

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM UM LAVADOR VENTURI
DE SEÇÃO CIRCULAR**

RODOLFO GREGORI

São Carlos – SP
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM UM LAVADOR VENTURI
DE SEÇÃO CIRCULAR**

Rodolfo Gregori

Trabalho de graduação apresentado
ao Departamento de Engenharia
Química da Universidade Federal
de São Carlos.

Orientadora: Profa. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega

São Carlos – SP
2020

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 15 de dezembro de 2020, perante a seguinte banca examinadora:

Profª. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega
Departamento de Engenharia Química
Universidade Federal de São Carlos

Me. Alessandro Estarque de Oliveira
Departamento de Engenharia Química
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Ruy de Sousa Júnior
Departamento de Engenharia Química
Universidade Federal de São Carlos

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Gedinilso e Geralda, obrigado por toda a dedicação, incentivo, esforço e apoio, sempre presentes durante toda minha vida e ainda mais nessa etapa. Aos meus queridos irmãos, Estevan e Rafaela, pelas conversas, apoio e amizade. Sou grato por ter vocês em minha vida.

A todas as pessoas que passaram pela Republica Tijuana, que deixaram um pouco de si e levaram um pouco de mim também. Em especial, ao Nicholas Riggio e ao Paulo Vitor pela amizade e companheirismo durante este período.

Ao Lucas e a Letícia por toda amizade, companheirismo e apoio, certamente carregarei vocês a vida toda em meu coração. Vocês foram fundamentais durante essa etapa transformando os momentos ruins em momentos mais leves e descontraídos. Em especial, quero agradecer a Letícia pelo amor, carinho e compreensão, obrigado por estar presente em minha vida.

Fica aqui também meu agradecimento a todas as pessoas que contribuíram diretamente ou indiretamente nesta jornada.

A minha professora orientadora, Vádila, pelo suporte, dicas, conselhos e aprendizados proporcionados.

Agradeço, por fim, a UFSCar, pela infraestrutura disponibilizada e aos meus professores desse período e de toda vida, pelo aprendizado compartilhado.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo avaliar experimentalmente como o número de orifícios de injeção de líquido, a razão Gás-Líquido e a penetração do jato líquido afetam a perda de carga em lavador Venturi com seção circular. Analisou-se como a queda de pressão se comportava variando o número de orifícios de injeção do líquido de 3 para 6, a vazão do líquido de 250 mL/min até 1500 mL/min em intervalos de 250 mL/min e a velocidades do gás na garganta de 52.4, 61.4, 67.3 e 73.3 m/s. O líquido de lavagem utilizado nos experimentos foi a água, mantida à temperatura ambiente e o lavador Venturi utilizado de seção circular com diâmetro igual a 33 mm e comprimento da seção divergente de 86 mm. Os resultados experimentais confirmaram que o aumento da vazão de líquido provoca um aumento na queda de pressão devido à maior dissipação de energia. Além disso, o aumento da velocidade de gás injetado provoca uma diminuição da penetração do jato, devido ao aumento na força de arraste e que ao variar o número de orifícios de 3 para 6, os jatos tornavam-se menos penetrantes. Os resultados experimentais também foram comparados com modelos analíticos de YUNG *et al.* (1977) e CALVERT (1970), e se mostraram bastante coerentes. Entretanto, foi possível observar um distanciamento dos valores absolutos obtidos que pode ser justificado pelo fato dos modelos estabelecerem algumas hipóteses que não levam em consideração o número de orifícios de injeção e outros comportamentos.

ABSTRACT

This work aimed to experimentally evaluate how the number of liquid injection holes, the Gas-Liquid ratio and the penetration of the liquid jet affect the pressure drop in a Venturi scrubber with circular section. It was analyzed how the pressure drop behaved, varying the number of liquid injection holes from 3 to 6, the liquid flow from 250 mL / min to 1500 mL / min at intervals of 250 mL / min and at gas speeds at throat of 52.4, 61.4, 67.3 and 73.3 m / s. The washing liquid used in the experiments was water, kept at room temperature and the Venturi washer used with a circular section with a diameter equal to 33 mm and a divergent section length of 86 mm. The experimental results confirmed that the increase in liquid flow causes an increase in pressure drop due to greater energy dissipation. In addition, the increase in the velocity of the injected gas causes a decrease in the penetration of the jet, due to an increase in the drag force and that by varying the number of orifices from 3 to 6, the jets became less penetrating. The experimental results were also compared with analytical models by YUNG et al. (1977) and CALVERT (1970), and proved to be quite coherent. However, it was possible to observe a departure from the absolute values obtained that can be justified by the fact that the models establish some hypotheses that do not take into account the number of injection orifices and other behaviors.

Sumário

BANCA EXAMINADORA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Lavadores	3
2.2 Lavadores Venturi	5
2.3 Mecanismos de Coleta de Partículas em Lavadores	8
2.3.1 Impactação Inercial	8
2.3.2 Interceptação Direta	9
2.3.3 Difusão Browniana	10
2.4 Vantagens e Desvantagens de Lavadores Venturi	11
2.5 Parâmetros que Influenciam o Desempenho de um Lavador Venturi	12
2.6 Modelos Analíticos para a Queda de Pressão	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 O Líquido de Lavagem	19
3.2 O Aparato Experimental	19
3.3 Sistema de Injeção de Líquido e o Lavador Venturi	20
3.4 Planejamento Experimental	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
4.1 Testes Preliminares	24
4.2 Coleta de dados	32
5. CONCLUSÕES	50
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Vista esquemática de um lavador Venturi	6
Figura 2 - Mecanismo de coleta por impactação inercial	8
Figura 3- Mecanismo de coleta por interceptação direta	9
Figura 4 - Mecanismo de coleta por difusão browniana	10
Figura 5 - Ilustração do jato de líquido na garganta do lavador. (a) jato não atinge o centro, formando filme líquido na parede superior. (b) atomização com pouco filme líquido na região central da garganta. (c) jato excessivo com grande presença de filme líquido	13
Figura 6 - Variação da pressão do gás ao longo de um lavador Venturi	15
Figura 7 - Vista esquemática do sistema experimental.....	19
Figura 8 - Visão aproximada do sistema de injeção em um lavador Venturi.....	20
Figura 9 - Vista superior do lavador Venturi com a numeração adotada para cada orifício de injeção	21
Figura 10 - Vista frontal do lavador Venturi com a numeração adotada para cada ponto de pressão..	22
Figura 11 - Queda de pressão ao longo dos pontos de tomada de pressão com um valor de velocidade do gás na garganta fixo em 49,2 m/s	26
Figura 12 - Queda de pressão ao longo dos pontos de tomada de pressão com um valor de velocidade do gás na garganta fixo em 65,7 m/s	27
Figura 13 - Queda de pressão ao longo dos pontos de tomada de pressão com um valor de velocidade do gás na garganta fixo em 73,2 m/s	27
Figura 14 - Queda de pressão ao longo dos pontos de tomada de pressão com um valor de velocidade do gás na garganta fixo em 85,9 m/s	28
Figura 15 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado utilizando 3 e 6 orifícios com o valor mínimo de velocidade do gás na garganta fixado.....	30
Figura 16 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado utilizando 3 e 6 orifícios com o valor máximo de velocidade do gás na garganta fixado	30
Figura 17 - Queda de pressão em função da velocidade de ar na garganta com um valor de vazão de líquido injetado fixado em 250 mL/min	35
Figura 18 - Queda de pressão em função da velocidade de ar na garganta com um valor de vazão de líquido injetado fixado em 500 mL/min	35
Figura 19 - Queda de pressão em função da velocidade de ar na garganta com um valor de vazão de líquido injetado fixado em 750 mL/min	36
Figura 20 - Queda de pressão em função da velocidade de ar na garganta com um valor de vazão de líquido injetado fixado em 1000 mL/min.....	36
Figura 21 - Queda de pressão em função da velocidade de ar na garganta com um valor de vazão de líquido injetado fixado em 1250 mL/min.....	37

Figura 22 - Queda de pressão em função da velocidade de ar na garganta com um valor de vazão de líquido injetado fixado em 1500 mL/min.....	37
Figura 23 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado com um valor velocidade de ar na garganta fixado em 61,4 m/s	38
Figura 24 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado com um valor velocidade de ar na garganta fixado em 65,3 m/s	39
Figura 25 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado com um valor velocidade de ar na garganta fixado em 73,3 m/s	39
Figura 26 - Penetração máxima da linha central do jato em função da vazão de líquido injetada com 3 orifícios para cada valor de velocidade de ar na garganta fixado	40
Figura 27 - Penetração máxima da linha central do jato em função da vazão de líquido injetada com 6 orifícios para cada valor de velocidade de ar na garganta fixado	41
Figura 28 - Queda de pressão em função da penetração máxima da linha central do jato com 3 orifícios para cada valor de velocidade de ar na garganta fixado	43
Figura 29 - Queda de pressão em função da penetração máxima da linha central do jato com 6 orifícios para cada valor de velocidade de ar na garganta fixado	43
Figura 30 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado com a velocidade de ar na garganta fixada em 52m/s	46
Figura 31 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado com a velocidade de ar na garganta fixada em 61,4m/s	47
Figura 32 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado com a velocidade de ar na garganta fixada em 67,3m/s	47
Figura 33 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado com a velocidade de ar na garganta fixada em 73,3m/s	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões do lavador Venturi.....	20
Tabela 2 - Condições Experimentais adotadas nos experimentos.....	23
Tabela 3- Parâmetros experimentais adotados.....	24
Tabela 4 - Valores de velocidade no tubo e na garganta do lavador Venturi.....	25
Tabela 5 - Valores de altura manométrica e queda de pressão referente a cada velocidade do ar utilizada na garganta do lavador Venturi	25
Tabela 6 - Valores de queda de pressão ao longo dos pontos de tomada de pressão com um valor de velocidade de ar na garganta fixado	26
Tabela 7 - Valores de altura manométrica e queda de pressão utilizando 3 e 6 orifícios com o valor de velocidade mínima encontrada na varredura variando a vazão de líquido injetada	29
Tabela 8 - Valores de altura manométrica e queda de pressão utilizando 3 e 6 orifícios com o valor de velocidade máxima encontrada na varredura variando a vazão de líquido injetada	29
Tabela 9 - Valores de altura manométrica e queda de pressão utilizando 3 e 6 orifícios para a velocidade de 52,4 m/s fixada variando a vazão de líquido injetado no lavador Venturi.....	32
Tabela 10 - Valores de altura manométrica e queda de pressão utilizando 3 e 6 orifícios para a velocidade de 61,4 m/s fixada variando a vazão de líquido injetado no lavador Venturi.....	33
Tabela 11- Valores de altura manométrica e queda de pressão utilizando 3 e 6 orifícios para a velocidade de 67,3 m/s fixada variando a vazão de líquido injetado no lavador Venturi.....	33
Tabela 12 - Valores de altura manométrica e queda de pressão utilizando 3 e 6 orifícios para a velocidade de 73,3 m/s fixada variando a vazão de líquido injetado no lavador Venturi.....	34
Tabela 13 - Valores de penetração máxima da linha central do jato e fração de penetração do jato encontrados para cada vazão de líquido injetada, de acordo com a velocidade de ar na garganta fixada	40
Tabela 14 - Valores de queda de pressão e penetração máxima da linha central do jato encontrados para cada vazão de líquido injetada, de acordo com a velocidade de ar na garganta fixada.....	42
Tabela 15 - Valores de queda de pressão em função da vazão de líquido injetado, de acordo com a velocidade de ar na garganta fixada em 52,4m/s	44
Tabela 16 - Valores de queda de pressão em função da vazão de líquido injetado, de acordo com a velocidade de ar na garganta fixada em 61,4m/s	45
Tabela 17 - Valores de queda de pressão em função da vazão de líquido injetado, de acordo com a velocidade de ar na garganta fixada em 67,3m/s	45
Tabela 18 - Valores de queda de pressão em função da vazão de líquido injetado, de acordo com a velocidade de ar na garganta fixada em 73,3m/s	46

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a poluição atmosférica vem crescendo muito com o passar dos anos, principalmente com o avanço e desenvolvimento das indústrias e centros urbanos, já que tal avanço interfere diretamente na qualidade de vida de todos os seres vivos.

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

A Organização Mundial de Saúde (OMS) estima que cerca de sete milhões de pessoas morrem a cada ano devido à exposição a partículas finas em ar poluído, que penetram profundamente nos pulmões e no sistema cardiovascular, causando acidentes vasculares cerebrais, doenças cardíacas, câncer de pulmão, doenças pulmonares obstrutivas crônicas e infecções respiratórias, incluindo pneumonia.

Para manter os padrões da qualidade do ar foram estabelecidas diversas leis, normas e resoluções por órgãos como a OMS e o CONAMA, a fim de realizar o controle da poluição atmosférica emitida pelas indústrias.

Por conta disso, a necessidade de aplicar medidas sustentáveis que protejam o meio ambiente sem interferir no crescimento econômico se faz cada vez mais importante. Por esse motivo, métodos e equipamentos que realizem separação dos poluentes do ar de maneira eficiente e que não tenham um custo elevado associado estão cada vez mais sendo estudados, investidos e procurados pelas indústrias.

O rigor atual da legislação exige a utilização de equipamentos capazes de remover eficientemente partículas suspensas em efluentes gasosos. Dentre os diversos equipamentos existentes, um de grande aplicação industrial é o lavador de gases. Os lavadores de gases formam uma classe de aparelhos que usam um líquido (usualmente a água) para realizar a coleta de pós ou névoas. O lavador que será estudado nesse trabalho é do tipo 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 primeira instalação de um lavador Venturi em escala industrial ocorreu em 1947, sendo que a partir daí vem sendo utilizado em importantes aplicações como 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).

O lavador Venturi é constituído pela seção convergente, garganta e seção divergente. Geralmente na garganta são inseridos bocais ou orifícios para a injeção do líquido de lavagem.

A seção convergente é por onde ocorre a entrada do gás contaminado por particulados e sua aceleração. 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 coletoras de partículas. Na seção divergente do lavador ocorre a desaceleração do gás, com a conseqüente recuperação de energia na forma de queda de pressão. Tal queda está associada à dissipação de energia: a gasta para acelerar as gotas e também do atrito entre o gás e a superfície do filme formado nas paredes da garganta após a injeção do líquido.

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar experimentalmente como o número de orifícios de injeção de líquido, a razão Gás-Líquido e a penetração do jato líquido afetam a perda de carga em lavador Venturi com seção circular.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lavadores

O lavador de gases é um equipamento utilizado no controle de poluição do ar, cujo objetivo é a remoção do material particulado de um fluxo de gás, pela colisão destas partículas com gotas de um meio de lavagem. 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_2 , F_2 , HCl e NaCl gaseificado (GOMIDE, 1980).

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 μm . 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).

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 subsequentemente 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.

Os 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).

Existem diversas classificações para lavadores de gases, a seguir serão apresentadas algumas. Com relação à perda de carga, podem ser subdivididos em:

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

Calvert (1984) (apud Lora, 2002) propõe a seguinte classificação para os lavadores:

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

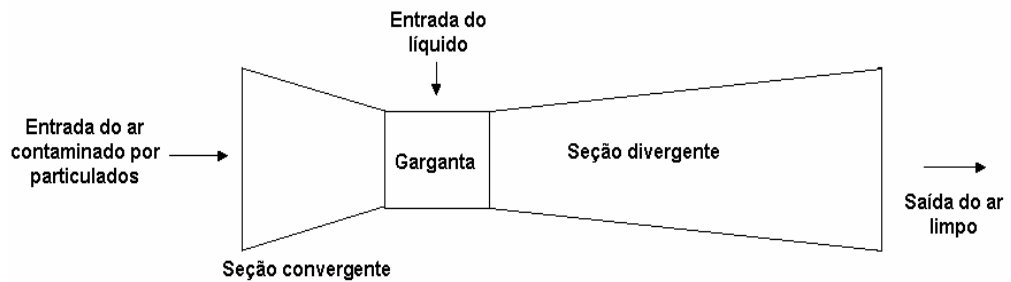
2.2 Lavadores Venturi

Dentre os lavadores de gases, os do tipo Venturi se destacam pela sua alta eficiência de coleta. Além disso, são equipamentos que podem remover partículas pequenas (tamanho $> 10 \mu\text{m}$) de correntes gasosas. (DULLIEN, 1989).

