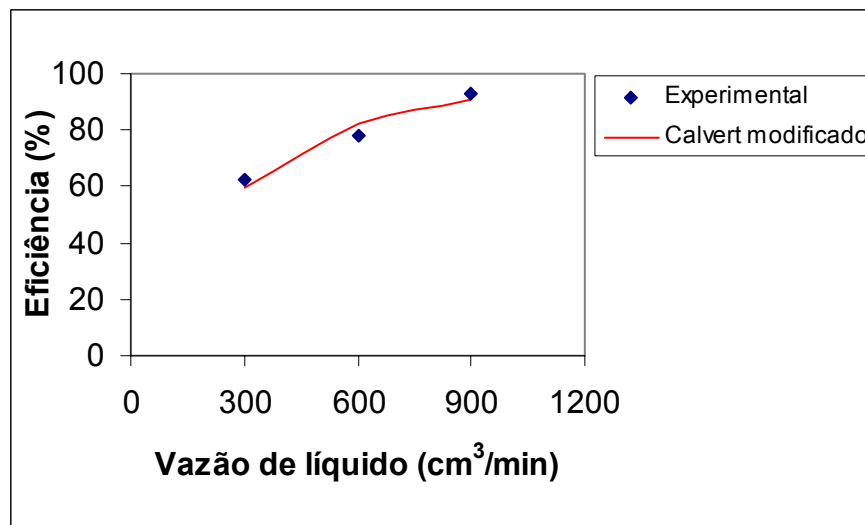


Figura 4.25 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para  $V_G=64$  m/s e  $L_G=18,5$  cm

A Figura 4.26 e a Tabela 4.5 apresentam os desvios calculados entre os valores experimentais e os do modelo de Calvert modificado (Eqs. 2.10, 2.11, 4.2 ) para os testes 27 a 54, onde se observa um desvio máximo de 22%. Pela Figura 4.22 pode-se notar que os pontos estão bem distribuídos em torno da reta, e que a grande maioria dos mesmos estão dentro de um desvio de  $\pm 15\%$ . Considerando-se a amplitude das variáveis investigadas e as imprecisões experimentais inerentes aos testes, pode-se dizer que a equação representa satisfatoriamente a eficiência global de coleta nas condições estudadas.

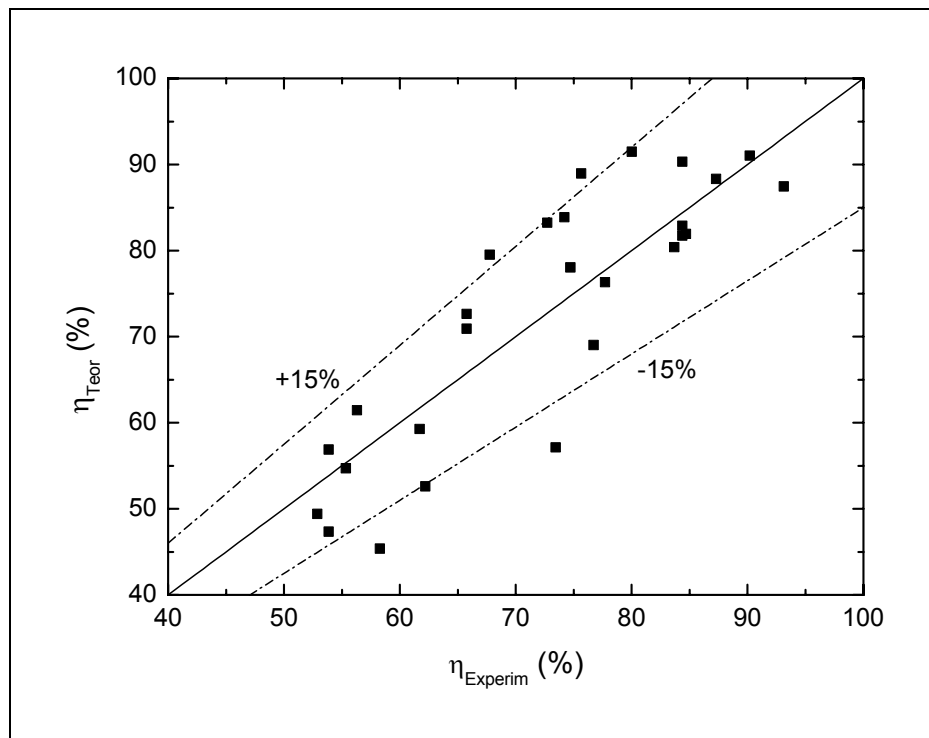


Figura. 4.26 – Eficiência global teórica (Eqs. 2.10, 2.11, 4.2) vs. experimental.

Tabela 4.5- Desvios entre os valores experimentais e os do modelo de Calvert modificado

Teste	$\eta$ Experimental (%)	$\eta$ Teórico (%)	Desvio (%) *
28	52,89	49,41	6,57
29	65,77	72,63	10,43
30	74,21	83,85	12,99
31	53,87	56,86	5,55
32	67,76	79,5	17,32
33	75,67	88,95	17,54
34	56,32	61,45	9,10
35	72,74	83,24	14,43
36	80,03	91,49	14,31
37	53,87	47,34	12,12
38	65,77	70,91	7,81
39	84,40	82,89	1,78
40	55,34	54,7	1,15
41	74,73	78,02	4,40
42	87,31	88,30	1,13
43	61,72	59,27	3,96
44	84,70	81,94	3,25
45	90,22	91,01	0,87
46	58,28	45,37	22,15
47	76,72	69,01	10,04
48	84,40	81,72	3,17
49	62,20	52,61	15,41
50	77,72	76,32	1,80
51	93,13	87,44	6,10
52	73,45	57,14	22,20
53	83,70	80,4	3,94
54	84,40	90,33	7,02

$$* \text{Desvio} = \frac{|\eta_{Exp} - \eta_{Teor}|}{\eta_{Exp}} \times 100$$

## 5 CONCLUSÕES

As principais conclusões a que se chegou neste trabalho são:

