RYSZARD MAJEWSKI

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM
LAVADOR DE GASES INDUSTRIAL**

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia.

São Paulo
2006

RYSZARD MAJEWSKI

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM
LAVADOR DE GASES INDUSTRIAL**

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia

Área de concentração:
Engenharia Química

Orientadora:
Profa. Dra. Maria Elena Santos Taqueda

São Paulo
2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Majewski, Ryszard

**Projeto, construção e avaliação experimental de um lavador de gases industrial / R. Majewski. -- São Paulo, 2006.
126 p.**

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

**1.Ciclone lavador 2.Dispersão de gotas 3.Limpeza de gases
4.Projeto fatorial com três fatores I.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.**

À minha esposa Zofia
À meus filhos, Yan e Stefan
À todos os interessados no Ciclone Lavador
Dedico

Agradecimentos

A Deus por todos os dias da minha existência.

A Profa. Maria Elena Santos Taqueda pelo coração de professora, instrução e orientação recebidas.

Ao Engº. Ricardo B. Elias pela sua colaboração e dedicação durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Arlindo Tribess por sua colaboração e assistência durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Sílvio de Oliveira Júnior pelo incentivo durante a realização desse trabalho.

À bibliotecária, Maria Lúcia Adamo Attar pela sua valiosa ajuda nas pesquisas bibliográficas deste trabalho.

À Secretaria Administrativa da Faculdade de Engenharia Industrial (UNIFEI) pela assistência durante a elaboração deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

Resumo

Ciclones são equipamentos largamente empregados na separação de partículas do ar ou na limpeza de gases de processos por ação da força centrífuga. Neste trabalho, um ciclone lavador modificado foi projetado, construído, e sua eficiência de coleta de partículas foi avaliada. O equipamento consiste de um ciclone separador tipo Americano com triplo cone, em cujo corpo cilíndrico foram introduzidos bicos nebulizadores de água. Graças a essa configuração ele pode ser usado em galpões industriais, apresenta facilidade de construção e operação e baixo custo. O autor projetou esse ciclone objetivando não somente a eficiência de coleta, mas também a compacidade, o baixo consumo de água e de eletricidade, a possibilidade de purificação de gases ou vapores tóxicos, e ainda, o resfriamento de gases quentes pela umidificação até a saturação, de acordo com os fundamentos da separação de poeiras empregada nos scrubbers úmidos. O estudo consistiu de uma avaliação experimental das condições de operação à temperaturas ambiente e superiores à ambiente, variando também a altura da chaminé e a vazão de água de umidificação da poeira. Os ensaios foram realizados em duas etapas. Na primeira, objetivou-se identificar as melhores condições de operação usando todo o potencial de variação do equipamento, e empregando um projeto fatorial de três fatores (three-way). A segunda etapa objetivou-se estimar a eficiência de coleta do ciclone lavador usando como poluente, partículas de quartzo micronizado com diâmetro médio de 7,48 μm . A concentração de partículas no gás foi de 20 a 100 mg/m^3 de ar. Foi obtida uma eficiência média de $97.07 \pm 1.03 \%$, para 4 bicos nebulizadores, 4 aquecedores em funcionamento e altura da chaminé 645 mm, para uma vazão de gás 0,358 m^3/s de gás. Concluindo a modificação do projeto aumento a eficiência de coleta de aproximadamente 70 % ,em ciclones secos, para 97,07 %.

Palavras-chave: Ciclone lavador, dispersão de gotas, limpeza de gases, projeto fatorial com três fatores.