Os lavadores Venturi são robustos, simples e podem ser usados com ácidos e gases corrosivos, bem como partículas coesivas (MUIR, 1992). A habilidade no controle tanto de pó quanto de aerossóis faz com que ele tenha um grande campo de aplicações industriais (CHEREMISINOFF, 1993).

A configuração característica de um lavador Venturi inclui uma seção convergente, uma garganta e uma seção divergente. Na Figura 1, observa-se o esquema de um lavador Venturi.

Figura 1- Vista esquemática de um lavador Venturi



Fonte: Acervo Pessoal

A seção convergente fica no início do equipamento, e é por onde ocorre a entrada do gás contaminado por particulados e sua aceleração. Logo após a seção convergente, o gás adentra na garganta do equipamento, onde alcança sua maior velocidade podendo variar de 30 a 150m/s, sendo que neste local normalmente ocorre a injeção do líquido de lavagem através de orifícios localizados em sua parede. Em muitos casos este líquido é água ou outro composto que capture o contaminante do gás, como óleos ou soluções básicas, dependendo da natureza e afinidade do contaminante. Outra forma de realizar a injeção do líquido é na forma de um filme aderido às paredes do equipamento, para isso pode-se utilizar paredes porosas, vertedouros, ou sistemas de orifícios ou fendas para irrigar diretamente as paredes (GUERRA, 2009).

Ao passar pelos orifícios, o líquido assume a forma de jatos. A aceleração e desaceleração das gotas formadas é fruto da velocidade relativa entre o gás e as gotas, que permite o aparecimento de uma força de arraste sobre as gotas. Quando o gás perde energia de pressão, ele gera energia (cinética) suficiente tanto para atomizar o líquido na forma de *sprays* quanto para desacelerar as gotas (GOLÇALVES, 2002).

A atomização do líquido faz com que a sua área superficial aumente muito e isto, juntamente com a turbulência do escoamento e a alta velocidade do gás, facilita a transferência de massa entre o gás e o líquido, assim como a coleta do material particulado pelas gotas (GAMA, 2008).

Na seção divergente do lavador, sai o líquido de lavagem com o particulado coletado e o ar teoricamente limpo, desacelerado e com sua queda de pressão parcialmente recuperada. Após a seção divergente, um ciclone é utilizado para separar as gotas da corrente de ar, porém, este equipamento não afeta em nada a eficiência de coleta do lavador Venturi (JOHNSTONE, 1954 *apud* COSTA, 2002).

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

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

E em relação à forma de injeção do líquido no sistema como já foi dito, existem dois tipos principais de lavador: Pease-Anthony e Wetted Approach (PAK & CHANG, 2006, p. 560; SUN & AZZOPARDI, 2003, p. 250). No Venturi do tipo Pease-Anthony a água é injetada na garganta, tanto na direção do gás como na direção radial, e no Venturi do tipo Wetted Approach a injeção de líquido ocorre imediatamente antes da seção convergente na forma de filme d'água (SUN & AZZOPARDI, 2003, p. 250).

Estes são considerados uns dos mais eficientes tipos de lavadores, devido à sua alta performance de remoção de poluentes somada ao seu baixo custo, estrutura relativamente simples e compacta (AHMADVAND & TALAIE, 2010, p. 423; VISWANATHAN, 1997, p. 4308; SILVA et al., 2008b, p. 424; SUN & AZZOPARDI, 2003, p. 250) e a ausência de partes internas móveis (VISWANATHAN, 1997, p. 4308). Sua simplicidade de construção torna seus custos iniciais de investimento menores do que filtros de ar eletrostáticos e sua eficiência na remoção de partículas aderentes os tornam mais adequados a este uso do que filtros de manga (SILVA et al., 2008b, p. 424).

Outro tipo de lavador que também pertence à família do Venturi é o Ejector Venturi, e a principal característica e diferença dele em relação aos outros é que a corrente de ar que flui através dele é induzida, ou seja, ele não necessita de ventiladores em sua entrada (GAMISANS, 2001, p. 252).

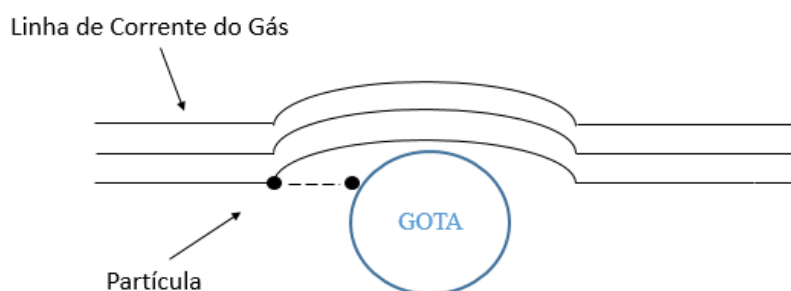
2.3 Mecanismos de Coleta de Partículas em Lavadores

A coleta do material particulado pelas gotas na garganta do lavador Venturi baseia-se em mecanismos básicos. Pode-se destacar a impactação inercial, a interceptação direta, a difusão browniana. É importante destacar que os mecanismos podem atuar simultaneamente durante a coleta.

2.3.1 Impactação Inercial

O mecanismo de impactação inercial é considerado o principal que ocorre em lavadores Venturi. As gotas recém-formadas, além de estarem praticamente paradas em relação ao gás, são, em média, maiores que as partículas de pó. As moléculas de gás leves, e, portanto, com menos quantidade de movimento desviam-se com facilidade das gotas ao se depararem com elas. Já, as partículas, com maior massa e inércia, não conseguem mudar rapidamente sua trajetória e chocam-se com alguma gota (GOLÇALVES, 2000). Esse comportamento pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 - Mecanismo de coleta por impactação inercial



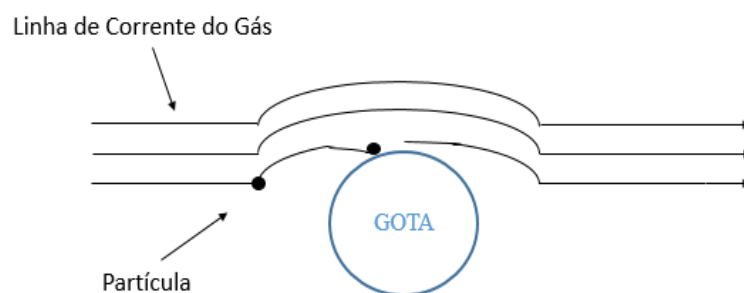
Fonte: Acervo Pessoal

Desta forma, partículas maiores são coletadas mais facilmente do que partículas menores devido à sua maior inércia e a eficiência de coleta aumenta à medida que a diferença da velocidade entre a partícula no gás e na gota aumenta. Para partículas com diâmetros maiores que $10\mu\text{m}$, este processo de coleta é bastante eficiente. A eficiência de impactação é diretamente proporcional a um parâmetro de impactação, que é igual à metade do número de Stokes e representa a força necessária para parar uma partícula movendo-se inicialmente a uma dada velocidade e a resistência apresentada pelo fluido (GOLÇALVES, 2000).

2.3.2 Intercepção Direta

A coleta por intercepção direta apresenta alta eficiência para partículas menores que $1\mu\text{m}$ e que devido a suas pequenas massas tendem a fluírem com o fluxo de gás. Estas partículas menores conseguem acompanhar o caminho das linhas de corrente, desviando-se da gota em seu caminho. Entretanto, mesmo que o centro de gravidade da partícula não tenha atingido a superfície da gota, a coleta acontece quando a linha de corrente estiver a uma distância da gota menor ou igual ao raio da partícula. Na Figura 3 é possível observar o comportamento descrito.

Figura 3- Mecanismo de coleta por intercepção direta

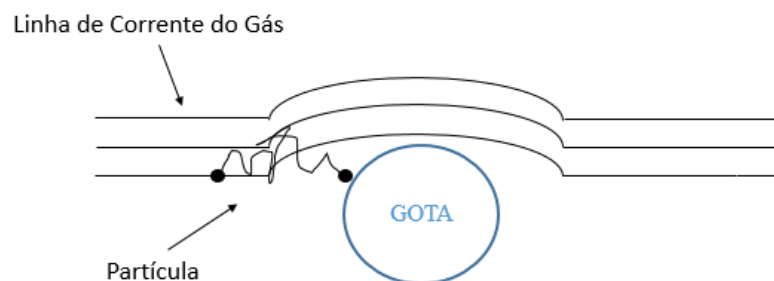


Fonte: Acervo Pessoal

2.3.3 Difusão Browniana

Este mecanismo é predominante para partículas muito pequenas, mais precisamente para um intervalo de tamanho de 0,01 a 0,1 μ m. Por conta de essas partículas serem tão pequenas, a ordem de grandeza delas aproxima-se do tamanho das moléculas do gás. Assim, em função de seu movimento irregular e aleatório, as partículas de pó chocam-se constantemente com as moléculas de gás e podem acabar colidindo com a gota. O esquema de funcionamento do mecanismo pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Mecanismo de coleta por difusão browniana



Fonte: Acervo Pessoal

Ainda existem processos de coleta de partículas como força centrífuga, de condensação, atração eletrostática e deposição gravitacional. A eficiência de cada um destes mecanismos depende do diâmetro das partículas e das gotas, das condições operacionais do lavador e da turbulência do sistema (MARTINS COSTA, 2002).

2.4 Vantagens e Desvantagens de Lavadores Venturi

Os lavadores Venturi quando comparados com outros equipamentos utilizados para a limpeza de gases apresentam algumas vantagens e desvantagens. Com relação às vantagens, pode-se citar:

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

Já algumas desvantagens são:

- Na maioria dos casos, necessita-se de um sistema de tratamento de efluentes líquidos;
- O material é coletado a úmido dificultando a sua reutilização;
- Alto consumo de energia, devido à alta queda de pressão global, surge a necessidade de sopradores potentes;
- Mais suscetível a problemas de corrosão;
- Perda de carga alta para altas eficiências de coleta;
- Pode apresentar problemas de incrustação.

2.5 Parâmetros que Influenciam o Desempenho de um Lavador Venturi

A eficiência dos lavadores Venturi pode ser influenciada por diversos fatores como:

- Razão Líquido gás (L/G);
- Tamanho de partícula a ser coletada;
- Comprimento da garganta;
- Penetração do jato líquido;
- Configuração geométrica do lavador;
- Perda de Carga;
- Dimensões e distribuição das gotas no interior do lavador;
- Distribuição e tamanho das gotas formadas;
- Número de orifícios na garganta do lavador.

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

Além disso, estudos apontam que a eficiência de coleta aumenta ao aumentar também a velocidade do gás na garganta, já que ocorre um acréscimo no número de gotas devido um aumento da atomização do jato líquido injetado, elevando o contato das gotas com as partículas (COSTA, 2000).

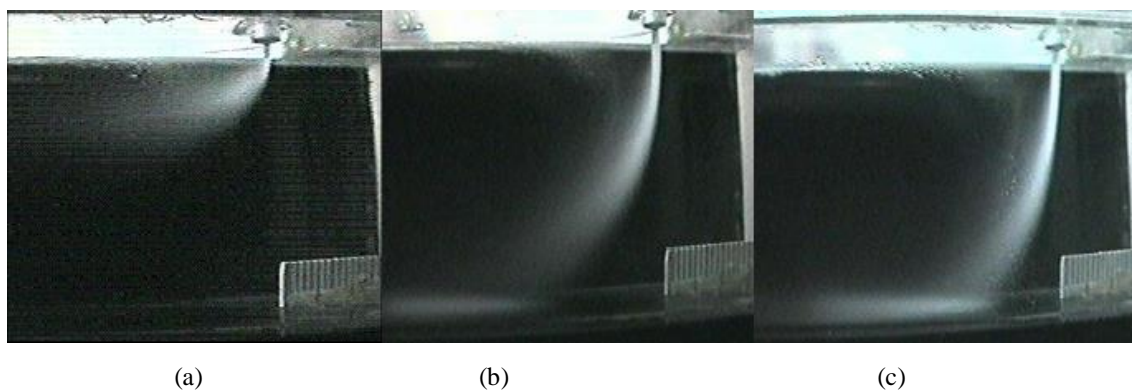
Em relação à vazão de líquido injetado, estudos mostram que essa variável influencia no tamanho das gotas. Além disso, maiores vazões geram jatos mais penetrantes na garganta e ocasionam maior interação entre o jato e a corrente de gás em alta velocidade, favorecendo a formação de gotas menores, o que em termos de eficiência de coleta não é tão interessante, pois gotas menores captam menos particulado (GUERRA 2009).

O tamanho das gotas aumenta com o aumento do número de orifícios em funcionamento, mantendo-se a vazão total de líquido constante, tal fato justifica-se pela interação entre os jatos e as baixas penetrações, as quais ocorrem quando a vazão de líquido é dividida por um número de orifícios em funcionamento (GUERRA, 2009).

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

Para a penetração do jato líquido, ou seja, a distância em que o líquido penetra na corrente gasosa antes da atomização, COSTA(2002) afirma que jatos curtos ou muito longos, insuficientes ou excessivos na garganta, ocasionam eficiência de coleta deficiente, além da formação de filmes líquidos na parede do lavador, os quais são ineficientes para a coleta das partículas e propiciam uma maior perda de carga durante o escoamento do gás. É preciso que esta penetração esteja dentro do limite da garganta do Venturi. A Figura 5 mostra três exemplos de penetração do líquido na garganta de um Venturi através de um orifício.

Figura 5 - Ilustração do jato de líquido na garganta do lavador. (a) jato não atinge o centro, formando filme líquido na parede superior. (b) atomização com pouco filme líquido na região central da garganta. (c) jato excessivo com grande presença de filme líquido



ADELBERG (1967) (apud VISWANATHA, 1983) definiu o comprimento da penetração do jato como a distância máxima que o jato líquido penetra transversalmente no fluxo de gás antes de se quebrar em gotas.

De acordo com a equação de VISWANATHAN et al. (1983), é possível calcular teoricamente a penetração do jato na garganta (l^*) do Venturi e a penetração máxima da linha central do jato (l^{**}) como:

$$l^* = \frac{0,075\rho_L V_j d_o}{\rho_G V_G} \quad (2.5.1)$$

$$l^{**} = \frac{0,1145\rho_L V_j d_o}{\rho_G V_G} \quad (2.5.2)$$

Sendo ρ_L a densidade do líquido, V_j a velocidade do jato (calculada pela Equação 2.5.3), d_o o diâmetro do orifício de injeção do líquido, ρ_G a densidade do gás e V_G é a velocidade do gás calculada como:

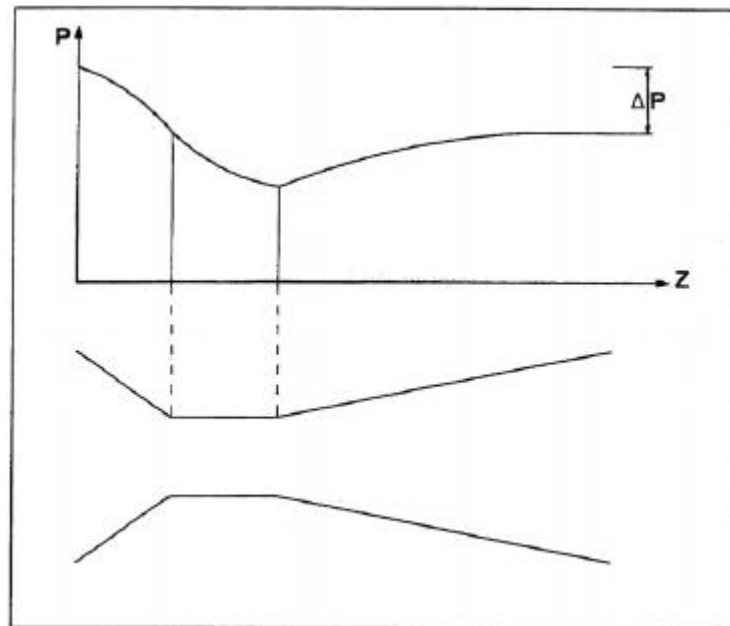
$$V_j = \frac{Q_l}{A_o} = \frac{Q_l}{N_o \frac{d_o^2}{4} \pi} \quad (2.5.3)$$

Sendo Q_L a vazão de líquido, A_o a área do orifício de injeção de líquido, e N_o o número de orifícios de injeção de líquido.

