

X-006 - DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Sergio Arnosti Junior⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Faculdade de Engenharia Industrial (FEI). Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Professor Titular da Escola de Engenharia de Piracicaba (EEP/FUMEP).

Luiz Camolesi Junior⁽²⁾

Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade de São Paulo (USP). Mestre em Ciência da Computação e Matemática Computacional pela Universidade de São Paulo (USP). Doutor em Física Computacional pela Universidade de São Paulo (USP). Pesquisador da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP (FT/UNICAMP).

José Martins Junior⁽³⁾

Bacharel em Ciência da Computação pela Escola de Engenharia de Piracicaba (EEP/FUMEP). Mestre em Ciência da Computação e Matemática Computacional pela Universidade de São Paulo (USP). Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo (USP). Professor Titular da Escola de Engenharia de Piracicaba (EEP/FUMEP).

Felipe Barboza Oriani⁽⁴⁾

Bacharel em Ciência da Computação pela Escola de Engenharia de Piracicaba (EEP/FUMEP). Desenvolvedor de software e arquiteto de sistemas computacionais.

Robson Carlos da Motta⁽⁵⁾

Bacharel em Ciência da Computação pela Escola de Engenharia de Piracicaba (EEP/FUMEP). Mestre em Inteligência Computacional pela Universidade de São Paulo (USP). Doutorando em Visualização Computacional pela Universidade de São Paulo (USP).

Endereço⁽¹⁾: Avenida Dezoito, 1.161, apto 104 - Rio Claro - SP – CEP: 13500.490 – Brasil – Tel: (19) 3412-1124 – e-mail: sergioarnosti@gmail.com

RESUMO

Alguns equipamentos como é o caso do ciclone e também do lavador de gases, devido às suas características técnicas, são comumente empregados no controle das emissões de material particulado provenientes de atividades industriais. Este fato motiva a busca de novas ferramentas que auxiliem no projeto e no desenvolvimento destes equipamentos e que facilitem seu entendimento quando submetidos a diferentes condições operacionais. Atualmente o estudo destes equipamentos é parte integrante dos currículos dos cursos de graduação voltados especificamente às questões ambientais e também como tema de pesquisa em programas de pós-graduação. Visando contribuir, este trabalho teve por objetivo desenvolver um software que possibilitasse cálculos rápidos através de uma interface intuitiva com o usuário, permitindo o dimensionamento de ciclones e lavadores de gases e principalmente a comparação do uso de diferentes condições operacionais. Constatou-se através dos resultados de aplicação que o software desenvolvido pode ser considerado uma ferramenta facilitadora na comparação entre equipamentos. O software permite a escolha da melhor configuração do equipamento a ser utilizado, o estudo da influência de mudanças nas condições operacionais no dimensionamento e na eficiência dos equipamentos estudados e tudo isso de forma rápida e clara. Conclui-se desta forma que o software tem grande potencial para o uso profissional na área de projetos e desenvolvimento e também com ferramenta didática quando aplicado em cursos de graduação e pós-graduação.

PALAVRAS-CHAVE: software, simulação, ciclone, lavador de gases, poluição atmosférica.

INTRODUÇÃO

As emissões atmosféricas tem sido motivo de grande preocupação por parte de profissionais atuantes nas áreas de pesquisa e desenvolvimento de equipamentos de controle. As emissões de material particulado correspondem a uma parcela significativa dos poluentes emitidos por fontes antropogênicas. Em muitas cidades do Brasil, mesmo em regiões não metropolitanas como no interior do estado de São Paulo, são encontradas áreas com concentrações elevadas de partículas totais em suspensão e também de partículas inaláveis presentes no ar atmosférico.

