

UM ALGORITMO PARA DIMENSIONAMENTO DE CICLONES

Pedro Maurício

Aluno de Engenharia do Ambiente
Faculdade de Ciência e Tecnologia – UFP
7565@ufp.pt

Pedro Silva

Aluno de Engenharia do Ambiente
Faculdade de Ciência e Tecnologia – UFP

Ana Fonseca

Professora Associada
CEMAS, Faculdade de Ciência e Tecnologia – UFP

Pedro Duarte

Professor Titular
CEMAS, Faculdade de Ciência e Tecnologia – UFP

RESUMO

Os ciclones são instrumentos de separação gás-sólido, largamente utilizados na indústria. O seu dimensionamento resulta da conjugação de diversas variáveis que afectam a performance deste equipamento, muitas vezes através de um processo iterativo baseado na experiência do executante, com alguma subjectividade associada. Neste estudo desenvolveu-se um algoritmo de dimensionamento automático de ciclones que permite obter resultados fiáveis, optimizando as dimensões e o número de ciclones e respectivas dimensões a partir de duas restrições – eficiência mínima de captura das partículas e perda de carga máxima do gás.

ABSTRACT

Cyclones are gas-solid separation devices, largely used in industry. The cyclone design process is based on the combination of several variables that influence its performance. This is an iterative process dependent, most of the times, on individual experience. In this study, an algorithm was developed for automatic cyclone designing, which has produced reproducible results, optimizing the dimensions and the number of cyclones given two limiting conditions – minimum particle capture efficiency and maximum head loss.

1. INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

Os ciclones são instrumentos de separação gás-sólido, largamente utilizados na indústria, essencialmente com os seguintes objectivos: separação e recuperação de material sólido, despoejamento para cumprimento de valores limite de emissão, ou ainda pré-despoejamento para reduzir a carga de sólidos num despojeador secundário (como por exemplo, um filtro de mangas ou um precipitador electrostático). Os baixos custos de investimento e manutenção dos ciclones tornam este equipamento muito atractivo, para além do facto de ser facilmente adaptável a condições operatórias extremas como elevadas concentrações de partículas e altas temperatura e pressões do gás (Mothes e Loffler, 1988; Li e Wang, 1989).

O ciclone de fluxo invertido com entrada tangencial (Figura 1) é o mais utilizado para o despoejamento de gases em ambiente industrial. É formado por um corpo cilíndrico de diâmetro D e altura h , seguido de um corpo cónico em que o diâmetro decresce até atingir o valor Db , sendo H a altura total do ciclone (corpo cilíndrico + corpo cónico). O gás contaminado com partículas entra no ciclone tangencialmente através da secção ab (próximo do topo), e desce um vórtice descendente próximo das paredes (vórtice exterior), invertendo depois o sentido do fluxo e formando um vórtice ascendente na zona mais interior do ciclone (vórtice interior). A saída do gás é então feita pelo topo do ciclone através de um tubo cilíndrico de diâmetro De com uma altura s no interior do ciclone. No movimento circular descendente do gás as partículas mais pesadas, devido à densidade e/ou tamanho, são atiradas contra as paredes do ciclone através de forças centrífugas, descendo para a base do ciclone,

por onde irão sair. As partículas mais finas acompanham a trajectória do gás e saem pelo topo do ciclone. Em certas situações podem ser acompanhadas por partículas mais grosseiras que, mesmo depois de separadas, reentram na corrente gasosa como resultado de uma eventual velocidade excessiva no interior do ciclone (Licht, 1980; Ogawa, 1997).

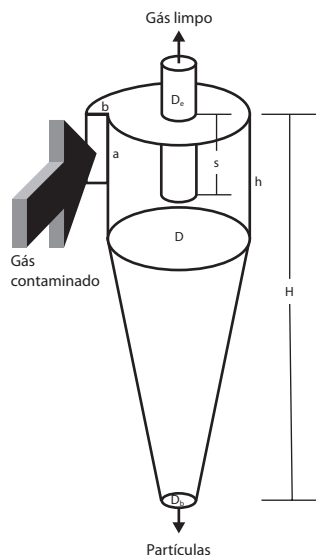


Figura 1: Ciclone de fluxo invertido (adaptado de Salcedo e Pinho, 2003).