- Os percentuais de eficiência de coleta para o primeiro planejamento experimental ficaram na faixa de 50% quando utilizou-se a menor vazão de líquido e o menor comprimento de garganta e de 91% quando utilizou-se a maior vazão de líquido e o maior comprimento de garganta.
- Nos três comprimentos de garganta a eficiência de coleta foi maior para a maior vazão de líquido de  $900 \text{ cm}^3/\text{min}$ , demonstrando a tendência de aumento da eficiência com o aumento da vazão de líquido.
- Nos três números de orifício a eficiência de coleta foi maior para o maior comprimento de garganta de 18,5 cm, demonstrando que um aumento do comprimento de garganta produziu crescentes valores de eficiência de coleta.
- Nas três vazões de líquido a eficiência de coleta foi maior quando utilizou-se somente 1 orifício.
- Com a configuração de apenas 1 orifício a penetração do jato foi maior obtendo-se, conseqüentemente, uma maior eficiência. Já para as configurações de 3 e 5 orifícios a penetração do jato diminuiu, obtendo-se uma eficiência global de coleta inferior à obtida com a configuração de 1 orifício.
- A eficiência é uma função da distribuição do líquido de limpeza, o que justifica um melhor resultado de eficiência para a configuração de três orifícios com os dois orifícios laterais localizados na parte inferior da garganta em comparação com a configuração com os dois orifícios laterais localizados na parte superior da garganta.
- O bom ajuste do modelo estatístico para o primeiro planejamento experimental foi verificado pelos baixos valores de desvio padrão e pelo coeficiente de correlação  $R^2$  de 88,15%.
- A validade da análise estatística realizada para o primeiro planejamento experimental foi verificada pela distribuição dos resíduos, a qual foi aleatória em torno do zero e pelo comportamento linear dos mesmos no gráfico de probabilidade normal.

- Os percentuais de eficiência de coleta para o segundo planejamento experimental ficaram na faixa de 52 a 93%.
- Um aumento da velocidade do gás na garganta provocou um aumento na eficiência de coleta para os três comprimentos de garganta.
- O bom ajuste do modelo estatístico para o segundo planejamento experimental foi verificado pelos baixos valores de desvio padrão e pelo coeficiente de correlação  $R^2$  de 93,8%.
- A validade da análise estatística realizada para o segundo planejamento experimental foi verificada pela distribuição dos resíduos, a qual foi aleatória em torno do zero e pelo comportamento linear dos mesmos no gráfico de probabilidade normal.
- Os modelos de Johnstone et al. e de Calvert et al. subestimaram os valores de eficiência global obtidos experimentalmente enquanto o modelo de Leith e Cooper superestimou os mesmos.
- A validade do modelo de Calvert modificado foi verificada pela boa concordância dos valores experimentais de eficiência global observados com os valores estimados pelo modelo.

## **6 SUGESTÕES**

- Utilização de um método confiável de determinação de tamanho de partícula para se avaliar as eficiência fracionárias.
- Avaliar nas condições estudadas neste trabalho a trajetória do jato, a fração de filme líquido, a dispersão das gotas e a distribuição de tamanho e evolução das gotas.
- Utilizar outros sistemas de injeção de líquido.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. W. K. Prediction of Venturi Scrubber Grade Efficiency Curves Using the Contacting Power Law. *Powder Technology*, v.86, p.137-144, 1996.

ALLEN, R. W. K.; SANTEN, A. Designing for Pressure Drop in Venturi Scrubber: The Importance of Dry Pressure Drop. *The Chemical Engineering Journal*, v.61, p.203-211, 1996.

ANANTHANARAYANAN, N. V.; VISWANATHAN, S. Estimating Maximum Removal Efficiency in Venturi Scrubbers. *Aiche Journal*, v.44, n.11, p.2549, 1998.

ANANTHANARAYANAN, N. V.; VISWANATHAN, S. Predicting the Liquid Flux Distribution and Collection Efficiency in Cylindrical Venturi Scrubbers. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v.38, p.223-232, 1999.

AZZOPARDI, B.J.; GOVAN, A.H. The modelling of Venturi scrubbers. *Filtration and Separation*, v.21, p.196-200, May/June 1984.

BAYVEL, L.P. The effect of polydispersity of drops on the efficiency of a Venturi scrubber. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, v.60, p.31-34, 1982.

BEHIE, S.W.; BEECKMANS, J.M. On the efficiency of a Venturi scrubber. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.51, p.430-433, 1973.

BEHIE, S.W.; BEECKMANS, J.M. Effects of water injection arrangement on the performance of a Venturi scrubber. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v.24, n.10, p.943-945, 1974.

BEG S.A.; TAHERI, M. Test of mathematical modeling for the design of high energy scrubbers. *Atmospheric Environment*, v.11, p.911-915, 1977.

BIRD, B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. Transport phenomena. New York, John Wiley & Sons, 1960.

BOLL, R.H. Particle collection and pressure drop in Venturi scrubbers. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, v.12, p.40-50, 1973.

BOLL, R.H. Letter to the editor: mathematical modeling of atomizing scrubbers. *AIChE Journal*, v.21, n.4, p.831, 1975.

BOLL, R.H. FLAIS, L.R.; MAURER, P.W. AND THOMPSON, W.L. Mean drop size in a full scale Venturi scrubber via transmissometer. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v.24, p.934-938, 1974.

BRINK, J. A.; CONTANT, C. E. Experiments on an Industrial Venturi Scrubber. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.50, n.8, p.1157-1160, 1958.

CALVERT, S. Source control by liquid scrubbing. In: A.C. Stern (ed.). Air Pollution. 2nd ed, New York, Academic Press, 1968. V.III.

CALVERT, S. Venturi and other atomizing scrubbers efficiency and pressure drop. *AIChE Journal*, v.16, p.392-396, 1970.

CALVERT, S. Engineering design of fine particle scrubbers. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v.24, p.929-934, 1974.

CALVERT, S. Scrubbing. In: in A.C. Stern (ed.). Air Pollution. 3rd ed, New York, Academic Press, 1977a. V.IV, chapter 6.

CALVERT, S. How to choose a particulate scrubber. *Chemical Engineering*, p.54-68, 29 August 1977b.

CALVERT, S.; GOLDSHMID, J.; LEITH, D.; MEHTA, D. Scrubber Handbook. Springfield, Virginia, NTIS publication number PB 213-016, 1972a.

CALVERT, S.; LUNDGREN, D.; MEHTA, D.S. Venturi scrubber performance. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v.22, p.529-532, 1972b.

CHEREMISINOFF, P. N.; YOUNG, R. A. Air pollution Control and Design Handbook. Marcel Dekker, v.2, New York, 1977.

COURY, J.R. Filtração de gases em filtros granulares. In: J.T. Freire; J.C. Gubulin (eds.). Tópicos especiais de sistemas particulados. São Carlos, UFSCar, 1986. V.II, Cap.II, p.65-121.

CROWDER, J.W.; NOLL, K.E.; DAVIS, W.T. Modeling of Venturi Scrubber Efficiency. *Atmospheric Environment*, V.16, N.8, P.2009-2013, 1982.