Abstract

Cyclones are devices widely employed to separate and collect particles from the air or for cleaning up gases for processes by the action of centrifugal force. In this work a modified cyclone washer was designed, fabricated, and its collection efficiency evaluated. This equipment consists of an American-type cyclone separator with a triple cone into whose cylindrical body a spray nozzle was introduced. Thanks to its configuration, it can be used in industrial warehouses and is fairly simple to build and operate, as well as inexpensive. The author designed this cyclone with a view not only to efficiency but also compactness, low water and electricity consumption, the possibility of toxic gas or vapor absorption, the cooling of hot gases and aerosol humidification up to saturation, according to fundamentals of dust separation with wet scrubbers. The study consisted of an experimental evaluation of the operating conditions at ambient and higher than ambient temperatures, changing the chimney height and water flow rate, with the purpose of humidifying dust. The tests were carried out in two steps. The first step aimed to identify the best operating condition using the entire potential variation and employing a three-way factorial design. The second step aimed to estimate the efficiency of the cyclone washer was evaluated in the collection of micronized quartz particles with an average diameter of 7.48 μm . The amount of particles varied from 20 to 100 mg/m^3 of air. An average efficiency of 97.07 ± 1.03 % was obtained with four spray nozzles, with its four heaters turned on, chimney height of 0.645 m and 0.358 m^3/s of gas. In conclusion, the design modification had increased the collection efficiency from about 70 %, in dry cyclones, to 97.07 %.

Keywords: Cyclone washer, droplet dispersion, cleaning gas, three-way factorial design

Lista de Figuras

Figura 1.	Esquemas básicos de um ciclone	6
Figura 2.	Eficiência de coleta de partículas em função da razão do diâmetro da partícula D_p e do diâmetro de corte da partícula D_{pc} , para o ciclone Lapple. Fonte: (LAPPLE, C. E., 1951).....	7
Figura 3.	Esquema do ciclone com entrada tangencial e indicação das dimensões que compõem as sete razões geométricas do ciclone. Fonte: (KOCH E LITCHT, 1977).....	9
Figura 4.	Esquema de variação do tubo de saída em uma geometria básica do ciclone de Stairmand, mostrando o efeito da variação no do tubo de saída no desempenho do ciclone. Fonte: Moore e McFarland, 1993.....	13
Figura 5	Identificação e dimensões dos ciclones utilizados por Lim, K. S.; Kwon S. B.; Lee, K. W. (2003).....	17
Figura 6.	Assentamento de partículas na circunscrição da gota. Fonte: (WARYCH, 1979).....	20
Figura 7.	Curva de rendimento de assentamento por inércia. Fonte: (WARYCH, J, 1979).....	24
Figura 8.	Ciclone úmido proposto por Krames, J; Buttner, H., (1994).....	27
Figura 9.	Bocais de atomização pneumático com misturador: externo (a) e interno (b). Fonte: Krames, J; Buttner, H., (1994).....	27
Figura 10.	Efeito da relação L/g (taxa de água por unidade de volume de gás limpo) na Eficiência de Coleta. Fonte: (KRAMES, J; BUTTNER, H. 1994).....	28
Figura 11.	Configurações possíveis dos fluxos de aerossol (portador mais partículas) em relação ao fluxo de água nebulizada; a) contra corrente b) cruzado e c) concorrente Fonte: (WARYCH, J., 1979)	29
Figura 12.	Tempo de evaporação das gotículas de água em função de seu diâmetro para $D=2,3 \cdot 10^{-1} cm^2/s$, $\lambda - 6 \cdot 10^{-6} cm$, $T- 298K$, no ar com 100% de umidade relativa. Fonte: (WARYCH, J. 1979).....	31
Figura 13.	Velocidade limite de queda das gotículas de água e número Re_k no ar em condições padrões ($20\ ^\circ C$, $1013\ hPa$) em função do raio de ação da gotícula. Fonte: (WARYCH, J., 1979).....	32
Figura 14.	Rendimento de assentamento inercial das partículas com	