De acordo com os critérios de classificação, uma sub-região é classificada como “Saturada” quando a média das concentrações do poluente considerado, dos últimos três anos, ultrapassar os padrões nacionais anuais de qualidade do ar e no caso dos padrões de curto prazo (aqueles expressos em horas) a concentração de três ou mais dias ultrapassá-los, considerados também os dados dos últimos três anos. Quando classificada como “Em Vias de Saturação”, isso quer dizer que as concentrações tanto de longo como de curto prazo de uma sub-região excederam a 90% dos padrões nacionais de qualidade do ar, ou seja, média anual e três ou mais dias respectivamente.

No caso específico do estado de São Paulo, considerando a divisão geográfica do estado de São Paulo em Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs), a Classificação de Saturação dos Municípios do Estado de São Paulo de 2008, aprovada pela deliberação do Conselho Estadual do Meio Ambiente nº 24 de 2009, foi publicada pela Resolução da Secretaria do Meio Ambiente nº 61 de 2009 [4]. Esta classificação considerou os dados de monitoramento entre os anos de 2006 e 2008 de longo e curto prazo. Nesta Resolução, as sub-regiões que envolvem os municípios de Piracicaba, Limeira, Cordeirópolis e Santa Gertrudes, que fazem parte da UGRHI 5, encontram-se classificadas como saturadas ou em vias de saturação com relação as concentrações de “Partículas Totais em Suspensão” e “Partículas Inaláveis”.

Esta situação preocupa autoridades e pesquisadores que buscam alternativas para mitigar o efeito da poluição que afeta diretamente a saúde da população. As autoridades, de maneira geral, propõem novas legislações que se tornam cada vez mais restritivas quanto a implantação de novos empreendimentos potencialmente poluidores como é o caso do Decreto Estadual nº 47.397 de 2002 [5], Decreto Estadual nº 48.523 de 2004 [6] e Decreto Estadual nº 50.753 de 2006 [7], que foi posteriormente alterado pelo Decreto Estadual 52.469 de 2007 [8]. Os pesquisadores, por sua vez, procuram desenvolver novas tecnologias ou melhorar as já existentes com o intuito de contribuir para minimizar as emissões atmosféricas e melhorar desta forma a qualidade de vida da população.

Em vista do contexto apresentado, este trabalho tem por objetivo contribuir para o desenvolvimento de ferramentas que auxiliam no dimensionamento e simulação de equipamentos destinados ao controle de emissões atmosféricas. Para tanto, foi desenvolvido um software que possibilita cálculos eficientes e eficazes com uma interface gráfica intuitiva com o usuário, permitindo o dimensionamento de ciclones de fluxo reverso e entrada tangencial e lavadores de gases do tipo “spray”. Além disso, é possível a comparação da eficiência de coleta desses equipamentos, para uma mesma condição operacional, e a comparação de um mesmo equipamento submetido a diferentes condições operacionais.

MATERIAIS E MÉTODOS: DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

CICLONE

O dimensionamento do Ciclone de Fluxo Reverso e Entrada Tangencial foi baseado em equações tradicionais para o estudo e projeto desses equipamentos. Conforme a figura 1, as dimensões típicas são:

- o diâmetro da saída do ar limpo (D_e);
- a largura da entrada tangencial (W);
- a altura da entrada tangencial (H);
- o comprimento do tubo interno (S);
- a altura do corpo cilíndrico (L_b);
- a altura do corpo cônico (L_c);
- o diâmetro do corpo cilíndrico (D) e
- o diâmetro de saída das partículas coletadas (D_d).

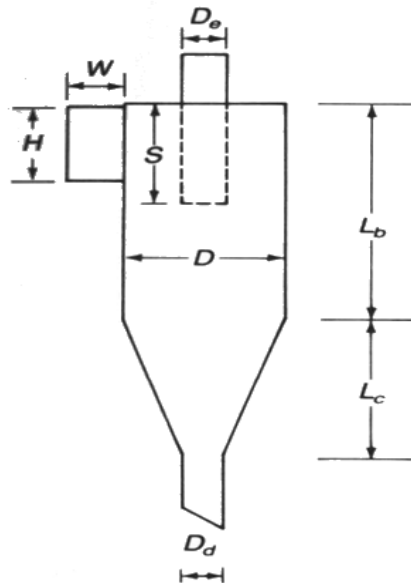


Figura 1: Dimensões características do ciclone [1].