Em relação à perda de carga ou queda de pressão, a energia envolvida 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).

A Figura 6 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 6 - Variação da pressão do gás ao longo de um lavador Venturi



Fonte: GONÇALVES, 2000

O termo queda de pressão se refere à diferença de pressão do gás na entrada e saída do lavador Venturi. Pode ser calculado em um determinado ponto ou através da diferença entre dois pontos através das seguintes equações:

$$P = g h \rho_{H2O} \quad (2.5.4)$$

$$\Delta P = g \Delta h \rho_{H2O} \quad (2.5.5)$$

Sendo g a aceleração da gravidade ($9,81\text{m/s}^2$), h é a altura do líquido deslocado, ρ_{H2O} é a massa específica da água e P é a pressão hidrostática.

2.6 Modelos Analíticos para a Queda de Pressão

A fim de avaliar a queda de pressão em lavadores Venturi é necessário apresentar alguns modelos de previsão. Nesses modelos a previsão da queda de pressão é feita a partir de balanços de massa e energia, através de métodos tipicamente analíticos e por conta disso são classificados como modelos analíticos.

Seymour Calvert, ex-engenheiro da *US Environmental Protection Agency*, é um dos nomes mais conhecidos entre engenheiros que trabalhavam com controle de poluição atmosférica e, em especial, com lavadores de gases. Os modelos desenvolvidos por Calvert para queda de pressão e eficiência de coleta em lavadores Venturi tiveram grande influência no desenvolvimento da teoria destes equipamentos, e marcam a transição entre a predominância dos modelos experimentais e teóricos. Em pouco tempo, os modelos de Calvert ganharam a preferência dos projetistas de lavadores, fato este que continua verdadeiro ainda nos dias de hoje.

Calvert (1968, 1970, 1977a) identificou dois mecanismos para a perda de carga em lavadores Venturi: energia gasta com a) atrito sobre as superfícies estacionárias e b) aceleração do líquido. Segundo Calvert (1968, 1970, 1977a), as perdas devido ao atrito dependem muito da geometria do equipamento e por isso não podem ser facilmente calculadas por um modelo que pretenda ter utilidade ampla. Além disso, frequentemente, ainda segundo Calvert (1968, 1970, 1977a), a energia gasta com a aceleração do líquido é muito maior do que a energia perdida devido ao atrito. Com estes argumentos, Calvert (1968, 1970, 1977a) justificou a não inclusão do mecanismo de atrito em seu modelo. Desse modo é possível igualar a força necessária para mudar o momento do líquido com a perda de carga do equipamento:

$$Força = \frac{d(M_l V_l)}{dt} = -dPA \quad (2.6.1)$$

onde M_l e V_l são a massa e a velocidade do líquido respectivamente.

Calvert (1968, 1970, 1977a) não resolveu formalmente a Equação 2.6.1. Ao invés, explicitando como hipóteses apenas que todo o líquido é injetado a uma velocidade V_{l0} na direção do gás, e atinge finalmente a velocidade do gás na garganta V_g , propôs uma solução *aproximada e dimensional* (termos usados pelo próprio autor), sem detalhar os passos que o levaram a esta solução. Calvert (1968, 1977a) apresentou esta solução como:

$$-\Delta P = 1000(V_g - V_{l0})^2 \frac{Q_l}{Q_g} \quad (2.6.2)$$

Entretanto, em 1970, Calvert, assumindo explicitamente a hipótese da velocidade inicial nula para o líquido, apresentou a solução como:

$$-\Delta P = 1000V_g^2 \frac{Q_l}{Q_g} \quad (2.6.3)$$

Calvert (1968, 1970, 1977a) não atribuiu nenhum significado físico para a constante numérica que aparece nas Equações 2.6.2 e 2.6.3.

No trabalho de Yung *et al.* (1977), em que Calvert é co-autor, a Equação 2.6.1 foi resolvida formalmente. Para tanto, foram admitidas as seguintes hipóteses:

- O escoamento é unidimensional, ou seja, as velocidades só variam na direção do escoamento (direção axial), incompressível (as densidades dos fluidos permanecem constantes), e adiabático (não há troca de calor com o meio exterior);
- As vazões mássicas de líquido e gás são constantes, não existindo troca de massa entre as fases, seja por condensação ou evaporação;
- Toda a massa de líquido injetada é acelerada igualmente, ou seja, parte da mesma velocidade inicial e atinge a mesma velocidade final – na prática, no caso de lavadores Venturi, isto significa assumir que não há divisão de líquido entre “filme” e “gotas”, ou que todo o líquido está disponível na forma de gotas imediatamente após a injeção, e ainda que todas as gotas sejam iguais (tem mesmo diâmetro);
- A Equação 6 é integrada apenas na região da garganta do Venturi, isto é, assume-se que a injeção é efetuada na garganta e ao mesmo tempo despreza-se a variação de momento que o líquido sofre no difusor;
- A velocidade do gás é constante na garganta, e é calculada como se o gás ocupasse todo o volume disponível, ou seja, assume-se que a fração volumétrica ocupada pela fase líquida é desprezível;

- A velocidade final do líquido, atingida em algum ponto da garganta, normalmente ao final da mesma, é igual à velocidade do gás V_g .

Com estas hipóteses, YUNG *et al.* (1977) transformaram o balanço de momento expresso pela Equação 2.6.1 em:

$$dP = -\rho_l V_g \frac{Q_l}{Q_g} dV_d \quad (2.6.4)$$

onde a variável V_d substituiu a variável V_l da Equação 2.6.1, já que assumiu-se que todo o líquido está na forma de gotas. A integração da Equação 2.6.4 de V_{do} até V_g fornece:

$$-\Delta P_T = -\rho_l V_g (V_{g,th} - V_{do}) \frac{Q_l}{Q_g} \quad (2.6.5)$$

Assumindo que a velocidade inicial das gotas é nula, obtém-se a Equação 2.6.6, que é apresentada em YUNG *et al.* (1977) como a equação de Calvert para perda de carga em lavadores Venturi.

$$-\Delta P_T = -\rho_l V_g^2 \frac{Q_l}{Q_g} \quad (2.6.6)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 O Líquido de Lavagem

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

3.2 O Aparato Experimental

A Figura 7 apresenta uma vista esquemática do sistema experimental utilizado para a realização dos experimentos, constituído pelos seguintes dispositivos:

1. Soprador do tipo Kepler Webber R16Y de 7,5 cv;
2. Válvula para ajuste de vazão de ar;
3. Rotâmetro KI Key Instruments;
4. Instrumento de pressão diferencial Testo 510;
5. Tubo de Pitot;
6. Manômetros diferenciais nos quais a água era utilizada como líquido manométrico;
7. Lavador Venturi;
8. Ciclone do tipo Lapple;
9. Bomba peristáltica para bombeamento de líquido.

Figura 7 - Vista esquemática do sistema experimental



Fonte: Acervo Pessoal

3.3 Sistema de Injeção de Líquido e o Lavador Venturi

Foi utilizado um sistema de injeção do tipo orifício simples. O orifício estava localizado no início da garganta acoplado ao equipamento diretamente em sua parede. Assim, utilizando-se uma peça de injeção do tipo orifício simples a injeção ocorria na forma de jato. A Figura 8 mostra o lavador Venturi com o detalhe da injeção de líquido na garganta do equipamento.

Figura 8 - Visão aproximada do sistema de injeção em um lavador Venturi



Fonte: Acervo Pessoal

As dimensões do lavador Venturi utilizado estão descritos na Tabela 1:

Tabela 1- Dimensões do lavador Venturi

Grandeza	Unidade (mm)
Diâmetro de entrada e saída	35
Diâmetro da garganta	20
Distância do ponto de injeção menor	7,5
Distância do ponto de injeção intermediária	27,5
Distância do ponto de injeção maior	67,5
Comprimento da seção divergente	86

Fonte: Acervo Pessoal

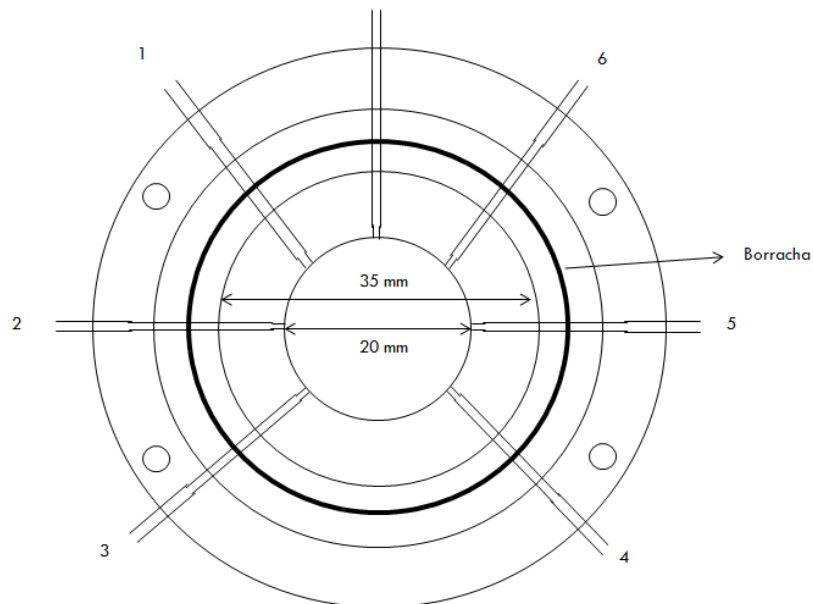
3.4 Planejamento Experimental

Primeiramente foram realizadas varreduras para avaliar o limite máximo e mínimo que poderiam ser operadas as vazões de água e ar com os quais seria possível realizar as medições de pressão e vazão com os aparatos disponíveis.

O procedimento realizado para avaliar os limites de vazão de ar consistiu em manter todos os orifícios de injeção de água estrangulados, e com o auxílio do instrumento de pressão diferencial, do tubo de Pitot e do manômetro, realizar as leituras de velocidade e de queda de pressão variando a velocidade através da válvula de vazão do ar.

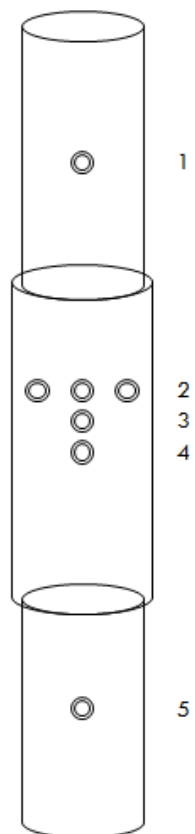
Para avaliar os limites de vazão de água o procedimento consistiu em ajustar os valores de vazão de água com o rotâmetro e ao mesmo tempo realizar as leituras de queda de pressão com o auxílio do manômetro, deixando a válvula de vazão de ar totalmente aberta. É importante ressaltar que, para essa varredura, foram utilizados três e seis orifícios de injeção e os pontos de tomada pressão 1 e 5. As configurações de injeção do líquido podem ser vistas na Figura 9 e os pontos de tomada de pressão na Figura 10.

Figura 9 - Vista superior do lavador Venturi com a numeração adotada para cada orifício de injeção



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 10 - Vista frontal do lavador Venturi com a numeração adotada para cada ponto de pressão



Fonte: Acervo Pessoal

3.5 Condições Experimentais

Após estabelecer os limites de vazão de ar e de água, iniciou-se a coleta de dados. As coletas foram realizadas com 3 e 6 orifícios, com as velocidades de ar iguais a 73,3, 67,3, 61,4 e 52,4 m/s, variando a vazão de água de 250 mL/min até 1500 mL/min em intervalos de 250mL.

O procedimento realizado para a coleta de dados foi análogo ao realizado para as varreduras. Para 3 orifícios, estrangulou-se os orifícios restantes, ajustou-se a vazão de água com o rotâmetro para o valor desejado e com o auxílio do tubo de Pitot regulou-se a vazão de ar do soprador, manipulando a válvula de ar. Em seguida, com o manômetro foram realizadas as coletas de pressão. As coletas foram realizadas em triplicata e os pontos de pressão utilizados foram o 1 e o 5, conforme a Figura 10.

As condições experimentais estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições Experimentais adotadas nos experimentos

Nº Orifícios	Vazão de Ar (m/s)	Vazão de Água (mL/min)
3	73,3	250
6	67,3	500
	61,4	750
	52,4	1000
		1250
		1500

Fonte: Acervo Pessoal

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Testes Preliminares

Para os cálculos da velocidade e queda de pressão foram adotados os seguintes parâmetros apresentados na Tabela 3.

Tabela 3- Parâmetros experimentais adotados

Garganta - Lavador Venturi	
D (mm)	20
A (m ²)	3,14E-04
T (°C)	20
ρ_{Ar} (Kg/m ³)	1,2013
ρ_{H2O} (Kg/m ³)	998,15
g (m/s ²)	9,81
Do (m)	0,001

Fonte: Acervo Pessoal

As varreduras com ar e com água foram realizadas para avaliar quais seriam os limites mínimo e máximo de velocidade que poderiam ser utilizados sem que ocorresse muitas variações na velocidade do tubo, já que o controle estava sendo realizado através da manipulação da válvula de ar do soprador. Além disso, foi avaliado se a variação da velocidade era linear com a pressão.

Os limites de velocidade do ar na garganta ficaram estabelecidos entre 49,9 m/s e 92,5 m/s, enquanto que os valores de pressão ficaram entre 421 Pa e 1439 Pa. Todos os pontos de pressão foram utilizados, a fim de avaliar quais apresentariam uma estabilidade maior durante a coleta de dados.

Na Tabela 4 é possível observar os dados de velocidade obtidos.

Tabela 4 - Valores de velocidade no tubo e na garganta do lavador Venturi

V_{itubo} (m/s)	V_{ftubo} (m/s)	V_{tubo} (m/s)	V_g (m/s)
16,1	16,8	16,5	49,2
17,2	17,9	17,6	52,5
18,8	19,4	19,1	57,2
20,9	21,6	21,3	63,6
21,7	22,2	22,0	65,7
23,5	24,1	23,8	71,2
24,1	24,8	24,5	73,2
25,5	26,3	25,9	77,5
26,5	27,3	26,9	80,5
27	27,8	27,4	82,0
28,3	29,1	28,7	85,9
29	29,9	29,5	88,1
30,5	31,3	30,9	92,5

Fonte: Acervo Pessoal

O maior desvio absoluto registrado foi de 0,9 m/s na velocidade da garganta, enquanto que o desvio relativo foi de 2,1% em relação ao valor utilizado para o cálculo da queda de pressão.