DAVIES, J.T. Turbulent phenomena—An introduction to the eddy transfer of momentum, mass, and heat, particularly at interfaces. New York, Academic Press, 1972.

DULLIEN, F. A. L. Industrial Gas Cleaning. Academic Press, San Diego, 1989.

EKMAN, F.O AND JOHNSTONE, H.F. Collection of aerosols in a Venturi scrubber. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.43, p.1358-1363, 1951.

FATHIKALAJAHI, J.; TALAIE, M.R.; TAHERI, M. Theoretical study of liquid droplet dispersion in a Venturi scrubber. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v.45, p.181-185, 1995.

FATHIKALAJAHI, J.; TALAIE M.R.; TAHERI M. Theoretical study of nonuniform droplet concentration distribution on Venturi scrubber performance. *Particulate Science and Technology*, v.14, p.153-164, 1996.

FUCHS, N.A. The Mechanics of Aerosols, New York, Dover Publication, 1964.

GOMIDE, R. Operações Unitárias. Câmara Brasileira do Livro, v.3, São Paulo, 1980.

GONÇALVES, J.A.S; Aspectos da modelagem matemática de lavadores Venturi. Tese de doutorado, São Carlos, 2000.

HALLER, H.; MUSCHELKNAUTZ, E.; SCHULTZ, T. Venturi Scrubber Calculation and Optimization. *Chemical Engineering Technology*, v.12, p.188-195, 1989.

HESKETH, H.E. Atomisation and cloud behaviour in wet scrubbers. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v.23, pp 600-604, 1973.

HESKETH, H.E. Fine particle collection efficiency related to pressure drop, scrubbant and particle properties, and contact mechanism. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v.24, n.10, p.939-942, 1974.

HESKETH, H. E. Air Pollution Control. Technomic Publishing, Pennsylvania, 1996.

HEUMANN, W. L. Industrial Air Pollution Control Systems. McGraw-Hill, New York, 1997.

HIDY, G.M.; BROCK, J.R. The Dynamics of Aerocolloidal Systems. Oxford, Pergamon Press, 1970.

HOLLANDS, K.G.T.; GOEL, K.C. A general method for predicting pressure loss in Venturi scrubbers. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, v.14, n.1, p.16-22, 1975.

JOHNSTONE H.F.; FEILD R.B.; TASSLER M.C. Gas absorption and aerosol collection in Venturi scrubbers. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.45, p.1601-1608, 1954.

JOHNSTONE, H.F.; ROBERTS, M.H. Deposition of aerosol particles from moving gas streams. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.41, n.11, p.2417-2423, 1949.

JONES, W. P. Development of the Venturi Scrubber. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.41, n.11, p.2424-2427, 1949.

LAPPLE, C.E.; SHEPHERD, C.B. Calculations of particle trajectories. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.32, p.605-617, 1940.

LAPPLE, C. E.; KAMACK, H. J. Wet Dust Scrubbers. Chemical Engineering Progress, v.51, n.3, p. 110-121, 1955.

LEITH, D.; COOPER D.W. Venturi scrubber optimization. *Atmospheric Environment*, v.14, p.657-664, 1980.

LEITH, D.; COOPER D.W.; RUDNICK, S.N. Venturi scrubbers: pressure loss and regain. *Aerosol Science and Technology*, v.4, n.2, p.239-243, 1985a.

LEITH, D.; MARTIN, K.P.; COOPER, D.W. Liquid utilisation in a Venturi scrubber. *Filtration and Separation*, p.191-195, May/June 1985b.

LICHT, W. Air Pollution Control Engineering. New York, Marcel Dekker, 1988.

LIPTÁK, B. G. Environmental Engineers' Handbook. Chilton Book Company, v.2, Pennsylvania, 1974.

LÖFFLER, F.; SCHUCH, G. Wet scrubber design. *Filtration and Separation*, p.70-74, Jan./Feb. 1981.

LONGELL, J.P.; WEISS, M.A. Mixing and distribution of liquids in high-velocity air streams. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.45, n.3, p.667-677, 1953.

MARTINS COSTA, M. A.; Eficiência de Coleta de Partículas em Lavadores Venturi. Tese de doutorado, São Carlos, 2002.

MAYINGER, F.; LEHNER, M. Operating Results and Aerosol Deposition of a Venturi Scrubber in Self-Priming Operation. *Chemical Engineering and Processing*, v.34, p.283-288, 1995.

MUIR, D.M.; GRANT, C.D. Relationship between collection efficiency and energy consumption of wet dust collector. *Filtration and Separation*, v.15, p.332-340, 1978.

MUIR, D.M.; MIHESI, Y. Comparison of the performance of a single and two-stage variable throat Venturi scrubber. *Atmospheric Environment*, v.13, p.1187-1196, 1979.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. Como Fazer Experimentos. Editora da Unicamp, Campinas, 2003.

NUKIYAMA, S.; TANASAWA, Y. Experiment on atomization of liquid by means of air stream. *Transactions of the Society of Mechanical Engineers - Japan*, v. 4, n.14, p.86-93, 1938.

OLIVEIRA, C.A. Estudo do desempenho de um lavador de Gases Tipo Venturi para Remoção de Partículas na Faixa respirável. Dissertação de mestrado, São Carlos, Universidade federal de São Carlos, 1995.

OLIVEIRA, C.A.; COURY, J.R. Performance of a Venturi scrubber in the removal of inhalable particles from the air. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.13, n.1, p.9-20, 1996.

OTT, R.M.; WU, T.K.L.; CROWDER, J.W. Modeling of surface tension effects in Venturi scrubbing. *Atmospheric Environment* 21(3), p.479-482, 1987.

PERRY, R.; CHILTON, C. H. Manual de Engenharia Química. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.

PLACEK, T.D.; PETERS, L.K. A hydrodynamic approach to particle target efficiency in the presence of diffusiophoresis. *Journal of Aerosol Science*, v.11, p.521ff, 1980.

PLACEK, T.D.; PETERS, L.K. Analysis of particulate removal in Venturi scrubbers – Effect of operating variables on performance. *AIChE Journal*, v.27, n.6, p.984-993, 1981.

PLACEK, T.D.; PETERS, L.K. Analysis of particulate removal in Venturi scrubbers – Role of Heat and Mass Transfer. *AIChE Journal* v.28, n.1, p.31-39, 1982.

PULLEY, R. A. Modelling the Performance of Venturi Scrubbers. *Chemical Engineering Journal*, v.67, p.9-18, 1997.

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.

SCHIFFTNER, K. C.; HESKETH, H. E. Wet Scrubbers. Technomic Publishing, Pennsylvania, 1996.