O cálculo do diâmetro do ciclone (D) foi realizado de acordo com a proposta de Kalen e Zens citados por Lora [3], por considerar a existência da velocidade de salto (velocidade mínima do gás que evita a sedimentação das partículas do fluxo de gás que as arrasta), que maximiza a eficiência do ciclone dimensionado, conforme a equação 1.

$$D = 1,312 \cdot 10^{-2} \cdot \left[\frac{Q \cdot \left(1 - \frac{W}{D}\right)}{\left(\frac{H}{D}\right) \left(\frac{W}{D}\right)^{2,2} \cdot \psi^3} \right]^{0,4543} \quad \text{equação}$$

(1)

Nesta equação 1, a função velocidade (ψ) é representada pela equação 2, na qual, a aceleração da gravidade (g) é aplicada em $[m.s^{-2}]$, a viscosidade do gás (μ) em $[Pa.s]$, a massa específica das partículas (ρ_p) em $[kg.m^{-3}]$ e a massa específica do gás (ρ_{ar}) em $[kg.m^{-3}]$.

$$\psi = \left[4g\mu \frac{(\rho_p - \rho_{ar})}{3(\rho_{ar})^2} \right]^{0,333} \quad \text{equação}$$

(2)

As outras dimensões são calculadas a partir das proporções, entre a dimensão de interesse e o diâmetro do ciclone, propostas na literatura para configurações tradicionais do equipamento, como apresentado na tabela 1 adaptada de Cooper e Alley [1].

Tabela 1: Proporções de acordo com o tipo de ciclone.

Valor	ALTA EFICIÊNCIA		PROPÓSITO GERAL	
	Stairmand	Swift	Lapple	Peterson e Whitby
H/D	0,5	0,44	0,5	0,583
W/D	0,2	0,21	0,25	0,208
S/D	0,5	0,5	0,625	0,583
De/D	0,5	0,4	0,5	0,5
Lb/D	1,5	1,4	2	1,333
h/D	4	3,9	4	3,17
Dd/D	0,375	0,4	0,25	0,5
G	551,3	699,2	402,9	324,8

A eficiência fracionária de coleta (η_i) foi calculada a partir do modelo proposto por Leith e Licht em 1972, nas equações 3, 4 e 5, e para a queda de pressão (ΔP) utilizou-se o modelo proposto por Shepherd e Lapple em 1939, na equação 6. A escolha desses modelos, citados por Lora [3], baseou-se na sua ampla aplicação prática e simplicidade.

$$\eta_i = 1 - \exp \left\{ -2 \left[\frac{G \tau_i v A}{(D)^3} (n+1) \right]^{\frac{0,5}{(n+1)}} \right\} \quad \text{equação}$$

(3)

$$\tau_i = 5,56 \times 10^{-2} \left[\frac{\rho_p (dp_i)^2}{\mu} \right] \quad \text{equação}$$

(4)

$$n = 1 - \left[(1 - 0,67(D)^{0,14}) (3,4 \times 10^{-3}(T))^{0,3} \right] \quad \text{equação}$$

(5)

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_{ar} (v)^2 H_v \quad \text{equação}$$

(6)

O tempo de relaxação (τ_i) é calculado em $[s^{-1}]$, a velocidade de entrada do gás (v) é utilizada em $[m.s^{-1}]$, a área de entrada do gás (A) é aplicada em $[m^2]$, o número de vortex (n) é adimensional, o diâmetro médio das partículas (dp_i) é utilizado em $[m]$, a temperatura do gás é utilizada em $[K]$ e para o número de velocidade (H_v) foram utilizados os valores correspondentes a cada uma das configurações de ciclone de interesse, conforme tabela 2.