Enquanto que os dados de pressão estão expressos na Tabela 5:

Tabela 5 - Valores de altura manométrica e queda de pressão referentes a cada velocidade do ar utilizada na garganta do lavador Venturi

V_{itubo} (m/s)	h_1 (cm)	P_1 (Pa)	h_2 (cm)	P_2 (Pa)	h_3 (cm)	P_3 (Pa)	h_4 (cm)	P_4 (Pa)	h_5 (cm)	P_5 (Pa)	h_{15} (cm)	ΔP_{15} (Pa)
49,2	7,1	695,2	6,1	597,3	5,7	558,1	6,9	675,6	3,0	293,8	4,3	421,0
52,5	8	783,3	7,2	705,0	6,5	636,5	8,0	783,3	3,5	342,7	4,8	470,0
57,2	9,6	940,0	8,7	851,9	8,1	793,1	9,9	969,4	4,1	401,5	5,6	548,3
63,6	12,7	1243,6	11	1077,1	10,5	1028,1	12,6	1233,8	5,4	528,8	7,4	724,6
65,7	13,6	1331,7	12	1175,0	11,2	1096,7	13,8	1351,3	5,7	558,1	7,7	754,0
71,2	15	1468,8	13,5	1321,9	12,6	1233,8	15,3	1498,1	6,5	636,5	8,7	851,9
73,2	15,7	1537,3	14,4	1410,0	13,8	1351,3	16,1	1576,5	6,8	665,8	9,3	910,6
77,5	17,5	1713,6	15,8	1547,1	15,1	1478,6	18,0	1762,5	8,0	783,3	9,9	969,4
80,5	19,4	1899,6	17,6	1723,4	16,6	1625,4	20,2	1977,9	8,4	822,5	11,3	1.106,5
82,0	19,6	1919,2	17,7	1733,2	17,0	1664,6	20,4	1997,5	8,5	832,3	11,5	1.126,1
85,9	21,7	2124,8	19,7	1923,0	18,9	1850,7	22,7	2222,7	9,4	920,4	12,6	1.233,8
88,1	23,1	2261,9	21	2056,3	20,2	1977,9	23,9	2340,2	9,9	969,4	13,4	1.312,1
92,5	25	2448,0	22,7	2222,7	22,0	2154,2	26,2	2565,5	10,7	1047,7	14,7	1.439,4

Fonte: Acervo Pessoal

Outra análise realizada foi de como a pressão se comportava com um valor de velocidade fixo na garganta variando os pontos de tomada de pressão. O que foi observado foi um comportamento semelhante para todos os valores de velocidade fixados. O valor de queda de pressão está associado à dissipação de energia causada pela aceleração do gás na garganta e por consequência, conclui-se que quanto maior a vazão de ar utilizada maior será a dissipação de energia.

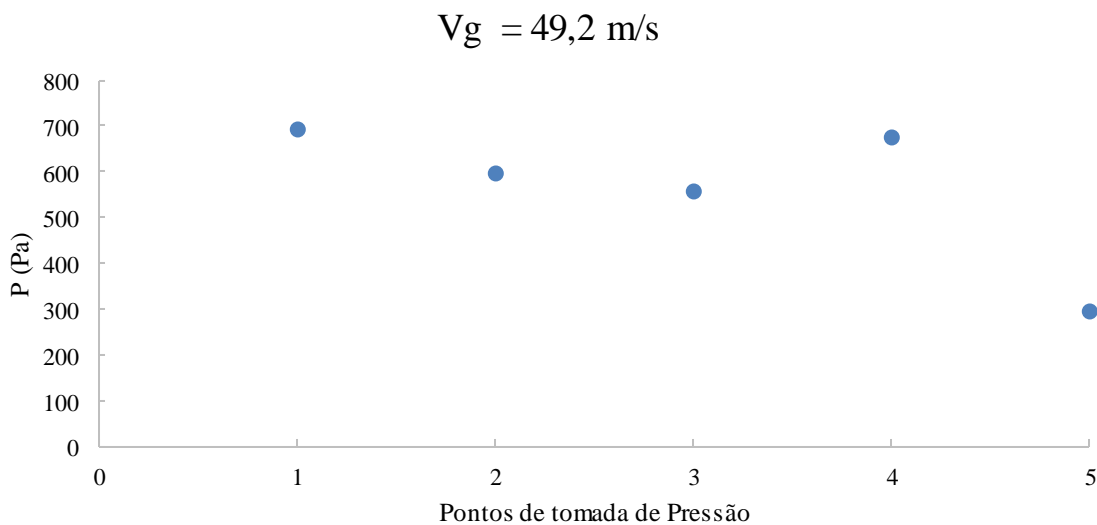
Os valores coletados de pressão estão na Tabela 6 e as Figuras 11, 12, 13 e 14 são referentes a cada velocidade fixada logo em seguida.

Tabela 6 - Valores de queda de pressão ao longo dos pontos de tomada de pressão com um valor de velocidade de ar na garganta fixado

Pontos de Pressão	Pressão (Pa)			
	$V_g = 49,2 \text{ m/s}$	$V_g = 65,7 \text{ m/s}$	$V_g = 73,2 \text{ m/s}$	$V_g = 85,9 \text{ m/s}$
1	695,2	1331,7	1537,3	2124,8
2	597,3	1175,0	1410,0	1929,0
3	558,1	1096,7	1351,3	1850,7
4	675,6	1351,3	1576,5	2222,7
5	293,8	558,1	665,8	920,4

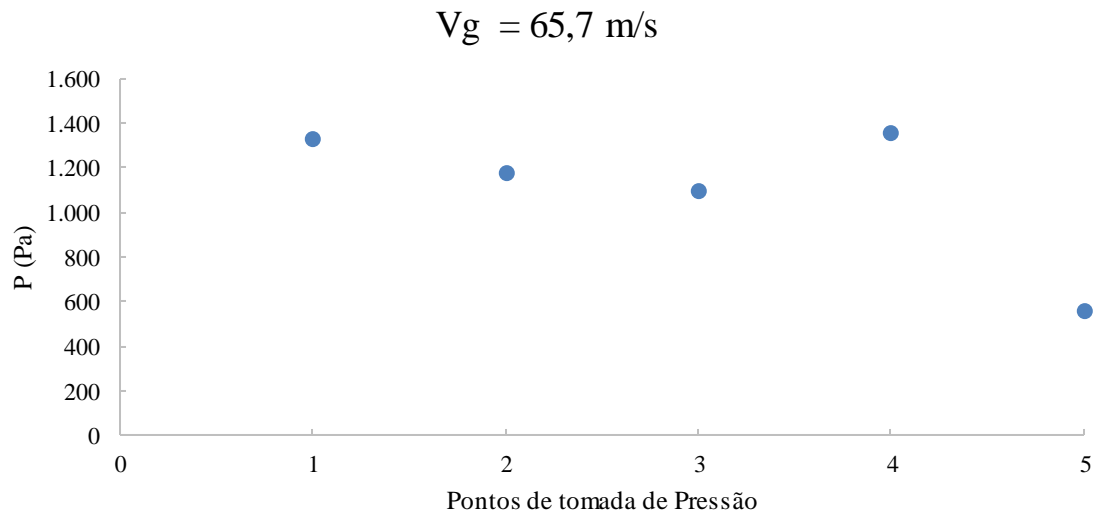
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 11 - Queda de pressão ao longo dos pontos de tomada de pressão com um valor de velocidade do gás na garganta fixo em 49,2 m/s



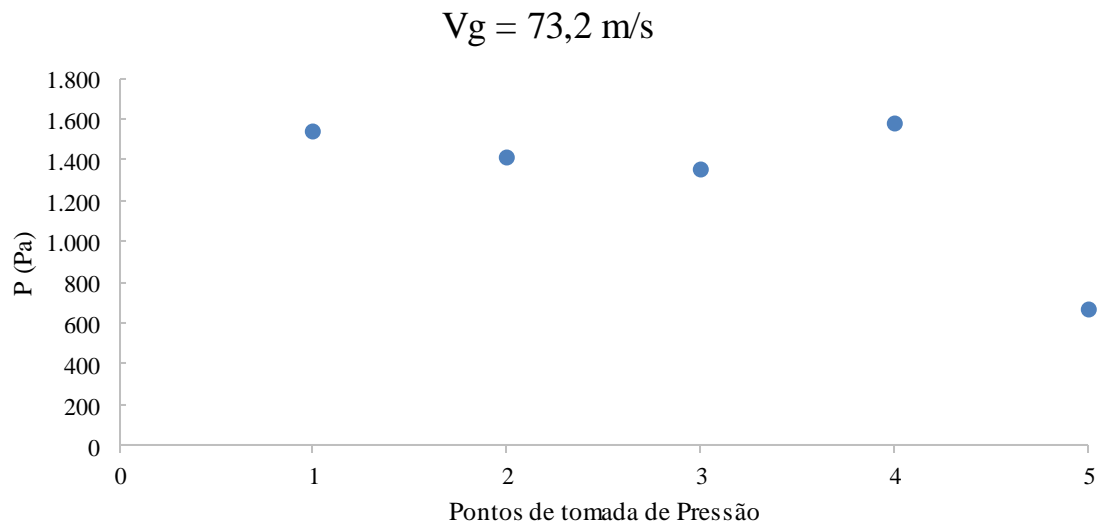
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 12 - Queda de pressão ao longo dos pontos de tomada de pressão com um valor de velocidade do gás na garganta fixo em 65,7 m/s



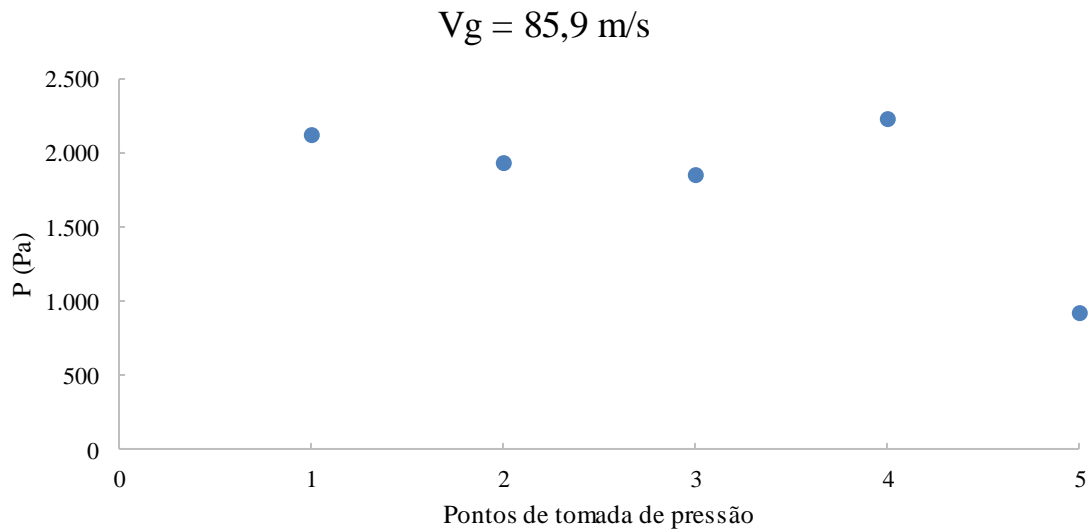
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 13 - Queda de pressão ao longo dos pontos de tomada de pressão com um valor de velocidade do gás na garganta fixo em 73,2 m/s



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 14 - Queda de pressão ao longo dos pontos de tomada de pressão com um valor de velocidade do gás na garganta fixo em 85,9 m/s



Fonte: Acervo Pessoal

É possível observar que os maiores registros de altura manométrica e consequentemente de queda de pressão foram no ponto de tomada de pressão 1 e o de menor no ponto de pressão 5, o que era esperado já que como o gás é acelerado na seção convergente, a pressão na corrente gasosa diminui até o menor valor da garganta.

Contudo como o ponto de pressão 4 não está localizado no final da garganta e dada a proximidade do ponto 5 com a mesma, o ponto 5 apresentou valores inferiores. 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. Além disso, as Figuras 11, 12, 13 e 14 apresentam o mesmo comportamento, indicando que os dados apresentam coerência com relação ao perfil de queda de pressão da literatura.

Referente à varredura com injeção de água, foi estabelecido que a injeção fosse realizada em três e seis orifícios, com as velocidades mínima e máxima do ar na garganta (73,3 m/s e 52,4m/s) variando a quantidade de água injetada de 250 mL/min até 1500 mL/min.

Nas Tabelas 7 e 8, estão os valores coletados de pressão e velocidade e nas Figuras 15 e 16 os comportamentos observados.

Tabela 7 - Valores de altura manométrica e queda de pressão utilizando 3 e 6 orifícios com o valor de velocidade mínima encontrada na varredura variando a vazão de líquido injetada

	$V_{i_{tubo}}$	$V_{f_{tubo}}$	V_{tubo} (m/s)	V_g (m/s)	h_{15} (cm)	ΔP_{15} (Pa)	Q_L (mL/min)
3 Orifícios	17	18	17,5	52,4	6,4	626,68	250
					11,8	1155,43	500
					15,5	1517,73	750
					19,4	1899,61	1000
					23,6	2310,87	1250
					26,7	2614,41	1500
6 Orifícios	17	18	17,5	52,4	6,4	626,68	250
					9,9	969,39	500
					14,9	1458,98	750
					18,4	1801,69	1000
					23,4	2291,28	1250
					26,9	2634,00	1500

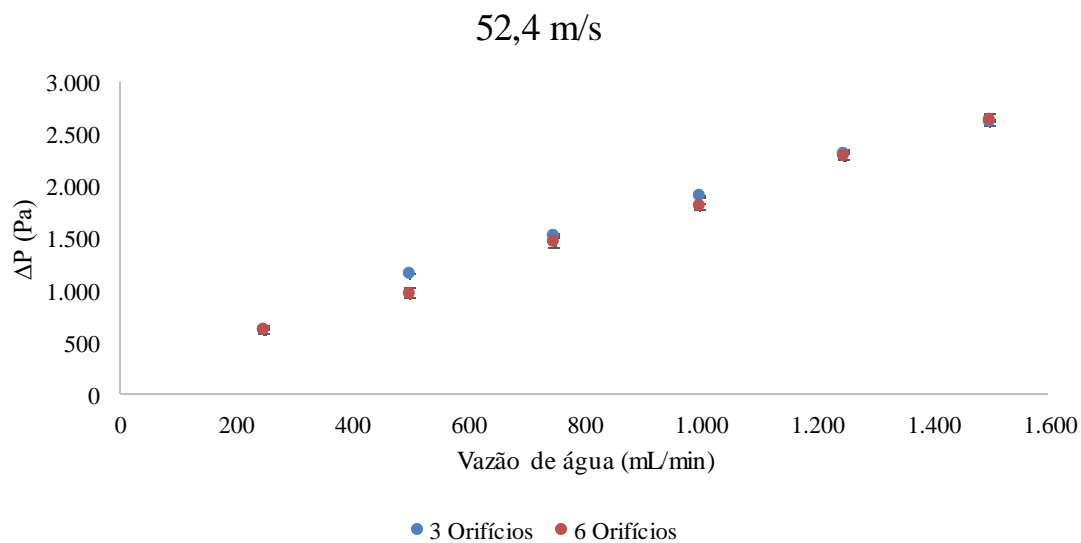
Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 8 - Valores de altura manométrica e queda de pressão utilizando 3 e 6 orifícios com o valor de velocidade máxima encontrada na varredura variando a vazão de líquido injetada

	$V_{i_{tubo}}$	$V_{f_{tubo}}$	V_{tubo} (m/s)	V_g (m/s)	h_{15} (cm)	ΔP_{15} (Pa)	Q_L (mL/min)
3 Orifícios	24	25	24,5	73,3	12,4	1214,18	250
					18,2	1782,11	500
					27,5	2692,75	750
					32,5	3182,34	1000
					39,2	3838,39	1250
					43,6	4269,23	1500
6 Orifícios	24	25	24,5	73,3	11,2	1096,68	250
					16,7	1635,23	500
					23,5	2301,08	750
					29,7	2908,17	1000
					35,8	3505,47	1250
					42,4	4151,73	1500

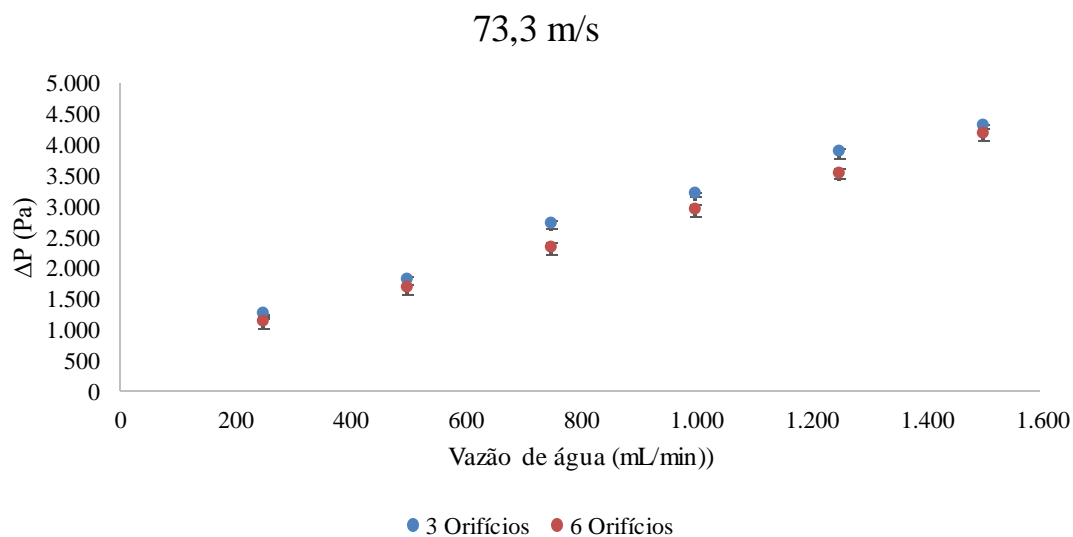
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 15 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado utilizando 3 e 6 orifícios com o valor mínimo de velocidade do gás na garganta fixado



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 16 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado utilizando 3 e 6 orifícios com o valor máximo de velocidade do gás na garganta fixado



Fonte: Acervo Pessoal

Semelhante aos testes de realizados com ar, um comportamento linear foi observado com valores de R^2 iguais a 0,99.