A performance de um ciclone caracteriza-se pela eficiência de captura das partículas (η) e pela perda de carga (ΔP) que o gás sofre neste equipamento. A eficiência de captura das partículas está associada à função do ciclone, enquanto que a perda de carga do gás está directamente relacionada com os custos operatórios (energia) deste equipamento.

Existem diversos factores que influenciam a performance de um ciclone, de entre os quais se destacam: as dimensões do ciclone, o caudal de gás que o atravessa (Q) e a

densidade (ρ_p) e tamanho (d_p) das partículas a capturar. Note-se que as dimensões do ciclone e o caudal de gás têm efeitos opostos na sua performance: um aumento no tamanho do ciclone prejudicará a sua eficiência de captura, mas resultará num custo operativo menor, passando-se exactamente o contrário se se aumentar o caudal de gás. Sendo assim, no processo de dimensionamento do ciclone estas duas variáveis têm de ser adequadamente conjugadas por forma a otimizar a performance deste equipamento.

Por vezes, a utilização de baterias de N ciclones em paralelo é uma solução adequada para o projecto de ciclones, uma vez que a divisão do caudal total de gás pelos N ciclones permite atingir valores mais baixos de ΔP . Para que a eficiência de remoção das partículas se mantenha elevada as baterias de multiciclones podem necessitar de um número muito elevado de ciclones em paralelo, estando descritos na literatura casos de baterias com mais de 500 unidades (ver, por exemplo, Licht, 1980).

O método de dimensionamento dos ciclones é um processo iterativo, em que o utilizador vai fazendo variar as dimensões e o número de ciclones, em função dos valores de η e ΔP sucessivamente obtidos, até conseguir uma solução aceitável dentro das restrições impostas a nível daqueles dois parâmetros. A utilização deste método iterativo implica que o processo de dimensionamento pode culminar em diversas soluções, quando efectuado por diferentes especialistas ou pelo mesmo especialista, em alturas diferentes. Sendo assim, não há uma solução única, mas sim uma família de soluções possíveis.

O objectivo deste trabalho foi o desenvolvimento e implementação em computador

de um algoritmo para dimensionamento automático de ciclones, partindo de dados relativos às características do gás a tratar e das partículas a remover, impondo como restrição o valor da eficiência de captura mínimo pretendido e o valor máximo da perda de carga admissível, e garantido a obtenção de uma solução única para cada problema de dimensionamento.

Este trabalho foi parcialmente desenvolvido no âmbito das unidades curriculares de Técnicas de Simulação Numérica e Tecnologias não Poluentes, disciplinas do 5º ano da licenciatura em Engenharia do Ambiente da Universidade Fernando Pessoa, que decorreram no primeiro semestre do ano lectivo de 2005-6.

2. PROJECTO E DIMENSIONAMENTO DE CICLONES

O projecto e dimensionamento de ciclones tem sido tradicionalmente baseado em 'famílias' de geometrias. Heumann (1991) sugere uma regra básica no dimensionamento de ciclones: utilizar sempre ciclones cuja performance já tenha sido determinada ou verificada através de testes em ciclones da mesma 'família', ou seja, com a mesma geometria. Estas 'famílias' de ciclones caracterizam-se por razões fixas entre as 8 dimensões chave do ciclone (ver Figura 1). As mais conhecidas são a 'família Starimand' e a 'família Lapple', apresentando-se na Tabela 1 as características destas duas geometrias de ciclones.

A regra básica para dimensionar ciclones sugerida por Heumann (1991) demonstra a dificuldade existente em prever com alguma fiabilidade a performance do ciclone, quer no que diz respeito a η quer a ΔP . Têm sido desenvolvidas muitas

teorias para prever a performance dos ciclones (por exemplo Leith e Licht, 1972; Li e Wang, 1989; Iozia e Leith, 1989 e 1990; Ramachandran *et al.*, 1990), e encontram-se na literatura alguns trabalhos que estudaram a aplicabilidade destas teorias comparando as suas previsões com resultados experimentais obtidos em ciclones laboratoriais ou em equipamento piloto (por exemplo: Clift *et al.*, 1991; Bohner e Lorentz, 1993; Salcedo, 1993, Hoffmann *et al.*, 1996; Salcedo e Fonseca, 1996; Salcedo e Coelho, 1999; Xiang *et al.*, 2001).