Tabela 2: Valores de H_v para as diferentes configurações de ciclone utilizadas.

Valor	ALTA EFICIÊNCIA		PROPÓSITO GERAL	
	Stairmand	Swift	Lapple	Peterson e Whitby
H_v	6,40	9,24	7,00	7,76

Para o cálculo da eficiência total de coleta (η_T) foi utilizada a equação 7, na qual, (m_i) é a fração mássica por faixa de tamanho das partículas à serem coletadas.

$$\eta_T = \sum_{i=1}^n \eta_i m_i \quad \text{equação}$$

(7)

LAVADOR DE GASES (tipo “Spray”)

A metodologia utilizada para o dimensionamento de Lavadores de Gases Tipo “spray” segue os mesmos preceitos considerados para os ciclones, isto é, foram utilizados modelos tradicionais reconhecidos por sua aplicabilidade prática e por gerar resultados confiáveis.

O diâmetro do lavador (D_L) em [m] foi calculado a partir da equação 8.

$$D_L = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}} \quad \text{equação}$$

(8)

A altura (H_L) do lavador foi arbitrada e o modelo para o cálculo da eficiência fracionária de coleta das partículas seguiu as equações 9, 10 e 11 propostas por Calvert [1], nas quais, a vazão estimada de líquido (Q_L) foi usada em [m³ de água por m³ de gás], o diâmetro de uma gota (D_G) em [m], a eficiência de coleta de uma única gota (η_i^*) e o parâmetro de impactação (K_p) são adimensionais.

$$\eta_i = 1 - \exp \left\{ -\frac{3}{2} 0,20 \frac{Q_L}{Q} \frac{v_{tG} H_L \eta_i^*}{D_G (v_{tG} - v)} \right\} \quad \text{equação}$$

(9)

$$\eta_i^* = \left(\frac{K_p}{K_p + 0,7} \right)^2 \quad \text{equação}$$

(10)

$$K_p = \frac{\rho_p (dp_t)^2 v}{9 \mu D_G} \quad \text{equação}$$

(11)

A velocidade terminal da gota (v_{tG}) foi calculada pela lei de Stokes, equação 12, para gotas de diâmetros até 100 μm .

$$v_{tG} = \frac{1}{18 \mu} (\rho_G - \rho_{ar}) g (D_G)^2 \quad \text{equação}$$

(12)

Na equação 12, a massa específica da gota (ρ_G) foi utilizada em [kg.m⁻³]. Para o caso dos lavadores a eficiência total de coleta (η_T) também foi calculada considerando a equação 7.

O SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

O software foi projetado para apresentar uma interface intuitiva possibilitando seu uso acadêmico e científico, mas que satisfaz as exigências de utilização em um nível de simulação profissional. No projeto do software, parcialmente apresentado na figura 2, foi utilizado a UML (Linguagem Unificada de Modelagem –

www.uml.org), que proporciona padrões para uma arquitetura flexível de software, incluindo o detalhamento dos processos e funções. A linguagem de programação Java (www.oracle.com/technetwork/java) foi empregada pelos seus benefícios em relação a outras linguagens, pois além de ser uma tecnologia Orientada a Objetos não proprietária (“open source”), também é multi-plataforma e possui componentes de segurança e uma gama de excelentes componentes visuais [2]. A combinação destes recursos tecnológicos permitiu o desenvolvimento de um software com ótima usabilidade e portabilidade para qualquer sistema operacional (ex. Windows, Linux e Solaris).