	diâmetros entre 2 e 10 μ m sobre as gotas d'água, em queda livre, com diâmetro d_k . Fonte: (WARYCH, J., 1979).....	33
Figura 15.	Apresentação da pulverização em contra corrente com indicações dimensionais. Fonte: (CHENG, L. 1973).....	41
Figura 16.	Dimensões ótimas das gotículas com injeção de água em contra corrente no eixo do duto. Fonte: (CHENG, L. 1973).....	42
Figura 17.	Penetração das partículas em função da massa de condensação dos vapores por unidade de massa de gás seco m_k Fonte: (WARYCH, J., 1979).....	44
Figura 18.	Representação básica de um separador eletrostático com umidificação. Fonte: (WARYCH, J. 1979).....	45
Figura 19.	Rendimento teórico de assentamento das partículas nas gotas em função do caminho relativo adimensional até a parada da partícula sobre o diâmetro de gota, $\frac{z'}{d_k}$. Fonte: (WARYCH, J., 1979).....	49
Figura 20.	Rendimento de separação em função de fluxo da massa de vapor condensado para diversos diâmetros das partículas. Fonte: (WARYCH, J., 1979).....	50
Figura 21.	Lavador sem enchimento. Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	53
Figura 22.	Lavador de torre da empresa Elex Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	53
Figura 23.	Lavadores com enchimento tipo OKc Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	54
Figura 24.	Lavador com leito fluidizado da empresa Prat-Daniel. Fonte : (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	57
Figura 25	Lavadores de borbulhagens firma Doyle. Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	59
Figura 26.	Lavador de borbulhagem. Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	59
Figura 27.	Lavador de espuma Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	60
Figura 28.	Lavador com camada de filtração de material granulado de firma Elex-Oski. Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	62
Figura 29.	Labirinto com parte mergulhada na água Fonte: (JUDÁ, J.;	

	NOWICKI, M., 1979).....	63
Figura 30.	Lavador Roto – Clone tipo N Fonte : (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	63
Figura 31.	Eficiência de separação dos lavadores Roto-Clone tipo N Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	64
Figura 32.	Lavador rotativo da firma Theisen Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	65
Figura 33.	Lavador rotativo vertical firma American Air Filter (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	66
Figura 34.	O esquema de funcionamento do lavador Roto – Clone W. Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	67
Figura 35.	Vista geral de lavador Roto – Clone W. Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	67
Figura 36.	As formas de instalações dos pulverizadores no ciclone. Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	68
Figura 37.	Lavador de movimento ciclônico com injeção de água na parede construído pela firma Micro Pul, tipo Micro - Airetron 500. Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	68
Figura 38.	Lavador com movimento ciclônico Pease-Anthony-Cyclonic-Scrubber. Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	69
Figura 39.	Ciclone úmido da firma OPAN. Fonte: (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	70
Figura 40.	Características geométricas de um ciclone americano.....	71
Figura 41.	Esquema do ciclone lavador de gases com acessórios, montado para a realização deste trabalho.....	74
Figura 42.	Vista geral do ciclone lavador.....	75
Figura 43.	Região cilíndrica e bicos pulverizadores.....	76
Figura 44.	Caixa de contenção de água e região cônica.....	77
Figura 45.	Motor e Exaustor.....	78
Figura 46.	Detalhe mostrando a localização da placa de orifício.....	78
Figura 47.	Circuito de ar comprimido.....	79
Figura 48.	Balança digital.....	79
Figura 49.	Manômetro e válvula dos bicos de nebulização de água.....	80