SCHUMANN, J.L. Selección del equipo para eliminar partículas. In: R.D. Ross (ed.). La industria y la contaminación del aire. México, Editora Diana, 1974. Capítulo 8.

SEMRAU, K.T. Correlation of dust scrubber efficiency. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v.10, n.3, p.200-207, 1960.

SEMRAU, K.T.; MARYNOWSKI, C.W.; LUNDE, K.E.; LAPPLE, C.E. Influence of power input on efficiency of dust scrubber. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.50, n.11, p.1615-1620, 1958.

SHAH, I.S. Scrubbers. In: B.G. Lipták (ed.). Environmental Engineers' Handbook. Pennsylvania, Chilton Book Company, 1974. V.II, Section 5:12-17.

SKLAREW, R.C.; FABRICK, A.J.; PRAGER, J.E. Mathematical modeling of photochemical smog using the PICK method. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v.22, b.11, p.865-869, 1972.

SPARKS, L.E.; RAMSEY, G.H.; DANIEL, B.E. Particle collection by a pilot plant Venturi scrubber downstream from a pilot plant electrostatic precipitator. *Atmospheric Environment*, v.15, p.65-72, 1981.

TAHERI, M.; HAINES, G. F. Optimization of Factors Affecting Scrubber Performance. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v.19, n.6, p.427-431, 1969.

TAHERI, M. Letter to the editor: On mathematical modeling of atomizing scrubbers. *AIChE Journal*, v.21, n.4, p.831, 1975.

TAHERI, M.; SHEIH, C.M. Mathematical modelling of atomising scrubbers. *AIChE Journal*, v.21, p.153-157, 1975.

TEIXEIRA, S.F.C.F. A model for the hydrodynamics of Venturis applicable to scrubbers. Ph.D. Thesis, University of Birmingham, England, 1989.

TIGGES, K.; MAYINGER, F. Experiments with Highly Efficient Venturi Scrubbers for Aerosol Separation from Gases under Multi-Plane Water Injection. *Chemical Engineering Process*, v.18, p.171-179, 1984.

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

VISWANATHAN, S. Modeling of Venturi Scrubber Performance. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v.36, p.4308-4317, 1997.

VISWANATHAN, S. Examination of Liquid Film Characteristics in the Prediction of Pressure Drop in a Venturi Scrubber. *Chemical Engineering Science*, v.53, n.17, p.3161-3175, 1998.

VOLGIN, B.P.; EFIMOVA, T.F.; GOFMAN, M.S. Absorption of sulfur dioxide by ammonium sulfite-bisulfite solution in a Venturi scrubber. *International Chemical Engineering*, v.8, n.1, p.113-118, 1968.

YUNG, S.C.; BARBARIKA, H.F.; CALVERT, S. Pressure loss in Venturi scrubbers. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v.27, n.4, p.348-350, 1977.

YUNG, S.C.; CALVERT, S.; BARBARIKA, H.F.; APARKS, L.E. Venturi scrubber performance model. *Environmental Science and Technology*, v.12, n.4, p.456-459, 1978.

YUNG, S.C.; CALVERT, S.; DUNCAN, M. Performance of gas-atomized spray scrubbers at high pressure. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v.34, n.7, p.736-742.



## ANEXOS

### APÊNDICE A – Calibração do rotâmetro de água

Tabela A.1 – Valores de vazão de líquido

Rotâmetro (cm <sup>3</sup> /min)	Proveta (ml)	Tempo (min)	Vazão (cm <sup>3</sup> /min)	Vazão média (cm <sup>3</sup> /min)
	310	1	310	
300	310	1	310	309,66
	309	1	309	
	630	1	630	
600	630	1	630	630
	630	1	630	
	915	1	915	
900	920	1	920	920
	925	1	925	

## APÊNDICE B – Calibração do gerador de pó

Tabela B.1 – Resultado da calibração do gerador de pó

	Teste 1	Teste 2
Rotação do prato (rpm)	30	30
Tempo de 1 volta do prato (min)	1,916	1,908
Massa do papel (g)	3,45	2,84
Massa do papel + massa pó entrada (g)	9,50	8,88
Massa pó entrada (g)	6,05	6,04
Vazão pó entrada (g/min)	3,157	3,165
Vazão pó entrada média (g/min)		3,161

## APÊNDICE C – Condições e resultados dos testes experimentais

Tabela C.1 – Condições e resultados do teste 1

Condições	Teste 1	Teste 1 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	300	300
$L_G$ (cm)	6,5	6,5
$N_O$	1	1
$T_G$ (°C)	38	38
$T_{amb}$ (°C)	25	25
$P_G$ (mmHg)	41	41
$P_{amb}$ (mmHg)	690,5	690,5
Peso do béquer (g)	105,09	107,46
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	105,67	108,03
$m_{LAMA}$ (g)	0,58	0,57
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	56,81	55,83

Tabela C.2 – Condições e resultados do teste 2

Condições	Teste 2	Teste 2 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	600	600
$L_G$ (cm)	6,5	6,5
$N_O$	1	1
$T_G$ (°C)	38	38
$T_{amb}$ (°C)	25	25
$P_G$ (mmHg)	41	41
$P_{amb}$ (mmHg)	690,5	690,5
Peso do béquer (g)	109,27	106,71
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	109,64	107,07
$m_{LAMA}$ (g)	0,37	0,36
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	73,74	71,74

Tabela C.3 – Condições e resultados do teste 3

Condições	Teste 3	Teste 3 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	900	900
$L_G$ (cm)	6,5	6,5
$N_O$	1	1
$T_G$ (°C)	38	38
$T_{amb}$ (°C)	25	25
$P_G$ (mmHg)	41	41
$P_{amb}$ (mmHg)	690,5	690,5
Peso do béquer (g)	102,61	106,12
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	102,88	106,40
$m_{LAMA}$ (g)	0,27	0,28
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	78,58	81,49

Tabela C.4 – Condições e resultados do teste 4

Condições	Teste 4	Teste 4 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	300	300
$L_G$ (cm)	12,5	12,5
$N_O$	1	1
$T_G$ (°C)	42,5	42,5
$T_{amb}$ (°C)	28,5	28,5
$P_G$ (mmHg)	41	41
$P_{amb}$ (mmHg)	693	693
Peso do béquer (g)	105,07	107,42
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	105,82	108,17
$m_{LAMA}$ (g)	0,75	0,75
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	73,43	73,47