Dimensões	Stairmand	Lapple
a/D	0.5	0.5
b/D	0.2	0.25
s/D	0.5	0.625
De/D	0.5	0.5
h/D	1.5	2
H/D	4	4
Db/D	0.375	0.25

Tabela 1: Características da geometria dos ciclones das ‘famílias’ Stairmand e Lapple (Heumann, 1991)

Para a elaboração do algoritmo proposto no presente trabalho procuraram-se teorias cujas equações não fossem demasiado complexas, mas cujos resultados traduzissem razoavelmente a performance do ciclone. Os modelos seleccionados foram o método logístico proposto por Iozia e Leith (1989, 1990) para a previsão da eficiência de captura, e o modelo empírico de Ramachandran *et al.* (1990) para a queda de pressão.

As equações a ter em conta são então as seguintes (Iozia e Leith, 1989 e 1990): para um gás de densidade ρ e viscosidade μ a passar num ciclone com um caudal Q , a eficiência de captura fraccional (η_{dp}), ou seja, a eficiência com que são capturadas as partículas com diâmetro dp , é dada por:

$$\eta_{dp} = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{dp}\right)^\beta} \quad (1)$$

Na equação anterior surge a variável d_{50} , que corresponde ao diâmetro da partícula capturada com 50% de eficiência. O valor desta variável calcula-se através da equação (Iozia e Leith, 1990):

$$d_{50} = \left(\frac{9 * \mu * Q}{\pi * \rho_p * (H - s) * v_{tmax}^2} \right)^{1/2} \quad (2)$$

em que v_{tmax} representa a velocidade tangencial máxima no interior do ciclone, e pode ser calculada através da equação (Iozia e Leith, 1990):

$$v_{\text{máx}} = 6,1 * \frac{Q}{ab} * \left(\frac{ab}{D^2}\right)^{0,61} * \left(\frac{De}{D}\right)^{-0,74} * \left(\frac{H}{D}\right)^{-0,33} \quad (3)$$

A partir de dados obtidos experimentalmente, lozia e Leith (1990) desenvolveram uma equação para prever o coeficiente β da equação (1):

$$\ln \beta = 0,62 - 0,87 * \ln(d_{50} * 0,01) + 5,21 * \ln\left(\frac{ab}{D^2}\right) + 1,05 * \left[\ln\left(\frac{ab}{D^2}\right)\right]^2 \quad (4)$$

Para obter a eficiência de captura global (η , em %) basta ponderar as eficiências fraccionais obtidas para cada classe de diâmetros com a correspondente percentagem mássica ($\%m_{dp}$):

$$\eta = \sum \eta_{dp} * \%m_{dp} \quad (5)$$

Quanto à perda de carga no ciclone (ΔP , em kPa) as equações são as seguintes (Ramachandran *et al.*, 1990):

$$\Delta P = \Delta H * \frac{\left(\frac{Q}{a * b}\right)^2 * \rho}{1960} \quad (6)$$

onde

$$\Delta H = 20 \frac{ab}{De^2} * \left(\frac{\frac{s}{D}}{\frac{H}{D} * \frac{h}{D} * \frac{Db}{D}}\right)^{(1/3)} \quad (7)$$

Como já foi referido acima, uma velocidade excessiva no interior do ciclone pode provocar a reentrada das partículas na corrente gasosa, diminuindo a eficiência de captura prevista teoricamente. Ogawa (1997) estudou este fenómeno em ciclones de várias geometrias, e propõe a seguinte equação para estimar o diâmetro abaixo do qual existem fenómenos de reentrada das partículas no gás:

$$D^* = 0,02626 * \left(\frac{Q * \rho^2}{\mu * \rho_p} * \frac{1 - \frac{b}{D}}{\frac{a}{D} * \left(\frac{b}{D}\right)^{2,2}}\right)^{0,454} \quad (8).$$

3. ALGORITMO PARA DIMENSIONAMENTO DE CICLONES

Quando se pretende dimensionar um ciclone ou um conjunto de ciclones, importa primeiro definir um conjunto de parâmetros: caudal do gás a tratar (Q), a sua viscosidade e densidade (μ e ρ), a densidade (ρ_p) e a distribuição granulométrica das partículas que se pretende remover, assim como a eficiência (η) e a perda de carga (ΔP) pretendidas.