Através das Figuras 15 e 16 é possível concluir que a velocidade do gás na garganta é diretamente proporcional à queda de pressão, ou seja, quanto maior a velocidade do gás na garganta maior será a queda de pressão, já que a força de arraste aumenta com o aumento da velocidade.

Como apresentado na tese de Gonçalves sobre “Aspectos da Modelagem Matemática de Lavadores Venturi”, a perda de carga depende da energia gasta para acelerar as gotas e também do atrito entre o gás e a superfície do filme. Por conta disso, o aumento da vazão de líquido injetado provoca um aumento da queda de pressão, já que uma fração das gotas formadas atinge as paredes do equipamento, depositando-se e formando um filme. Enquanto que o aumento da velocidade provoca um aumento da energia cinética das partículas e consequentemente uma maior quantidade de dissipação de energia.

É importante ressaltar que Gonçalves (2000) e Gonçalves et al. (2000, 2004) mostraram que o aumento da velocidade de gás diminui a fração de filme. O efeito do aumento da velocidade do gás na turbulência do meio deveria aumentar a deposição por difusão. Contudo, ao mesmo tempo, as gotas são rapidamente aceleradas, passando pela garganta em menor tempo, e, portanto, elas apresentam menor tempo para se depositarem. Assim, um efeito compensa o outro.

4.2 Coleta de dados

As coletas dos dados experimentais foram realizadas com 3 e 6 orifícios, com as velocidades de ar na garganta iguais a 52,4, 61,4, 67,3 e 73,3 m/s, variando a vazão de água de 250 mL/min até 1500 mL/min em intervalos de 250mL/min.

Nas tabelas 9, 10, 11 e 12 estão os valores registrados de altura manométrica e queda de pressão respectivamente para cada valor de vazão de água. As medidas foram realizadas em triplicata.

Tabela 9 - Valores de altura manométrica e queda de pressão utilizando 3 e 6 orifícios para a velocidade de 52,4 m/s fixada variando a vazão de líquido injetado no lavador Venturi

Nº Orifícios	V _{tubo} (m/s)	V _{f_{tubo}} (m/s)	V _{tubo} (m/s)	V _g (m/s)	Q _L (mL/min)	h ₁₅ (cm)	ΔP ₁₅ (Pa)	h ₁₅ (cm)	ΔP ₁₅ (Pa)	h ₁₅ (cm)	ΔP ₁₅ (Pa)	Média ΔP ₁₅ (Pa)	DP
3	17,0	18,0	17,5	52,4	250,0	6,4	626,7	6,2	607,1	6,4	626,7	620,1	11,3
					500,0	11,8	1.155,4	11,6	1.135,9	11,7	1.145,6	1.145,6	9,8
					750,0	15,5	1.517,7	15,4	1.507,9	15,7	1.537,3	1.521,0	15,0
					1.000,0	19,4	1.899,6	19,1	1.870,2	19,2	1.880,0	1.883,3	15,0
					1.250,0	23,6	2.310,9	23,5	2.301,1	23,4	2.291,3	2.301,1	9,8
					1.500,0	26,7	2.614,4	26,8	2.624,2	26,5	2.594,8	2.611,1	15,0
6	17,0	18,0	17,5	52,4	250,0	6,4	626,7	5,2	509,2	5,6	548,3	561,4	59,8
					500,0	9,9	969,4	8,4	822,5	8,9	871,5	887,8	74,8
					750,0	14,9	1.459,0	13,6	1.331,7	13,8	1.351,3	1.380,6	68,5
					1.000,0	18,4	1.801,7	17,6	1.723,4	17,9	1.752,7	1.759,3	39,6
					1.250,0	23,4	2.291,3	22,1	2.164,0	22,5	2.203,2	2.219,5	65,2
					1.500,0	26,9	2.634,0	25,8	2.526,3	25,7	2.516,5	2.558,9	65,2

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 10 - Valores de altura manométrica e queda de pressão utilizando 3 e 6 orifícios para a velocidade de 61,4 m/s fixada variando a vazão de líquido injetado no lavador Venturi

Nº Orifícios	V _{itubo} (m/s)	V _{ftubo} (m/s)	V _{tubo} (m/s)	V _g (m/s)	Q _L (mL/min)	h ₁₅ (cm)	ΔP ₁₅ (Pa)	h ₁₅ (cm)	ΔP ₁₅ (Pa)	h ₁₅ (cm)	ΔP ₁₅ (Pa)	Média ΔP ₁₅ (Pa)	DP
3	20	21	20,5	61,4	250,0	4,1	401,5	4,0	391,7	3,9	381,9	391,7	9,8
					500,0	8,5	832,3	9,2	900,8	8,3	812,7	848,6	46,3
					750,0	13,4	1.312,1	13,2	1.292,5	12,5	1.224,0	1.276,2	46,3
					1.000,0	18,3	1.791,9	20,7	2.026,9	18,9	1.850,7	1.889,8	122,3
					1.250,0	23,1	2.261,9	24,6	2.408,8	23,5	2.301,1	2.323,9	76,1
					1.500,0	26,9	2.634,0	26,7	2.614,4	25,9	2.536,1	2.594,8	51,8
6	20	21	20,5	61,4	250,0	4,9	479,8	4,2	411,3	4,0	391,7	427,6	46,3
					500,0	7,5	734,4	8,3	812,7	7,9	773,6	773,6	39,2
					750,0	11,5	1.126,1	12,9	1.263,1	12,6	1.233,8	1.207,7	72,2
					1.000,0	16,5	1.615,6	18,4	1.801,7	16,2	1.586,3	1.667,9	116,8
					1.250,0	21,4	2.095,4	22,4	2.193,4	21,2	2.075,9	2.121,6	63,0
					1.500,0	24,9	2.438,2	26,6	2.604,6	24,3	2.379,4	2.474,1	116,8

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 11- Valores de altura manométrica e queda de pressão utilizando 3 e 6 orifícios para a velocidade de 67,3 m/s fixada variando a vazão de líquido injetado no lavador Venturi

Nº Orifícios	V _{itubo}	V _{ftubo}	V _{tubo} (m/s)	V _g (m/s)	Q _L (mL/min)	h ₁₅ (cm)	ΔP ₁₅ (Pa)	h ₁₅ (cm)	ΔP ₁₅ (Pa)	h ₁₅ (cm)	ΔP ₁₅ (Pa)	Média ΔP ₁₅ (Pa)	DP
3	22,0	23,0	22,5	67,3	250,0	5,9	577,7	4,5	440,6	4,3	421,0	479,8	85,4
					500,0	11,4	1.116,3	11,0	1.077,1	10,0	979,2	1.057,5	70,6
					750,0	16,4	1.605,9	17,9	1.752,7	15,9	1.556,9	1.638,5	101,9
					1.000,0	20,9	2.046,5	20,6	2.017,1	20,7	2.026,9	2.030,2	15,0
					1.250,0	26,2	2.565,5	27,4	2.683,0	26,9	2.634,0	2.627,5	59,0
					1.500,0	32,9	3.221,5	31,5	3.084,4	31,1	3.045,3	3.117,1	92,5
6	22,0	23,0	22,5	67,3	250,0	4,5	440,6	4,0	391,7	4,1	401,5	411,3	25,9
					500,0	7,7	754,0	7,4	724,6	7,9	773,6	750,7	24,6
					750,0	12,9	1.263,1	13,6	1.331,7	13,0	1.272,9	1.289,3	37,1
					1.000,0	17,6	1.723,4	17,8	1.742,9	17,9	1.752,7	1.739,7	15,0
					1.250,0	23,4	2.291,3	24,5	2.399,0	24,3	2.379,4	2.356,6	57,4
					1.500,0	29,1	2.849,4	28,7	2.810,3	28,9	2.829,8	2.829,8	19,6

Fonte: Acervo Pessoal

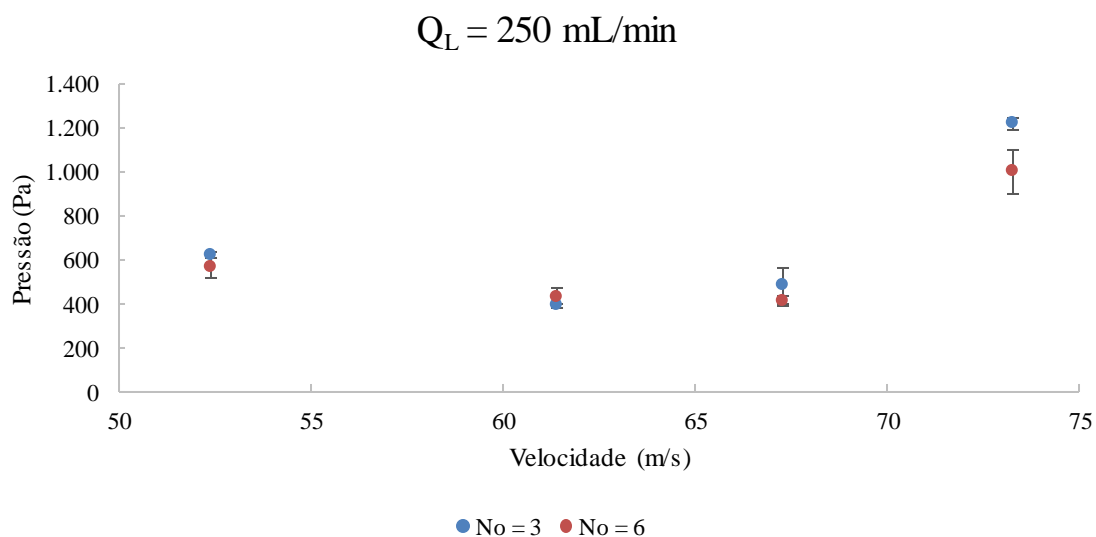
Tabela 12 - Valores de altura manométrica e queda de pressão utilizando 3 e 6 orifícios para a velocidade de 73,3 m/s fixada variando a vazão de líquido injetado no lavador Venturi

Nº Orifícios	$V_{i\text{tubo}}$	$V_{f\text{tubo}}$	V_{tubo} (m/s)	V_g (m/s)	Q_L (mL/min)	h_{15} (cm)	ΔP_{15} (Pa)	h_{15} (cm)	ΔP_{15} (Pa)	h_{15} (cm)	ΔP_{15} (Pa)	Média ΔP_{15} (Pa)	DP
3	24,0	25,0	24,5	73,3	250,0	12,4	1.214,2	12,7	1.243,6	12,1	1.184,8	1.214,2	29,4
					500,0	18,2	1.782,1	20,0	1.958,4	19,2	1.880,0	1.873,5	88,3
					750,0	27,5	2.692,7	27,9	2.731,9	26,1	2.555,7	2.660,1	92,5
					1.000,0	32,5	3.182,3	33,4	3.270,5	33,2	3.250,9	3.234,6	46,3
					1.250,0	39,2	3.838,4	41,3	4.044,0	40,2	3.936,3	3.939,6	102,9
					1.500,0	43,6	4.269,2	42,8	4.190,9	43,1	4.220,3	4.226,8	39,6
6	24,0	25,0	24,5	73,3	250,0	11,2	1.096,7	10,2	998,8	9,2	900,8	998,8	97,9
					500,0	16,7	1.635,2	14,4	1.410,0	15,0	1.468,8	1.504,7	116,8
					750,0	23,5	2.301,1	21,1	2.066,1	21,9	2.144,4	2.170,5	119,7
					1.000,0	29,7	2.908,2	27,3	2.673,2	28,4	2.780,9	2.787,4	117,6
					1.250,0	35,8	3.505,5	33,9	3.319,4	34,2	3.348,8	3.391,2	100,0
					1.500,0	42,4	4.151,7	40,2	3.936,3	40,8	3.995,1	4.027,7	111,4

Fonte: Acervo Pessoal

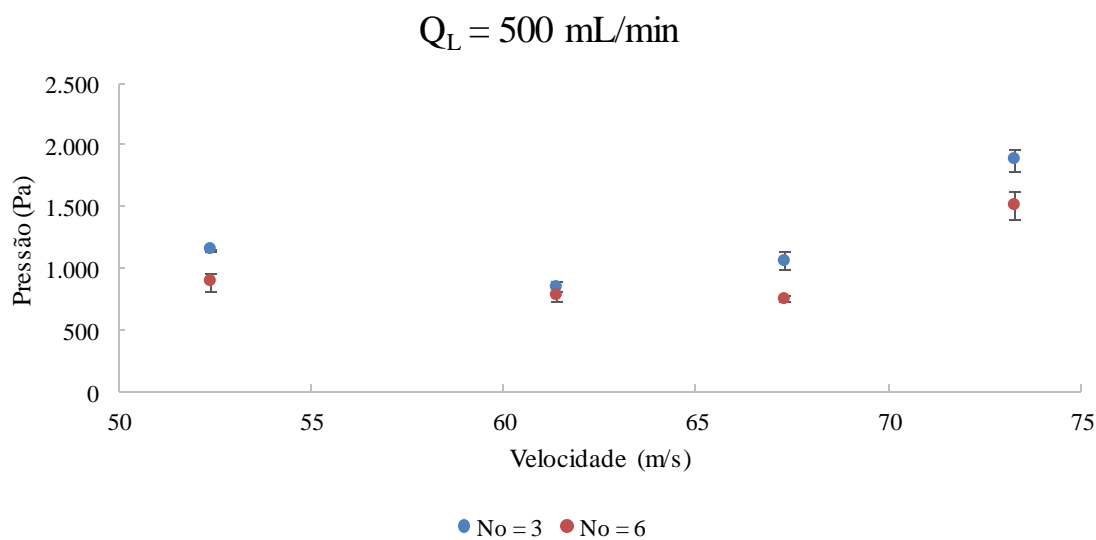
Nas figuras 17, 18, 19, 20, 21 e 22 têm-se a queda de pressão em função da velocidade de ar na garganta com valores de vazão de líquido injetado fixado.