Tabela C.5 – Condições e resultados do teste 5

Condições	Teste 5	Teste 5 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	600	300
$L_G$ (cm)	12,5	12,5
$N_O$	1	1
$T_G$ (°C)	42,5	42,5
$T_{amb}$ (°C)	28,5	28,5
$P_G$ (mmHg)	41	41
$P_{amb}$ (mmHg)	693	693
Peso do béquer (g)	109,26	105,09
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	109,69	105,50
$m_{LAMA}$ (g)	0,43	0,41
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	85,70	81,71

Tabela C.6 – Condições e resultados do teste 6

Condições	Teste 6	Teste 6 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	900	900
$L_G$ (cm)	12,5	12,5
$N_O$	1	1
$T_G$ (°C)	42,5	42,5
$T_{amb}$ (°C)	28,5	28,5
$P_G$ (mmHg)	41	41
$P_{amb}$ (mmHg)	693	693
Peso do béquer (g)	106,71	106,01
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	106,99	106,31
$m_{LAMA}$ (g)	0,28	0,30
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	81,49	87,31

Tabela C.7 – Condições e resultados do teste 7

Condições	Teste 7	Teste 7 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	300	300
$L_G$ (cm)	18,5	18,5
$N_O$	1	1
$T_G$ (°C)	39	39
$T_{amb}$ (°C)	26	26
$P_G$ (mmHg)	42	42
$P_{amb}$ (mmHg)	703,5	703,5
Peso do béquer (g)	108,43	107,42
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	109,06	108,05
$m_{LAMA}$ (g)	0,63	0,63
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	61,72	61,72

Tabela C.8 – Condições e resultados do teste 8

Condições	Teste 8	Teste 8 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	600	300
$L_G$ (cm)	18,5	18,5
$N_O$	1	1
$T_G$ (°C)	39	39
$T_{amb}$ (°C)	26	26
$P_G$ (mmHg)	42	42
$P_{amb}$ (mmHg)	703,5	703,5
Peso do béquer (g)	110,36	105,07
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	110,78	105,50
$m_{LAMA}$ (g)	0,42	0,43
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	83,70	85,70

Tabela C.9 – Condições e resultados do teste 9

Condições	Teste 9	Teste 9 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	900	900
$L_G$ (cm)	18,5	18,5
$N_O$	1	1
$T_G$ (°C)	39	39
$T_{amb}$ (°C)	26	26
$P_G$ (mmHg)	42	42
$P_{amb}$ (mmHg)	703,5	703,5
Peso do béquer (g)	102,59	104,52
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	102,90	104,83
$m_{LAMA}$ (g)	0,31	0,31
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	90,22	90,22

Tabela C.10 – Condições e resultados do teste 10

Condições	Teste 10	Teste 10 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	300	300
$L_G$ (cm)	6,5	6,5
$N_O$	3	3
$T_G$ (°C)	42	42
$T_{amb}$ (°C)	26	26
$P_G$ (mmHg)	41	41
$P_{amb}$ (mmHg)	690	690
Peso do béquer (g)	112,51	107,25
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	113,10	107,83
$m_{LAMA}$ (g)	0,59	0,58
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	57,79	56,81

Tabela C.11 – Condições e resultados do teste 11

Condições	Teste 11	Teste 11 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	600	600
$L_G$ (cm)	6,5	6,5
$N_O$	3	3
$T_G$ (°C)	35	35
$T_{amb}$ (°C)	23	23
$P_G$ (mmHg)	41	41
$P_{amb}$ (mmHg)	686	686
Peso do béquer (g)	254,09	105,09
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	254,42	105,42
$m_{LAMA}$ (g)	0,33	0,33
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	65,77	65,77

Tabela C.12 – Condições e resultados do teste 12

Condições	Teste 12	Teste 12 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	900	900
$L_G$ (cm)	6,5	6,5
$N_O$	3	3
$T_G$ (°C)	35	35
$T_{amb}$ (°C)	23	23
$P_G$ (mmHg)	41	41
$P_{amb}$ (mmHg)	686	686
Peso do béquer (g)	107,43	106,12
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	107,67	106,35
$m_{LAMA}$ (g)	0,24	0,23
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	69,85	66,94



Tabela C.13 – Condições e resultados do teste 13

Condições	Teste 13	Teste 13 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	300	300
$L_G$ (cm)	12,5	12,5
$N_O$	3	3
$T_G$ (°C)	36	36
$T_{amb}$ (°C)	23,5	23,5
$P_G$ (mmHg)	42	42
$P_{amb}$ (mmHg)	685,5	685,5
Peso do béquer (g)	110,58	110,40
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	111,20	111,02
$m_{LAMA}$ (g)	0,62	0,62
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	60,73	60,73

Tabela C.14 – Condições e resultados do teste 14

Condições	Teste 14	Teste 14 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	600	600
$L_G$ (cm)	12,5	12,5
$N_O$	3	3
$T_G$ (°C)	36	36
$T_{amb}$ (°C)	23,5	23,5
$P_G$ (mmHg)	42	42
$P_{amb}$ (mmHg)	685,5	685,5
Peso do béquer (g)	128,19	105,68
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	128,53	106,02
$m_{LAMA}$ (g)	0,34	0,34
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	67,76	67,76

Tabela C.15 – Condições e resultados do teste 15

Condições	Teste 15	Teste 15 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	900	900
$L_G$ (cm)	12,5	12,5
$N_O$	3	3
$T_G$ (°C)	36	36
$T_{amb}$ (°C)	23,5	23,5
$P_G$ (mmHg)	42	42
$P_{amb}$ (mmHg)	685,5	685,5
Peso do béquer (g)	109,19	104,56
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	109,43	104,80
$m_{LAMA}$ (g)	0,24	0,24
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	69,85	69,85

Tabela C.16 – Condições e resultados do teste 16

Condições	Teste 16	Teste 16 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	300	300
$L_G$ (cm)	18,5	18,5
$N_O$	3	3
$T_G$ (°C)	39	39
$T_{amb}$ (°C)	26	26
$P_G$ (mmHg)	42	42
$P_{amb}$ (mmHg)	703,5	703,5
Peso do béquer (g)	106,01	109,26
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	106,60	109,85
$m_{LAMA}$ (g)	0,59	0,59
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	57,79	57,79

Tabela C.17 – Condições e resultados do teste 17

Condições	Teste 17	Teste 17 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	600	300
$L_G$ (cm)	18,5	18,5
$N_O$	3	3
$T_G$ (°C)	39	39
$T_{amb}$ (°C)	26	26
$P_G$ (mmHg)	42	42
$P_{amb}$ (mmHg)	703,5	703,5
Peso do béquer (g)	106,13	104,27
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	106,51	104,66
$m_{LAMA}$ (g)	0,38	0,39
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	75,73	77,72