O algoritmo para dimensionamento dos ciclones faz uso das equações 1 a 8, descritas anteriormente. Foi implementado em MatLab, através do desenvolvimento de um conjunto de sub-rotinas, invocadas a partir de um programa principal, utilizando assim uma metodologia típica de programação estruturada. O princípio geral do algoritmo é o seguinte: depois de indicados os parâmetros referidos no parágrafo anterior e de atribuído um diâmetro inicial ao ciclone, o algoritmo verifica se as condições impostas em termos de η e ΔP são respeitadas. Se uma delas for violada, o diâmetro do ciclone vai sendo recalculado iterativamente, de modo que a condição seja respeitada. No entanto, pode não haver um diâmetro adequado para satisfazer simultaneamente as duas condições. Nesse caso, o algoritmo incrementa o número de ciclones e recomeça nova iteração.

Importa salientar que o aumento do diâmetro leva a uma redução de η e de ΔP , e vice-versa, quando se trata de uma diminuição do diâmetro. Deste modo, quando o algoritmo aumenta o diâmetro de modo a reduzir ΔP para o nível desejado, importa que o faça dentro do estritamente necessário, para que η não seja reduzida em demasia. Por analogia, quando reduz o diâmetro de modo a aumentar η ,

importa que o faça dentro do estritamente necessário também, para que ΔP , não aumente demasiado.

Na Figura 2 apresenta-se o fluxograma do algoritmo e respectivo programa implementado em MatLab. A primeira fase corresponde à entrada de dados, representada no topo do fluxograma. Quando o programa principal (DimensionamentoDeCiclones1) é executado, surge uma janela que permite introduzir os parâmetros necessários para os cálculos a efectuar (Figura 3). Importa referir que o parâmetro “tolerância” é utilizado para determinar os graus de aproximação de η e ΔP pretendidos. Ou seja, considera-se que ΔP está optimizada quando é menor que o valor pretendido, respeitando a restrição:

$$\Delta P_{lim} - \Delta P_{lim.tolerancia} < \Delta P < \Delta P_{lim} \quad (9)$$

onde ΔP_{lim} representa o valor máximo admitido para ΔP .

No caso de η , considera-se que está optimizada, quando é superior ao valor limite, respeitando a seguinte restrição:

$$\eta_{lim} < \eta < \eta_{lim} + \eta_{lim.tolerancia} \quad (10)$$

onde η_{lim} representa o valor mínimo admitido para η .

Quanto menor for a tolerância, menos provável é que o respeito de uma das condições implique a violação da outra.

Depois de definidos os parâmetros, surge outra janela que permite escolher um ficheiro que contém as classes granulométricas das partículas a serem removidas pelo ciclone e respectivas percentagens mássicas.

Numa fase seguinte, o programa principal calcula η e ΔP do ciclone e verifica se as mesmas se encontram dentro dos valores estipulados (Condição 1 na Figura 2). Caso

não se encontrem, testa se o problema está na perda de carga (Condição 2). Se o teste for positivo, invoca uma sub-rotina recursiva “CalcularDiametroMaximo”