Figura 50.	Estojos de sistema de aquecimento.....	80
Figura 51.	Chaves de acionamento dos estojos elétricos.....	81
Figura 52.	Vazão do pulverizador em função da pressão para a pastilha com orifício de 3,2 mm.....	83
Figura 53.	Fluxo de água dentro do corpo do ciclone.....	83
Figura 54.	Válvulas, manômetros e Bicos de nebulização.....	84
Figura 55.	Termopares no duto de entrada e captação do ar.....	85
Figura 56.	Termopares no duto de saída e exaustão do ar.....	85
Figura 57.	Sistema de dosagem do particulado.....	86
Figura 58.	Teste do pulverizador.....	87
Figura 59.	Compressor alternativo.....	88
Figura 60.	Câmara de coleta de material particulado contendo o filtro.....	88
Figura 61.	Tubo de Pitot.....	89
Figura 62.	Quartzo micronizado (95% < 20µm).....	89
Figura 63.	Esquema do projeto estatístico para obtenção dos dados do ciclone tipo americano modificado proposto neste trabalho.....	92
Figura 64.	Diagramas com testes de adequação do modelo testado.....	100
Figura 65.	Efeito da altura da chaminé na diferença de temperatura, ($T_{\text{aquec}} - T_{\text{saída}}$)	106
Figura 66.	Efeito do número de aquecedores ligados na diferença de temperatura, ($T_{\text{aquec}} - T_{\text{saída}}$).....	107
Figura 67.	Efeito do número de bicos ligados na diferença de temperatura, ($T_{\text{aquec}} - T_{\text{saída}}$).....	107
Figura 68.	Efeito da interação Chaminé×Aquecedor na diferença de temperatura, ($T_{\text{aquec}} - T_{\text{saída}}$).....	108
Figura 69.	Efeito da interação Aquecedores×Bicos na diferença de temperatura, ($T_{\text{aquec}} - T_{\text{saída}}$).....	108
Figura 70.	Efeito da concentração de particulado na eficiência de coleta no ciclone lavador objeto de estudo deste trabalho.....	118
Figura 71.	Carta de Sylvan apresentando níveis de concentração e tamanho das partículas, para a maioria dos equipamentos de separação disponíveis. Fonte: (INDUSTRIAL VENTILATION, 1998).....	119

Lista de Tabelas

Tabela 1 -	Diâmetro de corte da partícula aerodinâmica equivalente (MOORE; MCFARLAND, 1993).....	4
Tabela 2 -	Dimensões dos ciclones utilizados por Rongbiao Xiang, S. H. Park e K. W. Lee (2001).....	16
Tabela 3 -	As possíveis configurações de fluxos com as respectivas equações de balanço usadas na determinação da eficiência em ciclones com pulverização de água. (A configuração central foi a empregada no ciclone objeto de estudo deste trabalho).....	35
Tabela 4 -	Dados técnicos de lavador com enchimento (OKc. da Polónia) Fonte : (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).....	56
Tabela 5 -	Configurações testadas no ciclone modificado.....	91
Tabela 6 -	Resultados experimentais obtidos com o ciclone úmido.....	96
Tabela 7 -	Análise de variância do projeto fatorial three-way, mostrando a significância dos efeitos principais, das interações de dois fatores e o erro baseado no resíduo.....	99
Tabela 8 -	Análise de variância para o modelo proposto.....	99
Tabela 9 -	Estatística descritiva obtida com a análise de variância do planejamento fatorial three-way, levando em conta os efeitos principais e as interações de dois fatores, para a altura da chaminé, aquecedores e bicos.....	9
Tabela 10 -	Resultados obtidos nas melhores condições de operação do ciclone com selo úmido. Condições dos ensaios: injeção de água com quatro bicos instalados e em funcionamento no corpo do ciclone e quatro aquecedores ligados e altura da chaminé 625 mm.....	111
Tabela 11 -	Apresentação comparativo das características de alguns lavadores de gases para 1000 m ³ /h com bombas de água para deslocamento de água	113
Tabela 12 -	Eficiências obtidas para o ciclone lavador operando nas melhores condições com de partículas em torno de 7µm.....	117