Tabela C.18 – Condições e resultados do teste 18

Condições	Teste 18	Teste 18 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	900	900
$L_G$ (cm)	18,5	18,5
$N_O$	3	3
$T_G$ (°C)	39	39
$T_{amb}$ (°C)	26	26
$P_G$ (mmHg)	42	42
$P_{amb}$ (mmHg)	703,5	703,5
Peso do béquer (g)	107,26	107,22
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	107,55	107,51
$m_{LAMA}$ (g)	0,29	0,29
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	84,4	84,4

Tabela C.19 – Condições e resultados do teste 19

Condições	Teste 19	Teste 19 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	300	300
$L_G$ (cm)	6,5	6,5
$N_O$	5	5
$T_G$ (°C)	38,5	38,5
$T_{amb}$ (°C)	23,5	23,5
$P_G$ (mmHg)	42	42
$P_{amb}$ (mmHg)	691	691
Peso do béquer (g)	107,29	110,42
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	107,82	110,93
$m_{LAMA}$ (g)	0,53	0,51
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	51,92	49,96

Tabela C.20 – Condições e resultados do teste 20

Condições	Teste 20	Teste 20 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	600	600
$L_G$ (cm)	6,5	6,5
$N_O$	5	5
$T_G$ (°C)	35	35
$T_{amb}$ (°C)	23	23
$P_G$ (mmHg)	41	41
$P_{amb}$ (mmHg)	686	686
Peso do béquer (g)	107,21	109,26
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	107,54	109,59
$m_{LAMA}$ (g)	0,33	0,33
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	65,77	65,77

Tabela C.21 – Condições e resultados do teste 21

Condições	Teste 21	Teste 21 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	900	900
$L_G$ (cm)	6,5	6,5
$N_O$	5	5
$T_G$ (°C)	38,5	38,5
$T_{amb}$ (°C)	23,5	23,5
$P_G$ (mmHg)	42	42
$P_{amb}$ (mmHg)	691	691
Peso do béquer (g)	107,24	110,54
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	107,48	110,78
$m_{LAMA}$ (g)	0,24	0,24
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	69,85	69,85

Tabela C.22 – Condições e resultados do teste 22

Condições	Teste 22	Teste 22 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	300	300
$L_G$ (cm)	12,5	12,5
$N_O$	5	5
$T_G$ (°C)	43	43
$T_{amb}$ (°C)	29	29
$P_G$ (mmHg)	40	40
$P_{amb}$ (mmHg)	690	690
Peso do béquer (g)	108,49	105,13
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	109,03	105,69
$m_{LAMA}$ (g)	0,54	0,56
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	52,89	54,85

Tabela C.23 – Condições e resultados do teste 23

Condições	Teste 23	Teste 23 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	600	600
$L_G$ (cm)	12,5	12,5
$N_O$	5	5
$T_G$ (°C)	43	43
$T_{amb}$ (°C)	29	29
$P_G$ (mmHg)	40	40
$P_{amb}$ (mmHg)	690	690
Peso do béquer (g)	106,06	107,30
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	106,40	107,64
$m_{LAMA}$ (g)	0,34	0,34
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	67,76	67,76

Tabela C.24 – Condições e resultados do teste 24

Condições	Teste 24	Teste 24 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	900	900
$L_G$ (cm)	12,5	12,5
$N_O$	5	5
$T_G$ (°C)	43	43
$T_{amb}$ (°C)	29	29
$P_G$ (mmHg)	40	40
$P_{amb}$ (mmHg)	690	690
Peso do béquer (g)	104,30	103,55
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	104,54	103,79
$m_{LAMA}$ (g)	0,24	0,24
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	69,85	69,85

Tabela C.25 – Condições e resultados do teste 25

Condições	Teste 25	Teste 25 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	300	300
$L_G$ (cm)	18,5	18,5
$N_O$	5	5
$T_G$ (°C)	43	43
$T_{amb}$ (°C)	28,5	28,5
$P_G$ (mmHg)	40	40
$P_{amb}$ (mmHg)	702,5	702,5
Peso do béquer (g)	105,65	110,56
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	106,35	111,22
$m_{LAMA}$ (g)	0,70	0,66
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	68,57	64,65

Tabela C.26 – Condições e resultados do teste 26

Condições	Teste 26	Teste 26 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	600	600
$L_G$ (cm)	18,5	18,5
$N_O$	5	5
$T_G$ (°C)	43	43
$T_{amb}$ (°C)	28,5	28,5
$P_G$ (mmHg)	40	40
$P_{amb}$ (mmHg)	702,5	702,5
Peso do béquer (g)	103,52	105,08
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	103,94	105,51
$m_{LAMA}$ (g)	0,42	0,43
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	83,70	85,70

Tabela C.27 – Condições e resultados do teste 27

Condições	Teste 27	Teste 27 réplica
Rotação do prato (rpm)	30	30
$V_G$ (m/s)	69,33	69,33
$Q_L$ (cm <sup>3</sup> /min)	900	900
$L_G$ (cm)	18,5	18,5
$N_O$	5	5
$T_G$ (°C)	43	43
$T_{amb}$ (°C)	28,5	28,5
$P_G$ (mmHg)	40	40
$P_{amb}$ (mmHg)	702,5	702,5
Peso do béquer (g)	112,47	106,70
(Peso do béquer + $m_{LAMA}$ ) (g)	112,79	107,01
$m_{LAMA}$ (g)	0,32	0,31
$\eta_{G(EXP)}$ (%)	93,13	90,22



APÊNDICE D – Valores de eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais

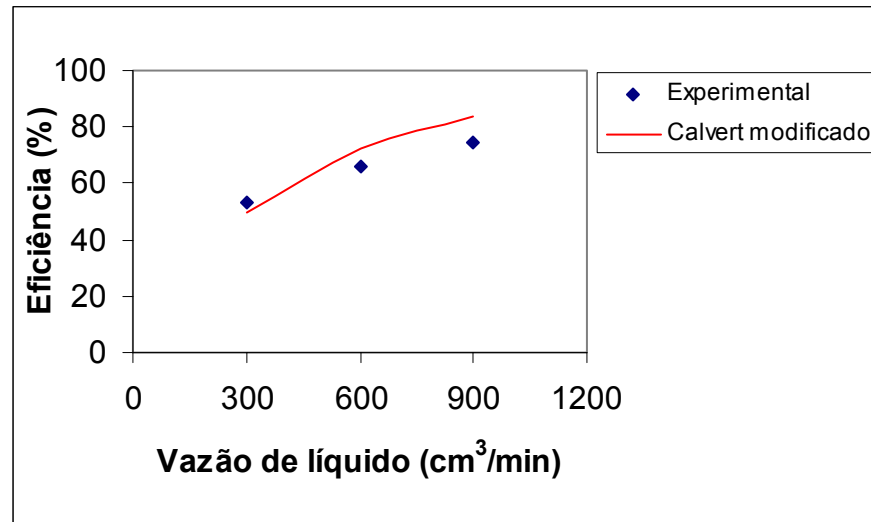


Figura D.1 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para  $V_G=58,66$  m/s e  $L_G=6,5$  cm