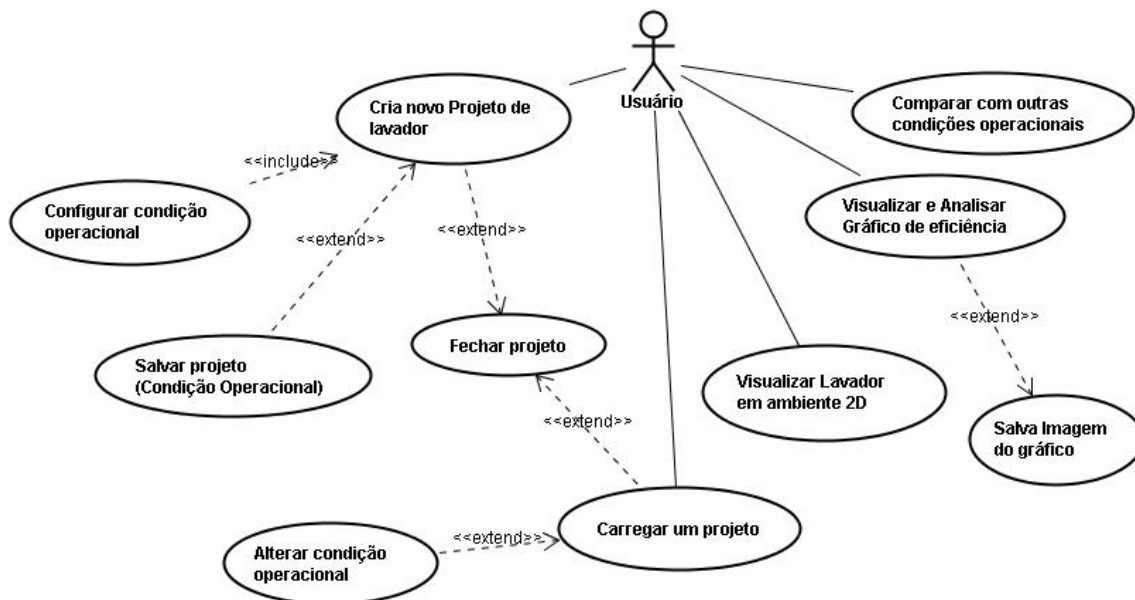


Figura 2: Diagrama de Caso de Uso.

A figura 3 ilustra a interface de entrada das condições de projeto para o lavador de gases sendo que uma tela análoga pode ser gerada também para o ciclone.

:: Condição Operacional

[Propriedades do Gás]

Vazão do Gás [m³/s]: Viscosidade (Pa.s): x 10⁻⁵

Velocidade do Gás [m/s]: Densidade [kg/m³]:

Temperatura [K]: Diâmetro do Lavador [m]:

Pressão [atm]:

[Parâmetros de Projeto]

Altura do Lavador [m]:

Vazão do Líquido / Vazão do Gás (QL/QG): m³ água / m³ ar

[Propriedades da Gota]

Densidade da Gota [kg/m³]:

Diâmetro da Gota [m]:

Velocidade Terminal da Gota [m/s]:

[Partículas]

Tamanho da Partícula (µm):

% massa no tamanho:

Massa Específica (kg/m³):

Tamanho da partícula(µm):	Porcentagem de massa n...	Eficiência Fracionária (n)
1	5.0	0.029
3	5.0	0.7406
5	10.0	0.9905
8	30.0	0.9999
14	30.0	1
24	14.0	1

Porcentagem total(%): 100.0 Eficiência Global: 93.75%

Figura 3: Interface de entrada das condições de projeto do equipamento.

As figuras 4 e 5 ilustram algumas alternativas de resultados gerados pelo software. Ressalta-se que existe a possibilidade de alteração das condições operacionais e uma visualização dinâmica de alteração das dimensões, como também o acompanhamento do efeito da nova condição operacional na eficiência fracionária e total de coleta das partículas. Os resultados representados nas figuras 4 e 5, para o lavador de gases, podem ser obtidos de forma análoga para o ciclone.