Figura 17 - Queda de pressão em função da velocidade do ar na garganta com um valor de vazão de líquido injetado fixado em 250 mL/min



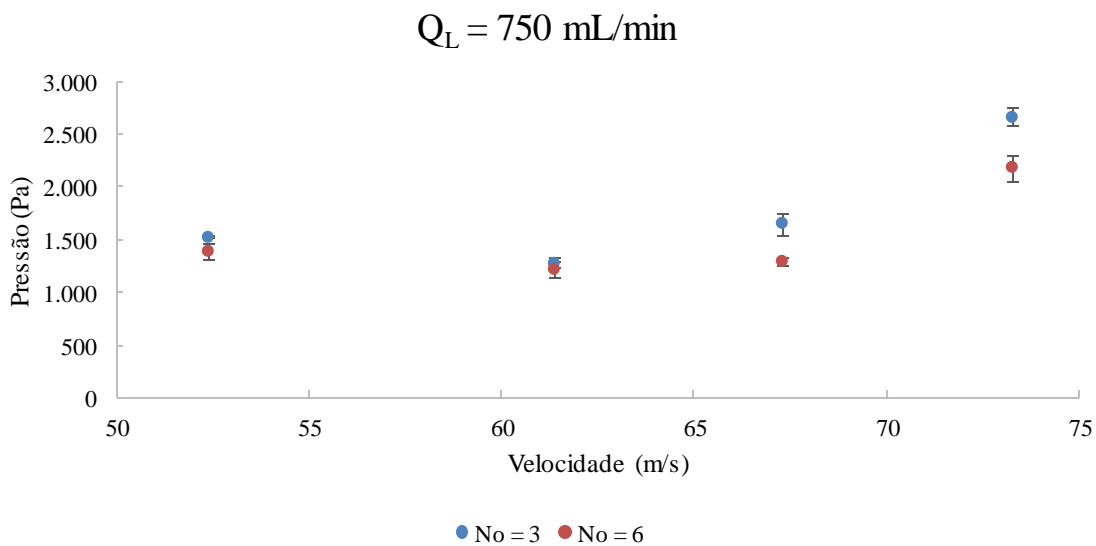
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 18 - Queda de pressão em função da velocidade do ar na garganta com um valor de vazão de líquido injetado fixado em 500 mL/min



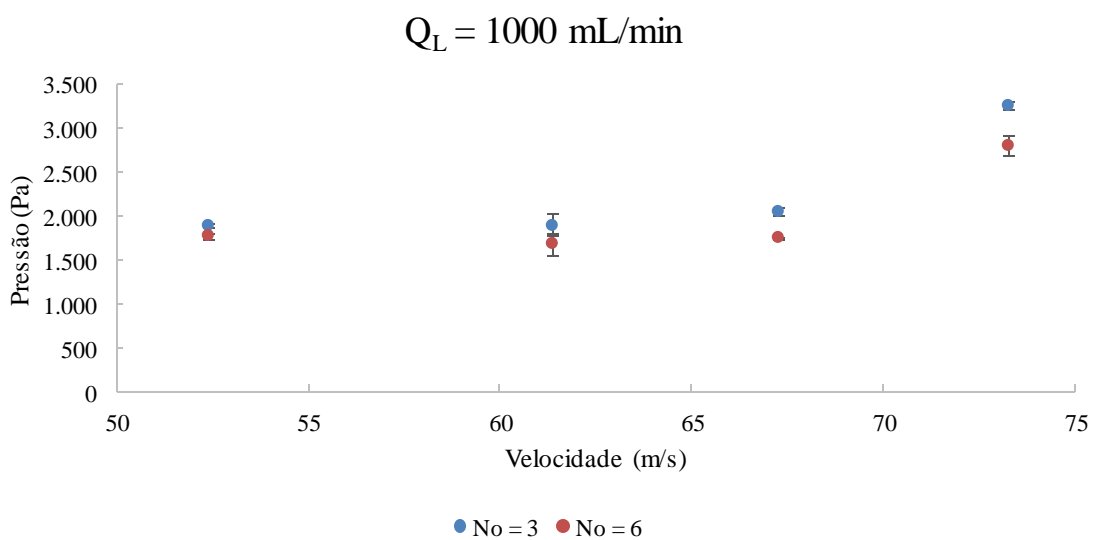
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 19 - Queda de pressão em função da velocidade do ar na garganta com um valor de vazão de líquido injetado fixado em 750 mL/min



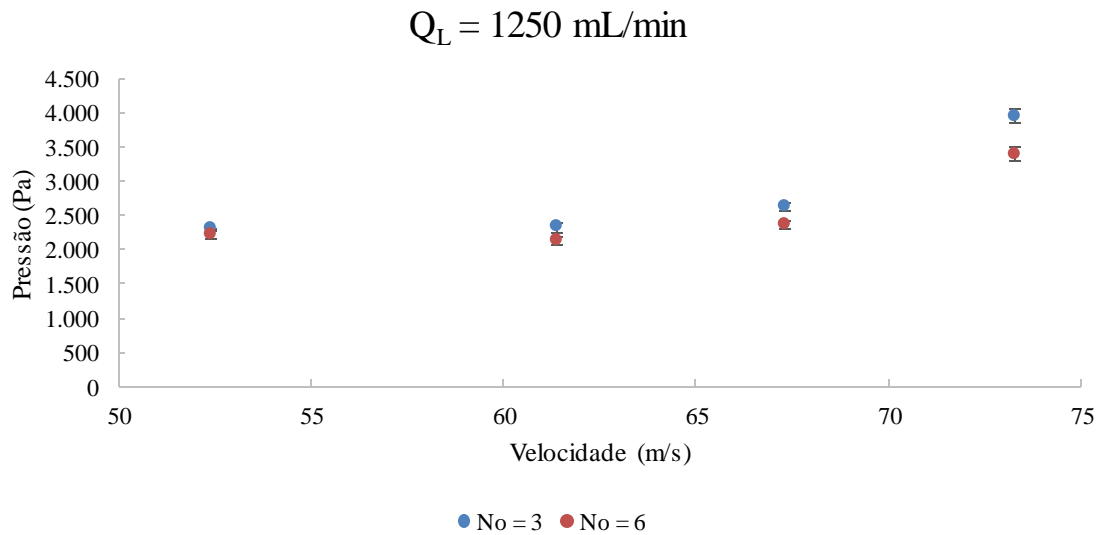
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 20 - Queda de pressão em função da velocidade do ar na garganta com um valor de vazão de líquido injetado fixado em 1000 mL/min



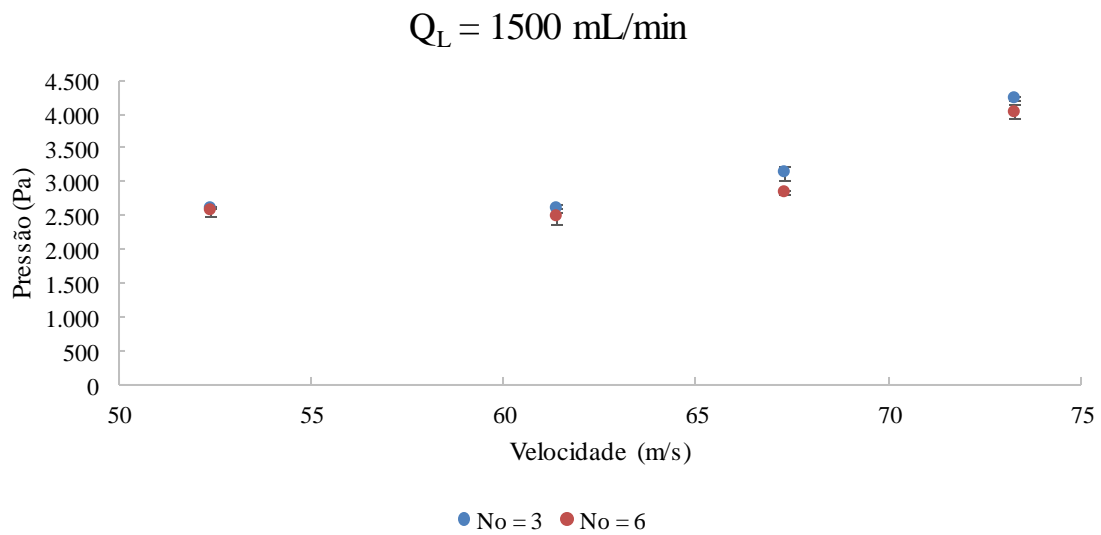
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 21 - Queda de pressão em função da velocidade do ar na garganta com um valor de vazão de líquido injetado fixado em 1250 mL/min



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 22 - Queda de pressão em função da velocidade do ar na garganta com um valor de vazão de líquido injetado fixado em 1500 mL/min



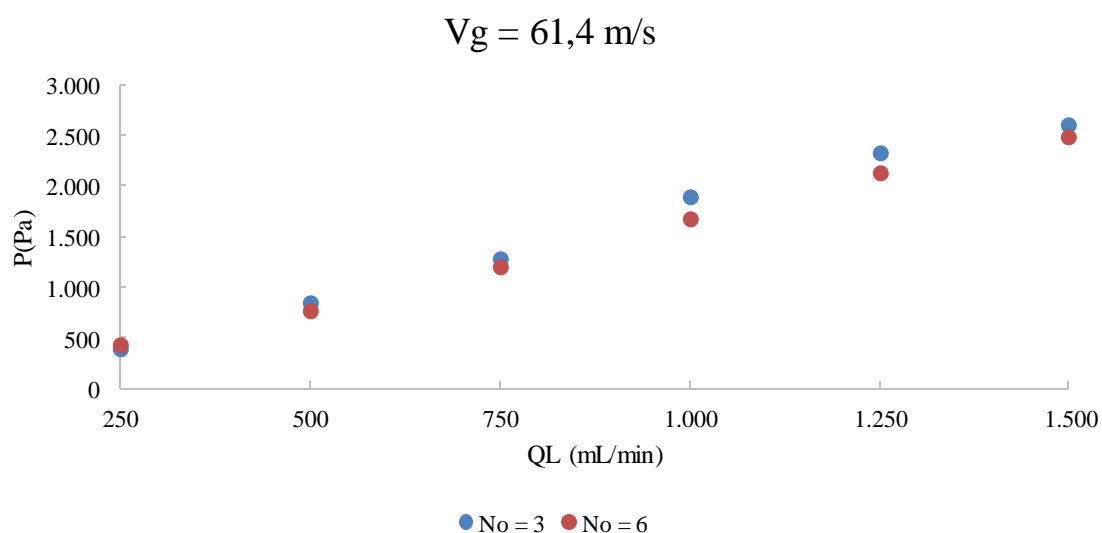
Fonte: Acervo Pessoal

Pelas Figuras é possível observar que o comportamento da queda de pressão em função da velocidade do gás na garganta é semelhante para todas as vazões de líquido injetadas indicando uma coerência entre dados coletados. Os desvios padrões registrados para os valores de queda de pressão foram baixos, variando de 9,8Pa a 122,3Pa, indicando uma alta exatidão durante a coleta dos dados. Além disso, foi possível observar que a queda de pressão é diretamente proporcional à vazão de líquido injetada, tanto para 3 orifícios, quanto para 6 orifícios.

É possível observar também que para as menores velocidades os desvios são maiores e podem estar associados a uma menor precisão das medições, pois as realizações das mesmas foram mais difíceis devido à formação de filme líquido na garganta do equipamento. Devido da formação do filme ocorria uma variação na medição da altura manométrica que por fim é utilizada no cálculo da queda de pressão.

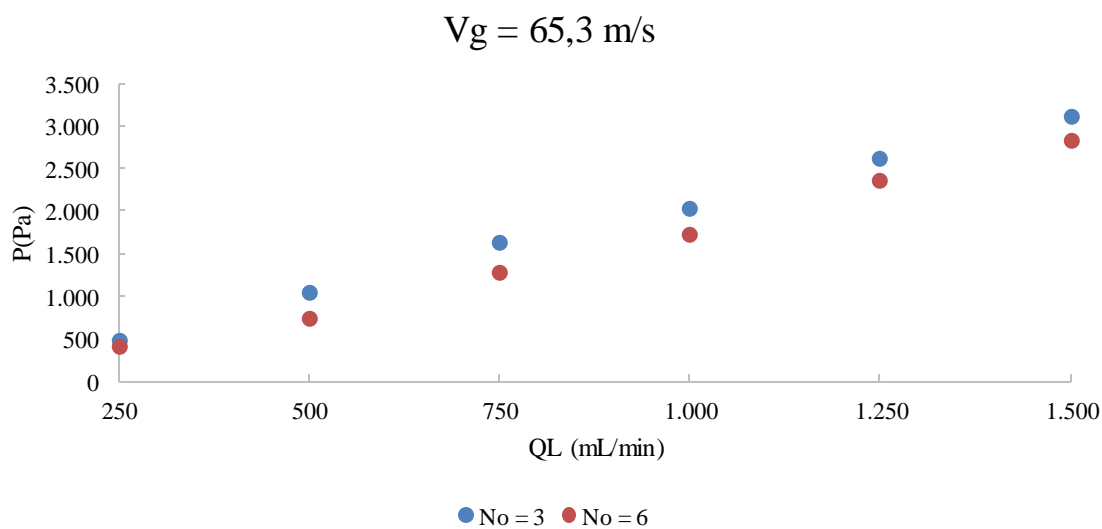
Através das Figuras 23, 24 e 25 foi possível observar o comportamento da queda de pressão em função da vazão de líquido injetado no lavador Venturi com valores de velocidade de ar na garganta fixados.

Figura 23 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado com um valor de velocidade do ar na garganta fixado em 61,4 m/s



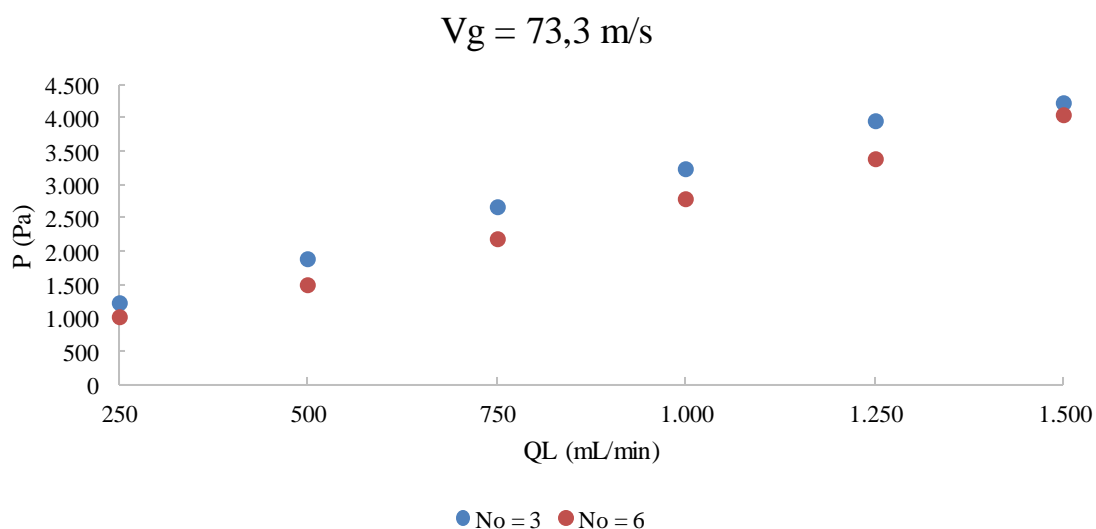
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 24 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado com um valor de velocidade do ar na garganta fixado em 65,3 m/s



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 25 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado com um valor de velocidade do ar na garganta fixado em 73,3 m/s



Fonte: Acervo Pessoal

Através das figuras foi possível identificar que a queda de pressão varia linearmente com o aumento da vazão de líquido injetada e que a mesma diminui com o aumento do número de orifícios.

Também foi possível avaliar a penetração da linha central do jato em função da vazão de líquido injetada. Na Tabela 13 estão os dados obtidos e as Figuras 26 e 27 mostram a penetração da linha central do jato em função da vazão de líquido injetada com 3 e 6 orifícios.