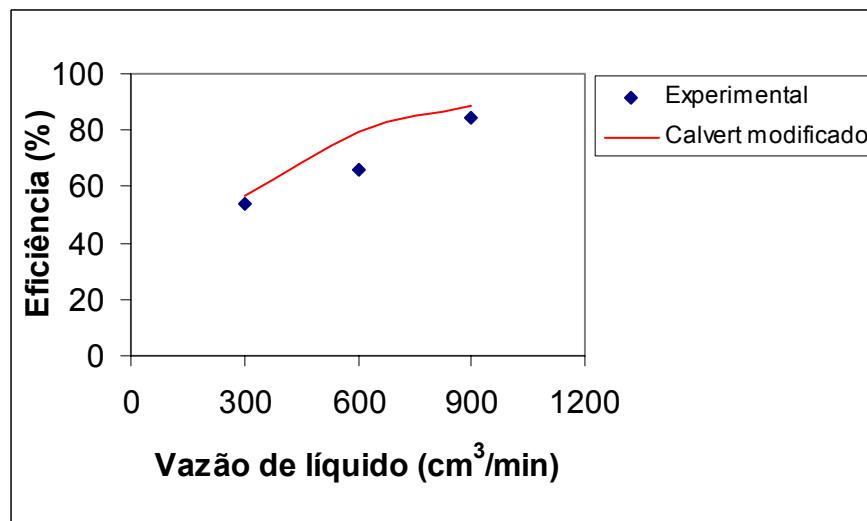


Figura D.2 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para  $V_G=58,66$  m/s e  $L_G=12,5$  cm

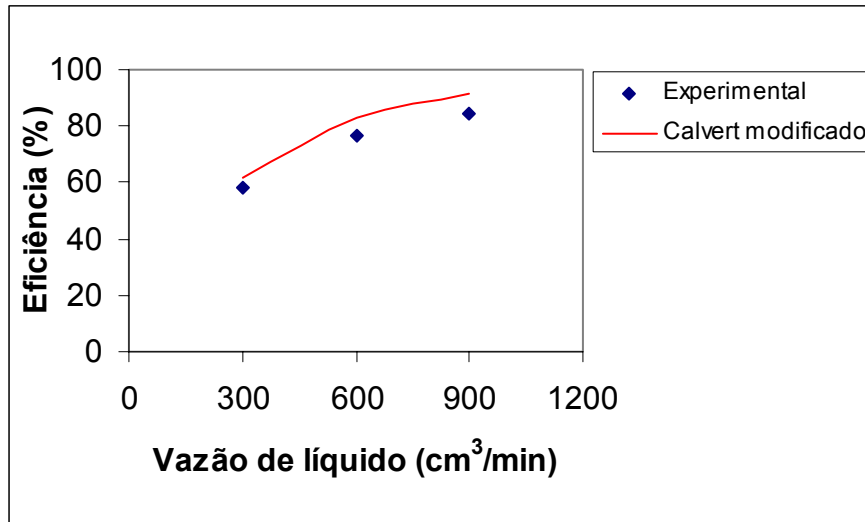


Figura D.3 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para  $V_G = 58,66$  m/s e  $L_G = 18,5$  cm

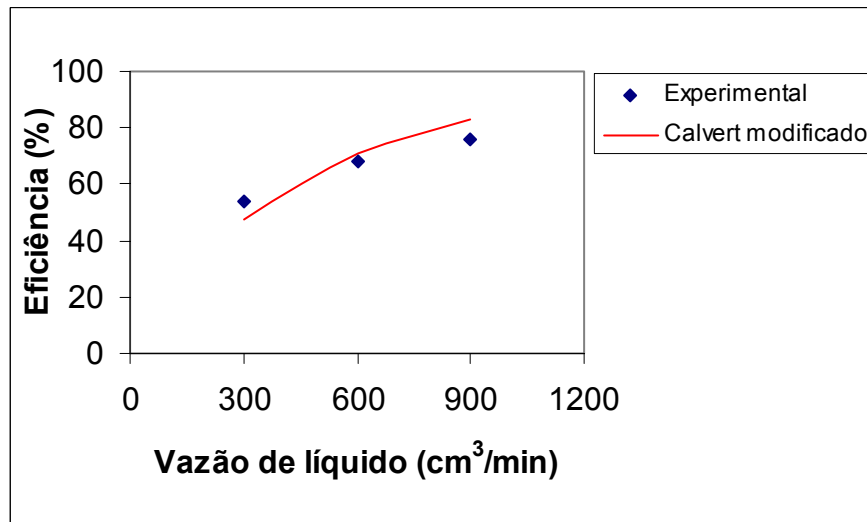


Figura D.4 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para  $V_G = 64$  m/s e  $L_G = 6,5$  cm

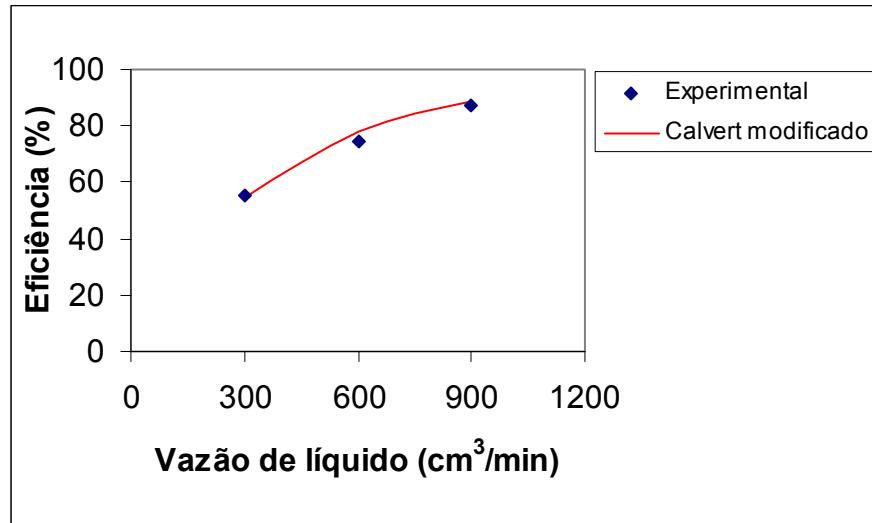


Figura D.5 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para  $V_G=64$  m/s e  $L_G=12,5$  cm