Nomenclatura

Letras romanas

a	altura da entrada do ciclone
A	área de escoamento no elemento de volume;
A_x e A_y	são as componentes adimensionais da aceleração
b	largura da entrada do ciclone
B	largura da entrada (retangular)
c	concentração de partículas no aerossol
D_{pc} ou $D_{0,5}$	diâmetro de corte que é o tamanho da partícula para qual o ciclone possui um rendimento de 50%
D_C	diâmetro do ciclone (ft)
D_e	diâmetro do duto de saída de gás (ft), (KOCH, W. H; LICHT, W., 1977)
d_k	diâmetro da gota
D_o	diâmetro do duto de saída do gás (mm), ((MOORE; MCFARLAND, 1993)
D_p ou d_a	diâmetro da partícula
E_A	coeficiente de correção, equação 7
F	constante de transferência de momentum entre a gotícula e o gás
f	Relação entre a velocidade das gotas em relação a do gás e a velocidade do gás, u_{kg}/u
F	Razão entre variâncias
F_x e F_y	as componentes das forças externas atuando sobre a partícula durante a circunscrição da gota
h	altura do trecho cilíndrico do ciclone
H	altura do ciclone
h	altura da faixa de contato do aerossol com as gotas
K_C	volume constante do ciclone

ℓ_1	caminho de passagem inercial da partícula
L	fluxo de massa do líquido pulverizado
L/g	taxa de água a ser pulverizada por volume do gás limpo
m	massa da partícula de aerossol
n	estimado como uma função do diâmetro do ciclone e da temperatura do gás, com D_c em ft e T em °F, equação 2, ou número de gotículas em contato com o aerossol
$\dot{n}_k$	taxa de gotículas introduzidas na coluna
N_c	número de voltas efetuadas pelo gás no interior do ciclone
N_H	número de cabeças de entrada
n_i	número de partículas que penetram através da i -ésima fileira das gotículas
n_k	número de gotículas produzidas por unidade de tempo
P	Probabilidade de se obter resultados se a hipótese nula for verdadeira
Q	a vazão volumétrica do gás
R^2	coeficiente de determinação
R_{aj}^2	Coeficiente de determinação ajustado para os graus de liberdade
Re	número de Reynolds
r_k	raio da gota
S	comprimento da saída do gás
s	comprimento da projeção das gotículas
Stk	número de Stokes (parâmetro de inércia)
t	tempo adimensional
u	velocidade do aerossol
u_0	velocidade a distância infinita do coletor
u_a	velocidade de passagem das partículas do aerossol para o gás
u_k	velocidade da gotícula produzida
u_{kg}	velocidade das gotas em relação a do gás
u_{tk}	velocidade gravitacional de queda da gotícula

u_x e u_y	velocidade do gás nas direções x e y , respectivamente
U_x e U_y	componentes adimensionais da velocidade de gás, $U_x = \frac{u_x}{u_0}$ e $U_y = \frac{u_y}{u_0}$
V_C	velocidade média de entrada do gás
$V_x = \frac{v_x}{r_0}$	componente adimensional da velocidade da partícula, na direção x
$V_y = \frac{v_y}{u_0}$	componente adimensional da velocidade da partícula, na direção y
$\dot{V}_l$	vazão volumétrica do líquido
$\dot{V}_g$	vazão volumétrica do gás
X e Y	sistema de coordenadas adimensional, $X = \frac{x}{r_k}$ e $Y = \frac{y}{r_k}$
x e y	sistema de coordenadas retangulares
y_0	distância do eixo central da gota, (Figura 6)
z	comprimento da tubulação;
z'	caminho percorrido pela gota em relação ao gás

Letras gregas

α	nível de significância, (risco de rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira)
ΔP	perda de carga do ciclone
η	rendimento de assentamento inercial sobre a gota
η_p	rendimento da passagem potencial
η_1	rendimento de assentamento inercial sobre a gota (passagem viscosa)
η_k	rendimento de sedimentação de partículas de aerossol para uma dimensão definida da gotícula
λ	Coefficiente de atrito
μ	viscosidade do gás

v	Graus de liberdade
ρ_g	densidade do gás (kg/m^3)
ρ_l	densidade do líquido
ρ_p	densidade do material particulado
σ	tensão superficial do fluido (água)
τ_k	tempo de relaxamento da partícula
u_x	velocidade da partícula, na direção x
u_y	velocidade da partícula, na direção y
u_x	velocidade da partícula, na direção x
u_y	velocidade da partícula, na direção y
Φ	umidade relativa do ar
ω	umidade absoluta