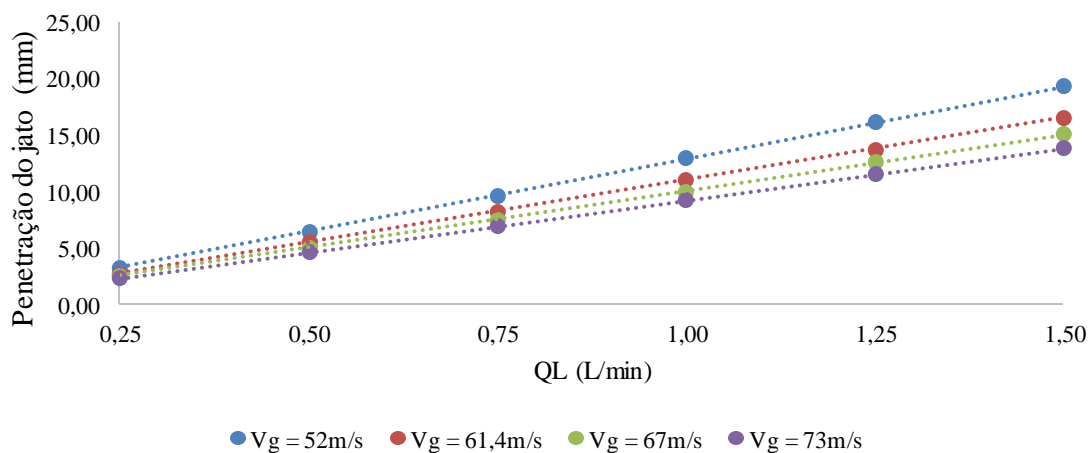
Tabela 13 - Valores de penetração máxima da linha central do jato e fração de penetração do jato encontrados para cada vazão de líquido injetada, de acordo com a velocidade de ar na garganta fixada

N° de Orifícios	QL (L/min)	Vg = 52,4m/s		Vg = 61,4 m/s		Vg = 67,3 m/s		Vg = 73,3 m/s	
		I** (mm)	I**/Do	I** (mm)	I**/Do	I** (mm)	I**/Do	I** (mm)	I**/Do
3	0,25	3,2	0,16	2,7	0,14	2,5	0,12	2,3	0,11
	0,5	6,4	0,32	5,5	0,27	5,0	0,25	4,6	0,23
	0,75	9,6	0,48	8,2	0,41	7,5	0,37	6,9	0,34
	1	12,8	0,64	11,0	0,55	10,0	0,50	9,2	0,46
	1,25	16,1	0,80	13,7	0,69	12,5	0,62	11,5	0,57
	1,5	19,3	0,96	16,5	0,82	15,0	0,75	13,8	0,69
6	0,25	1,6	0,08	1,4	0,07	1,2	0,06	1,1	0,06
	0,5	3,2	0,16	2,7	0,14	2,5	0,12	2,3	0,11
	0,75	4,8	0,24	4,1	0,21	3,7	0,19	3,4	0,17
	1	6,4	0,32	5,5	0,27	5,0	0,25	4,6	0,23
	1,25	8,0	0,40	6,9	0,34	6,2	0,31	5,7	0,29
	1,5	9,6	0,48	8,2	0,41	7,5	0,37	6,9	0,34

Fonte: Acervo Pessoal

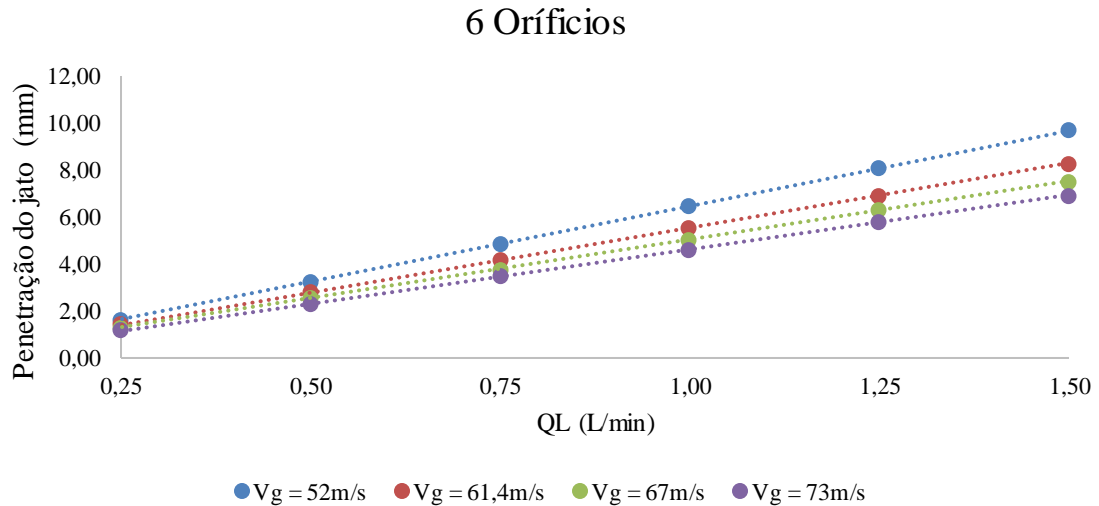
Figura 26 - Penetração máxima da linha central do jato em função da vazão de líquido injetada com 3 orifícios para cada valor de velocidade de ar na garganta fixado

3 Orifícios



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 27 - Penetração máxima da linha central do jato em função da vazão de líquido injetada com 6 orifícios para cada valor de velocidade de ar na garganta fixado



Fonte: Acervo Pessoal

Através das Figuras 26 e 27 percebe-se que aumentando a vazão de líquido ocorre um aumento na penetração do jato líquido, ou seja, independentemente do número de orifícios, a penetração do jato é diretamente proporcional à velocidade do mesmo.

Além disso, o aumento da velocidade de gás provocou um achatamento na reta, pois o mesmo causa um aumento na força de arraste e conseqüentemente jatos menos penetrantes para uma vazão de líquido injetado constante. Outra análise que pode ser feita é de que ao aumentar o número de orifícios de 3 para 6, os jatos tornam-se menos penetrantes e por conseqüência ocorre uma diminuição na formação de filme nas paredes da tubulação, já que o jato líquido fica, em sua maioria, na região central da garganta.

É importante ressaltar aqui que para a penetração do jato líquido, ou seja, à distância em que o líquido penetra na corrente gasosa antes da atomização, COSTA (2002) afirma que jatos curtos ou muito longos, insuficientes ou excessivos na garganta, ocasionam eficiência de coleta deficiente, além da formação de filmes líquidos na parede do lavador, os quais são ineficientes para a coleta das partículas, e propiciam uma maior perda de carga durante o escoamento do gás.

Por meio das figuras, a penetração máxima observada trabalhando com 3 orifícios foi de 19,3mm utilizando uma vazão de líquido injetado e uma velocidade de gás na garganta iguais a 1,5L/min e 52,3m/s respectivamente. Enquanto que a penetração máxima para 6 orifícios foi de 9,6mm, utilizando a mesma vazão de líquido e velocidade de gás na garganta que foi utilizada para 3 orifícios.

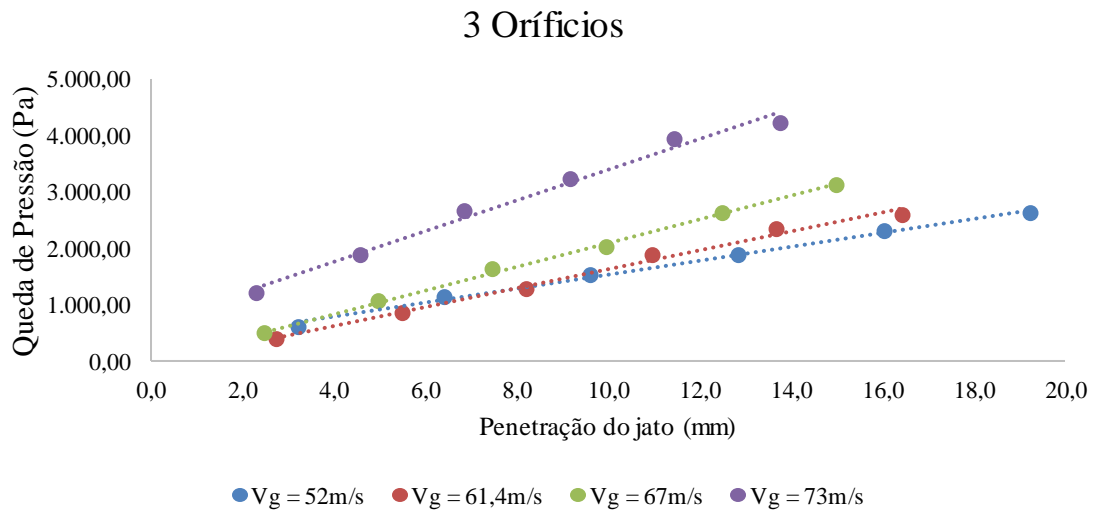
A queda de pressão também foi avaliada em função da penetração do jato. Na tabela 14 temos os dados coletados e as Figuras 28 e 29 exibem o comportamento obtido.

Tabela 14 - Valores de queda de pressão e penetração máxima da linha central do jato encontrados para cada vazão de líquido injetada, de acordo com a velocidade de ar na garganta fixada.

Nº de Orifícios	Q _L (L/min)	Vg = 52,4m/s		Vg = 61,4 m/s		Vg = 67,3 m/s		Vg = 73,3 m/s	
		ΔP15 (Pa)	l** (mm)	ΔP15 (Pa)	l** (mm)	ΔP15 (Pa)	l** (mm)	ΔP15 (Pa)	l** (mm)
3	0,25	620,1	3,2	391,7	2,7	479,8	2,5	1.214,2	2,3
	0,5	1.145,6	6,4	848,6	5,5	1.057,5	5,0	1.873,5	4,6
	0,75	1.521,0	9,6	1.276,2	8,2	1.638,5	7,5	2.660,1	6,9
	1	1.883,3	12,8	1.889,8	11,0	2.030,2	10,0	3.234,6	9,2
	1,25	2.301,1	16,1	2.323,9	13,7	2.627,5	12,5	3.939,6	11,5
	1,5	2.611,1	19,3	2.594,8	16,5	3.117,1	15,0	4.226,8	13,8
6	0,25	561,4	1,6	427,6	1,4	411,3	1,2	998,8	1,1
	0,5	887,8	3,2	773,6	2,7	750,7	2,5	1.504,7	2,3
	0,75	1.380,6	4,8	1.207,7	4,1	1.289,3	3,7	2.170,5	3,4
	1	1.759,3	6,4	1.667,9	5,5	1.739,7	5,0	2.787,4	4,6
	1,25	2.219,5	8,0	2.121,6	6,9	2.356,6	6,2	3.391,2	5,7
	1,5	2.558,9	9,6	2.474,1	8,2	2.829,8	7,5	4.027,7	6,9

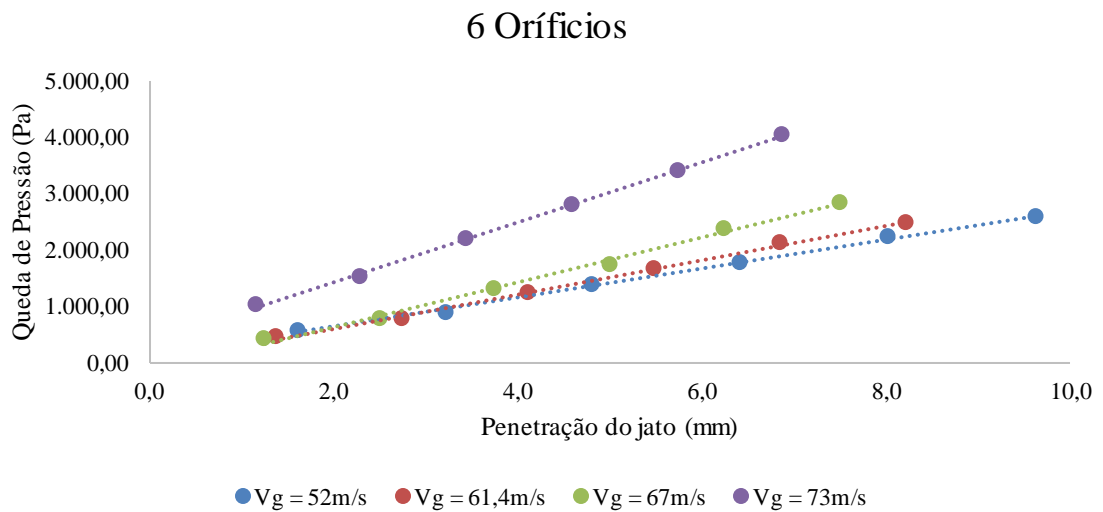
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 28 - Queda de pressão em função da penetração máxima da linha central do jato com 3 orifícios para cada valor de velocidade de ar na garganta fixado



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 29 - Queda de pressão em função da penetração máxima da linha central do jato com 6 orifícios para cada valor de velocidade de ar na garganta fixado



Fonte: Acervo Pessoal

Através das Figuras 28 e 29 foi possível observar que a queda de pressão aumenta linearmente com o aumento da penetração do jato e que ao aumentar a velocidade do ar na garganta, a queda de pressão também aumenta, entretanto, a penetração do jato diminui.

A queda de pressão diminui com o aumento do número de orifícios, pois ocorre uma diminuição da forma de filme nas paredes da garganta, já que temos jatos menos penetrantes e consequentemente ocorre uma diminuição do atrito entre a superfície do filme e o ar.

Além disso, avaliando o número de orifícios que são utilizados para a injeção de líquido, a queda de pressão diminui com o aumento do número de orifícios.

Vale ressaltar que tais comportamentos são observados para todas as velocidades de ar na garganta fixadas.

Para o comportamento da queda de pressão também foi realizado um comparativo com modelos analíticos e os escolhidos para esse trabalho foram os modelos de YUNG *et al.* (1977) e de CALVERT (1970).

Os resultados obtidos de queda de pressão experimental e para os modelos de YUNG *et al.* (1977) e de CALVERT (1970), a velocidade de ar na garganta, a vazão de líquido injetada e o número de orifícios são apresentados nas Tabelas 15, 16, 17 e 18.

Tabela 15 - Valores de queda de pressão em função da vazão de líquido injetado, de acordo com a velocidade de ar na garganta fixada em 52,4m/s

Nº de Orifícios	V _g (m/s)	Q _L (mL/min)	ΔP _{exp} (Pa)	ΔP _{calvert} (Pa)	ΔP _{Yung} (Pa)
3	52,4	250,0	620,1	694,7	693,4
		500,0	1.145,6	1389,3	1386,7
		750,0	1.521,0	2084,0	2080,1
		1.000,0	1.883,3	2778,6	2773,5
		1.250,0	2.301,1	3473,3	3466,8
		1.500,0	2.611,1	4167,9	4160,2
6		250,0	561,4	694,7	693,4
		500,0	887,8	1389,3	1386,7
		750,0	1.380,6	2084,0	2080,1
		1.000,0	1.759,3	2778,6	2773,5
		1.250,0	2.219,5	3473,3	3466,8
		1.500,0	2.558,9	4167,9	4160,2

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 16 - Valores de queda de pressão em função da vazão de líquido injetado, de acordo com a velocidade de ar na garganta fixada em 61,4m/s

Nº de Orifícios	V _g (m/s)	Q _L (mL/min)	ΔP _{exp} (Pa)	ΔP _{calvert} (Pa)	ΔP _{Yung} (Pa)
3	61,4	250,0	391,7	813,7	812,2
		500,0	848,6	1627,5	1624,5
		750,0	1.276,2	2441,2	2436,7
		1.000,0	1.889,8	3255,0	3248,9
		1.250,0	2.323,9	4068,7	4061,1
		1.500,0	2.594,8	4882,4	4873,4
6		250,0	427,6	813,7	812,2
		500,0	773,6	1627,5	1624,5
		750,0	1.207,7	2441,2	2436,7
		1.000,0	1.667,9	3255,0	3248,9
		1.250,0	2.121,6	4068,7	4061,1
		1.500,0	2.474,1	4882,4	4873,4

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 17 - Valores de queda de pressão em função da vazão de líquido injetado, de acordo com a velocidade de ar na garganta fixada em 67,3m/s

Nº de Orifícios	V _g (m/s)	Q _L (mL/min)	ΔP _{exp} (Pa)	ΔP _{calvert} (Pa)	ΔP _{Yung} (Pa)
3	67,3	250,0	479,8	893,1	891,5
		500,0	1.057,5	1786,3	1782,9
		750,0	1.638,5	2679,4	2674,4
		1.000,0	2.030,2	3572,5	3565,9
		1.250,0	2.627,5	4465,6	4457,4
		1.500,0	3.117,1	5358,8	5348,8
6		250,0	411,3	893,1	891,5
		500,0	750,7	1786,3	1782,9
		750,0	1.289,3	2679,4	2674,4
		1.000,0	1.739,7	3572,5	3565,9
		1.250,0	2.356,6	4465,6	4457,4
		1.500,0	2.829,8	5358,8	5348,8