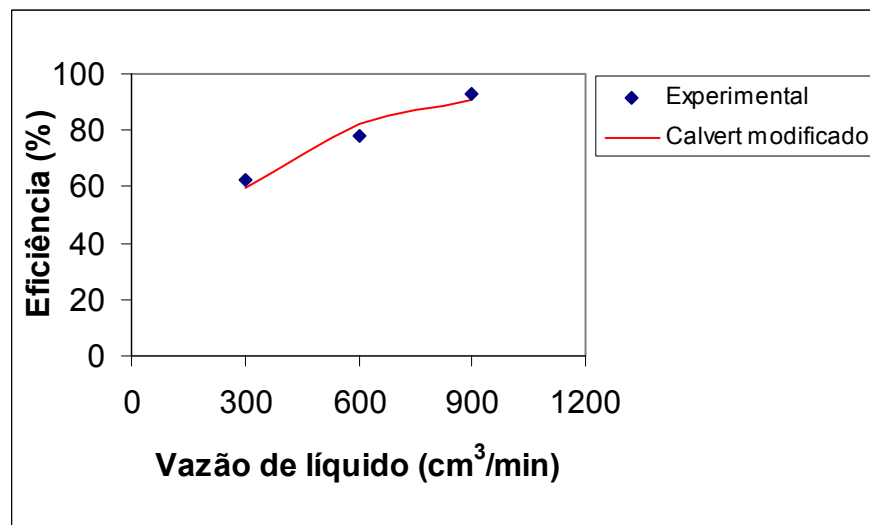


Figura D.6 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para  $V_G=64$  m/s e  $L_G=18,5$  cm

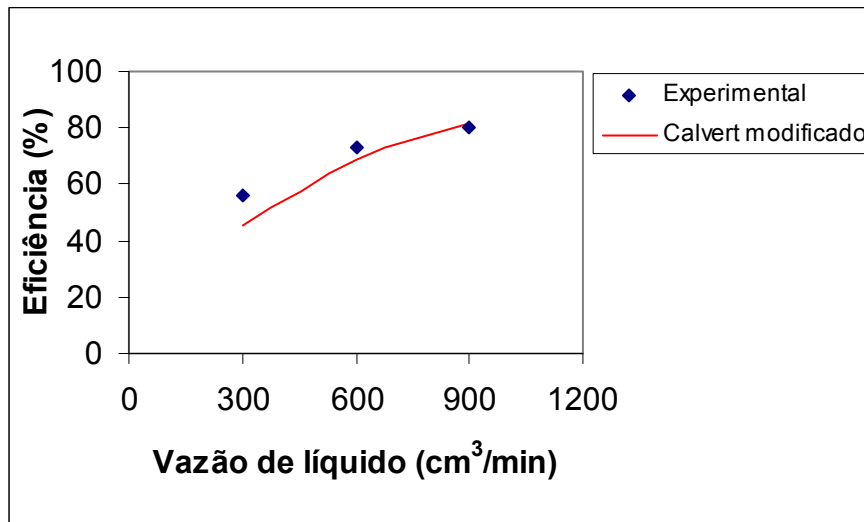


Figura D.7 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para  $V_G=69,33$  m/s e  $L_G=6,5$  cm

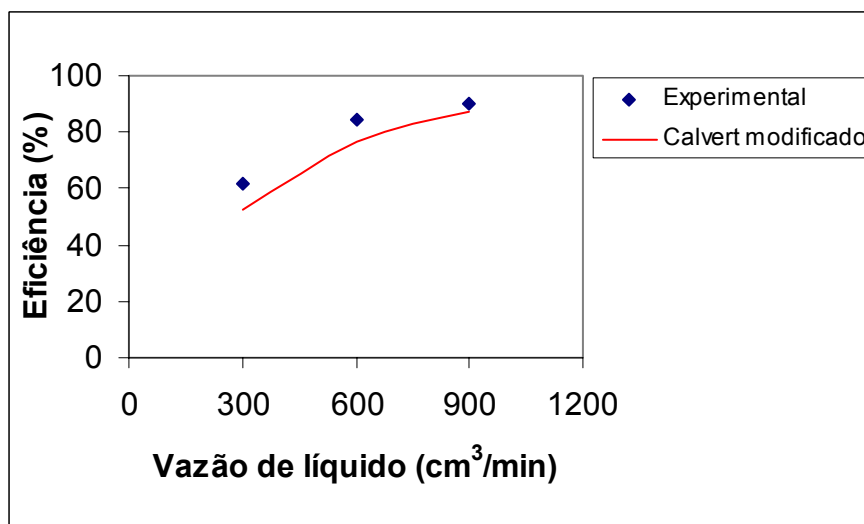


Figura D.8 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para  $V_G=69,33$  m/s e  $L_G=12,5$  cm

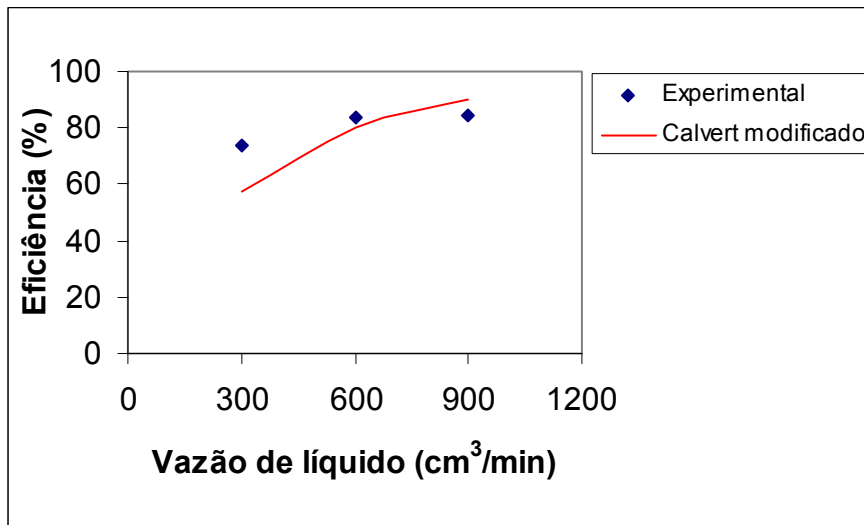


Figura D.9 – Comparação entre as eficiências geradas pelo modelo de Calvert modificado e os valores experimentais para  $V_G=69,33$  m/s e  $L_G=18,5$  cm