Siglas

TBS	Temperatura de bulbo seco
TBU	Temperatura de bulbo úmido
EPA	Equipamento de Proteção Ambiental
ISO	“International Organization for Standardization”
ANOVA	“Analysis of variance”
G.L.	Graus de liberdade

Sumário

Resumo

Abstract

Lista de figuras

Lista de tabelas

Nomenclatura

1	Introdução.....	1
1.1	Generalidades.....	1
1.2	Objetivo.....	2
1.3	Justificativa.....	3
2	Revisão da Literatura.....	4
2.1	Generalidades e evolução do dimensionamento de ciclones.....	4
2.2	Separadores ciclônicos.....	5
2.3	Separadores Úmidos	18
2.3.1	Coleta de partículas na separação úmida.....	18
2.3.1.1	Assentamento por Inércia.....	20
2.3.2	Ciclone úmido de Krames e Bütner.....	26
2.3.3	Separadores com pulverização de água.....	29
2.3.3.1	Separadores com injeção de água contra corrente	36
2.3.3.2	Separadores com injeção de água em fluxo cruzado.....	45
2.3.3.3	Separadores com injeção de água concorrente.....	47
2.4	Alguns tipos de separados e suas aplicações.....	51
2.4.1	Separadores de torre (Scrubber com injeção de água).....	51
2.4.1.1	Lavadores sem enchimento.....	52
2.4.1.2	Lavadores com enchimento.....	54
2.4.2	Lavador com leito fluizado.....	57
2.4.3	Lavadores de borbulhagens.....	58

2.4.4.	Lavador de espuma.....	60
2.4.4.1	Lavador de espuma tipo Elex-Hidro.....	61
2.4.5	Lavadores com os labirintos fechados pela água	62
2.4.5.1.	Lavador Roto - Clone tipo N.....	63
2.4.6	Lavadores rotativos.....	64
2.4.6.1	Lavador rotativo horizontal (desintegrador Theisen).....	64
2.4.6.2	Lavador rotativo vertical.....	66
2.4.7	Lavadores de fluxo ciclônico úmido.....	68
3	Materiais e métodos.....	71
3.1	O equipamento modificado.....	72
3.1.1	Modificações construtivas.....	73
3.1.2	Detalhamento do projeto básico.....	73
3.1.2.1	Descrição circunstanciada do equipamento incluindo os detalhes construtivos.....	75
3.1.3	Metodologia de operação do equipamento.....	81
3.2	Procedimentos de medições.....	82
3.2.1	Medição da vazão de água nos pulverizadores.....	82
3.2.2	Medição da vazão de ar	84
3.2.3	Medição das temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ar.....	84
3.2.4	Sistema de dosagem do material particulado.....	85
3.2.5	Medição da concentração residual de material particulado	87
3.3	Material particulado.....	89
3.4	Metodologia de planejamento de experimentos e análise de resultados.....	90
3.4.1	Planejamento dos testes da primeira fase.....	91
3.4.2	Planejamento dos ensaios para a segunda fase.....	93
4	Resultados e discussões.....	95
4.1	Resultados dos ensaios da primeira fase (determinação das melhores condições de operação do ciclone).....	95

4.1.1	Análise dos ensaios do planejamento fatorial three-way.....	95
4.1.2	Estimativa do consumo de energia do ciclone úmido operando nas melhores condições.....	109
4.1.3	Comparação do consumo energético entre ciclones.....	112
4.2	Resultados dos ensaios da segunda fase (determinação da eficiência de coleta).....	115
4.3	Perspectivas específicas do ciclone lavador.....	120
5	Conclusões.....	121
6	Referências bibliográficas.....	122