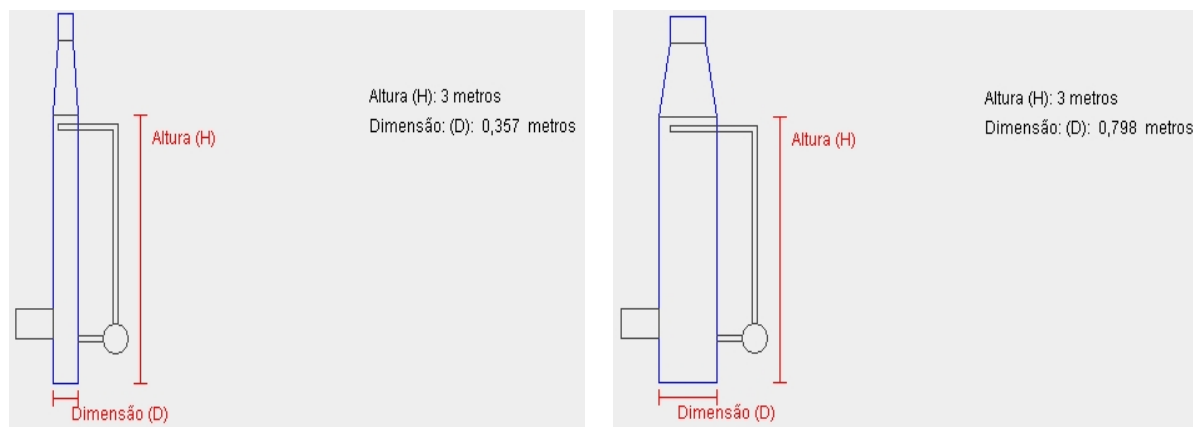


Figura 4: Representação esquemática das principais dimensões do equipamento



Figura 5: Comparação entre curvas de eficiência fracionária, valores de eficiência total, condições operacionais e dimensões do equipamento.

CONCLUSÃO

Este trabalho originou o software que tem larga aplicação nos meios acadêmicos, científicos e profissional para uso na área de projetos e desenvolvimento de equipamentos de controle de emissões atmosféricas. Sua aplicação está ocorrendo de modo gradual, com a utilização em disciplinas de graduação e pós-graduação. Através dos resultados de aplicação, constatou-se que o software desenvolvido deve ser considerado uma ferramenta facilitadora na comparação entre equipamentos. O software permite a escolha da melhor configuração do equipamento a ser utilizado, o estudo da influência de mudanças nas condições operacionais no dimensionamento e na eficiência dos equipamentos.

No planejamento para a continuidade deste trabalho, o software deverá adquirir novos recursos como a representação esquematizada dos equipamentos em três dimensões (3D), incluindo a disponibilidade da animação de seus funcionamentos. Ainda, novos equipamentos deverão ser incluídos, aumentando as potenciais aplicações desta ferramenta para os profissionais da área e também educadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. Air Pollution Control: A Design Approach. 2ª Ed., Waveland Press Inc., 1994, 694p.
2. DEITEL, P. J; DEITEL, H. M. Java for Programmers. Prentice Hall, 2009, 1200p.
3. LORA, E. E. S. Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte, 2ª Ed., Interciência, 2002, 481p.
4. SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente. Resolução nº 61 de 18 de agosto de 2009. D.O.E de 18 de agosto de 2009, Seção I, pags. 30-34.
5. SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. Decreto nº 47.397 de 04 de dezembro de 2002. D.O.E Executivo de 05 de dezembro de 2002, página 03, retificado de acordo com D.O. de 07 de dezembro de 2002.
6. SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. Decreto nº 48.523 de 02 de março de 2004. D.O.E Executivo de 03 de março de 2004.
7. SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. Decreto nº 50.753 de 28 de abril de 2006. D.O.E Executivo de 29 de abril de 2006.
8. SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. Decreto nº 52.469 de 12 de dezembro de 2007. D.O.E Executivo de 13 de dezembro de 2007.