Fonte: Acervo Pessoal

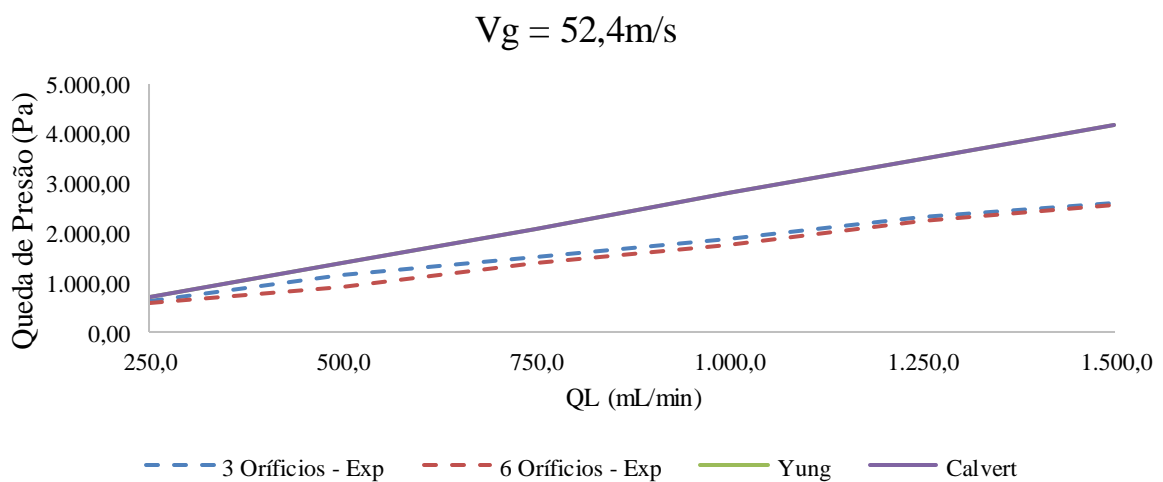
Tabela 18 - Valores de queda de pressão em função da vazão de líquido injetado, de acordo com a velocidade de ar na garganta fixada em 73,3m/s

N° de Orifícios	V _g (m/s)	Q _L (mL/min)	ΔP _{exp} (Pa)	ΔP _{calvert} (Pa)	ΔP _{Yung} (Pa)
3	73,3	250,0	1.214,2	972,5	970,7
		500,0	1.873,5	1945,0	1941,4
		750,0	2.660,1	2917,6	2912,1
		1.000,0	3.234,6	3890,1	3882,9
		1.250,0	3.939,6	4862,6	4853,6
		1.500,0	4.226,8	5835,1	5824,3
6	73,3	250,0	998,8	972,5	970,7
		500,0	1.504,7	1945,0	1941,4
		750,0	2.170,5	2917,6	2912,1
		1.000,0	2.787,4	3890,1	3882,9
		1.250,0	3.391,2	4862,6	4853,6
		1.500,0	4.027,7	5835,1	5824,3

Fonte: Acervo Pessoal

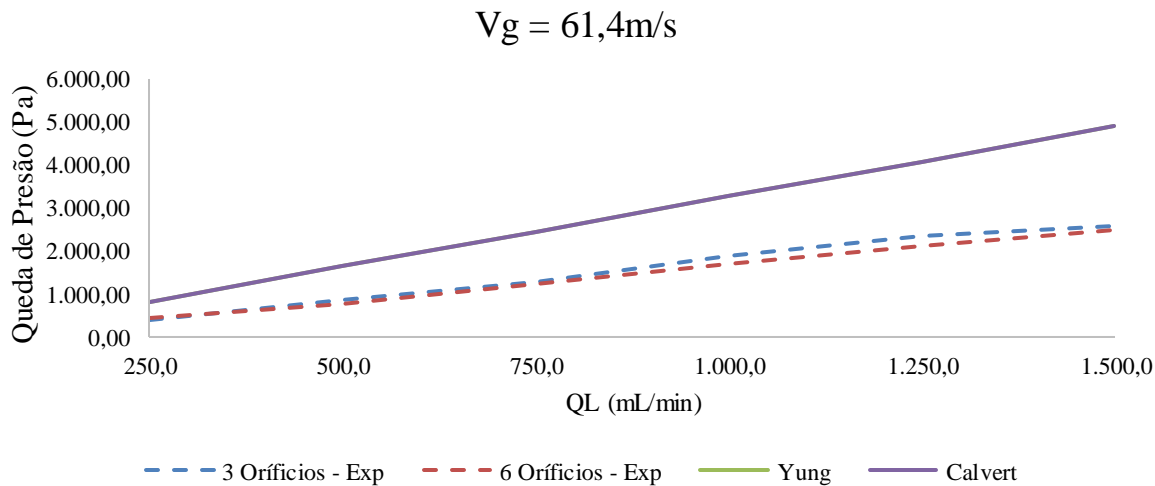
Nas Figuras 30, 31, 32 e 33 é possível observar o comportamento da queda de pressão em função da vazão de líquido injetada para cada valor de velocidade de ar na garganta fixada estão apresentados a seguir.

Figura 30 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado com a velocidade de ar na garganta fixada em 52,4 m/s



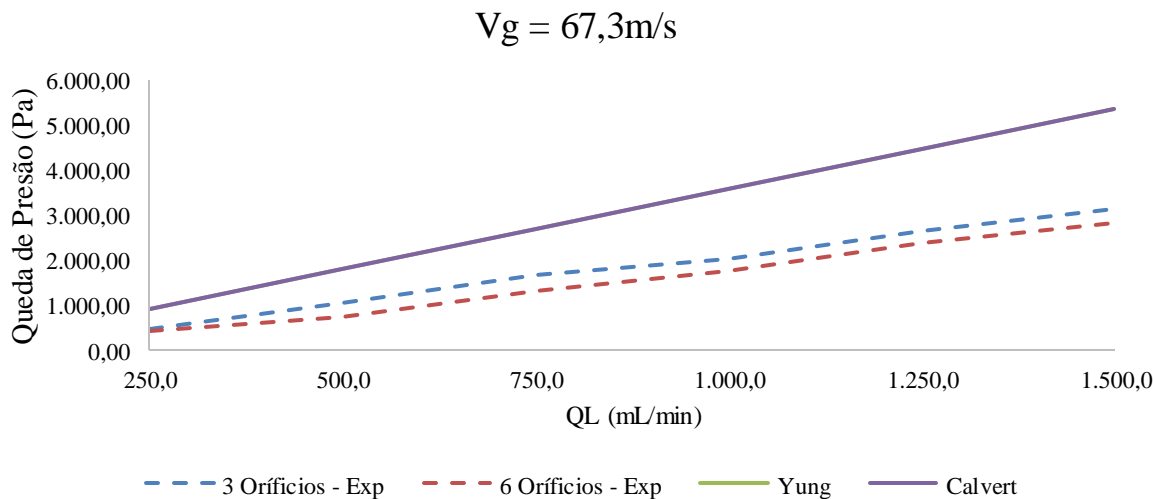
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 31 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado com a velocidade de ar na garganta fixada em 61,4m/s



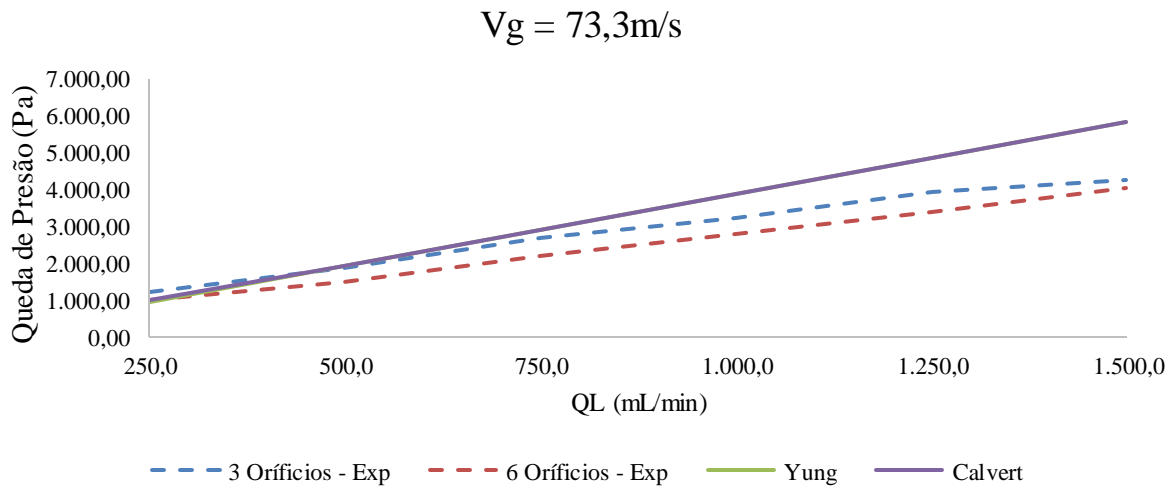
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 32 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado com a velocidade de ar na garganta fixada em 67,3m/s



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 33 - Queda de pressão em função da vazão de líquido injetado com a velocidade de ar na garganta fixada em 73,3m/s



Fonte: Acervo Pessoal

É importante ressaltar que os modelos de YUNG *et al.* (1977) e de CALVERT (1970), consideram que não há divisão de líquido entre o filme e gotas, ou seja, todo o líquido está disponível na forma de gotas imediatamente após a injeção, o que não é verdade, pois como já foi dito temos a formação de um filme líquido na parte do equipamento e que a velocidade final do líquido é igual à velocidade final do gás.

Essas considerações desprezam a energia perdida pelo atrito entre o ar e o filme, o que não acontece, pois durante os experimentos foi possível observar a formação de um filme de líquido na parede do equipamento, principalmente para as maiores vazões.

É possível observar que as curvas apresentam comportamento bem semelhante para vazões baixas e se distanciam com o aumento da vazão, já que com o aumento da mesma ocorre a formação de filme. Além disso, é importante ressaltar as dificuldades experimentais que podem ter causado um desvio nas medições, que embora tenham apresentado uma boa precisão, podem não ter sido tão exatas. Podemos destacar aqui algumas dificuldades, como a leitura da altura manométrica devido à formação do filme e a regulação na velocidade do gás injetado durante a manipulação da válvula de ar do soprador, já que a mesma era bastante sensível.

Contudo, podemos observar também que as curvas apresentam o mesmo comportamento, indicando que o resultado é coerente, ou seja, com o aumento da vazão a perda de carga também aumenta. O distanciamento entre as curvas experimentais com 3 e 6 orifícios deve-se ao fato de que ao aumentar o número de orifícios também ocorre uma diminuição na formação de filme e conseqüentemente uma diminuição da energia perdida pelo atrito com o mesmo.

5. CONCLUSÕES

Confirmou-se que o aumento da vazão de líquido provoca um aumento na queda de pressão devido à maior dissipação de energia, seja a gasta para acelerar as gotas ou do atrito entre o gás e a superfície do filme formado nas paredes da garganta após a injeção do líquido.

Os modelos analíticos de YUNG *et al.* (1977) e de CALVERT (1970) não levam em conta o número de orifícios de injeção utilizados, mostrando que tal consideração influencia significativamente nos resultados.

O número de orifícios utilizados impacta diretamente na dispersão do líquido no equipamento. Vale ressaltar que jatos curtos ou muito longos, insuficientes ou excessivos na garganta, ocasionam eficiência de coleta deficiente, além da formação de filmes líquidos, o que provoca o aumento na perda de carga.

O aumento da velocidade de gás injetado provoca uma diminuição da penetração do jato, devido a um aumento na força de arraste. Além disso, ao variar o número de orifícios de 3 para 6, os jatos tornam-se menos penetrantes. Isso ocorre por consequência de uma diminuição na formação de filme, já que o jato líquido fica, em sua maioria, na região central da garganta, tal comportamento fica muito mais claro quando a injeção era feita com 3 orifícios.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADVAND, F.; TALAIE, M.R., *CFD modeling of droplet dispersion in a Venturi scrubber*, Chemical Engineering Journal 160, Isfahan, Iran, 2010, 9p

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. "Transport Phenomena". New York – EUA, 1960.

BÉLA G. LIPTÁK. "Environmental Engineers' Handbook: Water pollution", Chilton Book Company, 1974.

CALVERT, S. (1968). In *Air Pollution*. (A. C. Stern, ed.), 2nd ed., Volume 111, Academic Press, New York: 474-475.

CALVERT, S. (1970). *AIChE J.* 16:392-396.

CALVERT, S. (1977). In *Air Pollution*. (A. C. Stern, ed.), 3rd ed., Volume IV, Academic Press, New York: 271 Dickenson,

COSTA, M.A.M. Eficiência de coleta de partículas em lavadores Venturi. Tese de doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – Brasil, 2002.

GAMA, M.S.C. Estudo de um sistema de limpeza de gases usando um lavador Venturi de Seção Circular, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – Brasil, 2008

GAMISANS, X.; SARRÀ, M.; LAFUENTE, F.J.; Gas pollutants removal in a single- and two-stage ejector-venturi scrubber, *Journal of Hazardous Materials*, Barcelona, 2001, 16p

GOLÇALVES, J.A.S. Aspectos da Modelagem Matemática de Lavadores Venturi. Tese de doutorado, São Carlos – Brasil, 2000.

GUERRA, V.G. Investigação do efeito de injeção de líquido por orifícios múltiplos na formação de gotas em um lavador Venturi. Tese de doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – Brasil, 2009.

FERNANDES, M.O.; DAMASCENO, J.J.R. Efeitos das vazões de líquido e de gás e do comprimento da garganta na eficiência global de coleta de lavadores Venturi. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

JOHNSTONE, H.F.; FIELD, R.B. E TASSLER, M.C. (1954), Gas absorption and Aerosol Collection in a Venturi Atomizer. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.45. p.1601-1608.

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

MARTINS COSTA, M.A. Eficiência de coleta de partículas em lavadores Venturi. Tese de doutorado, São Carlos, 2002.

MEILI, L. Estudo do desempenho de lavadores de Gases do Tipo Venturi com Seção Circular. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – Brasil, 2006.

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*, p. 9-20. 1996

PAK, S.I.; CHANG, K.S., Performance estimation of a Venturi scrubber using a computational model for capturing dust particles with liquid spray, *Journal of Hazardous Materials B138*, Daejeon, República da Coréia, 2006, 14p

RIBEIRO, A.P.R.A. Estudo da eficiência de coleta em um lavador Venturi com injeção de líquido por multi-orifícios. Tese de doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – Brasil, 2005.

SILVA, L.G.S.; SCHULMAN, F.G. Modelagem multifásica de lavadores de gás do tipo Venturi através de fluidodinâmica computacional. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de São Paulo, São Paulo - Brasil, 2014.

SILVA, D.A.L. Lavadores Venturi na coleta de particulados finos emitidos com a queima de resíduos madeiráveis: influência das principais variáveis de processo na eficiência fracionaria para partículas de 0 a 10 μ m. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2009.

SILVA, A.M.; TEIXEIRA, J.C.F.; TEIXEIRA, S.F.C.F., Experiments in a large-scale Venturi scrubber Part I: Pressure drop, Chemical Engineering and Processing 48, Minho, Portugal, 2008a, 9p

SILVA, A. M.; TEIXEIRA, J.C.F.; TEIXEIRA, S.F.C.F., Experiments in large scale Venturi scrubber, Chemical Engineering and Processing, Guimarães, 2008b, 7p

SUN, H.; AZZOPARDI, B. J., Modelling Gas-Liquid Flow in Venturi Scrubbers at High Pressure, School of Chemical, Environmental and Mining Engineering, Nottingham, 2003, 7p

VISWANATHAN, S., Modeling of Venturi Scrubber Performance, Ecotech Energy and Environmental Corporation, California, 1997, 10p

YUNG et al., 1977a. S. Yung, H.F. BARBARIKA, S. CALVERT. Pressure loss in venturi scrubbers. J. Air Pollut. Control Ass., 27 (1977), pp. 348-351