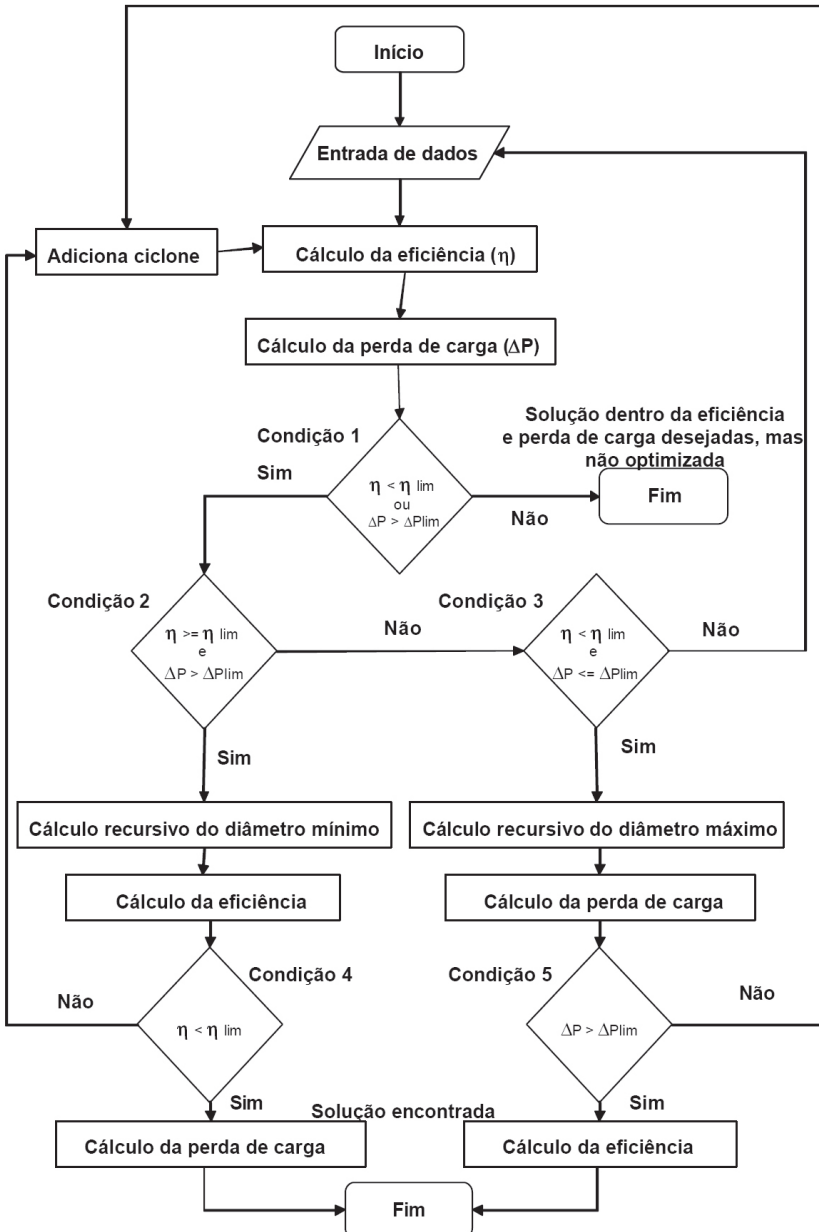


Figura 2: Fluxograma do algoritmo utilizado.

Figura 3: Janela para introdução de parâmetros.

que aumenta o diâmetro o mínimo possível, até satisfazer a restrição (9). Logo que a perda de carga esteja dentro do valor pretendido, a sub-rotina é interrompida. O processo de procura do diâmetro é baseado num algoritmo de pesquisa binária (Vasconcelos e Carvalho, 2005). Define-se um intervalo de diâmetros para pesquisa e, recursivamente, procura-se a metade do intervalo em que se encontra a solução. Em cada iteração o intervalo é mais estreito. De seguida, o programa principal testa se o aumento do diâmetro não comprometeu a condição de eficiência (Condição 4). No caso positivo, adiciona-se mais um ciclone, divide-se o caudal pelo número de ciclones e recomeça-se o algoritmo.

Se o teste da Condição 2 for negativo, passa-se à Condição 3. Se o respectivo teste for negativo, volta-se à entrada de dados, sendo necessário modificar os parâmetros de entrada. Se for positivo, é invocada a sub-rotina recursiva “CalcularDiametro-Minimo”. Esta reduz o diâmetro o mínimo possível, até satisfazer a restrição 2. Mais

uma vez a procura do diâmetro é efectuada segundo um algoritmo de pesquisa binária. De seguida, o programa principal testa se a redução do diâmetro não comprometeu a condição de perda de carga (Condição 5). No caso positivo, adiciona-se mais um ciclone, divide-se o caudal pelo número de ciclones e recomeça-se o algoritmo. Importa salientar que o algoritmo estima um óptimo global dentro das restrições impostas a nível de η e de ΔP . Quanto menor for a tolerância, melhor será a estimativa do referido óptimo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algoritmo e respectivo *software* foram testados com alguns exemplos de dimensionamento para ambas as famílias de ciclones – Stairmand e Lapple. O programa principal permite escolher o ficheiro (formato Excel) onde se encontram os parâmetros de ambas as famílias (ver Tabela 1), bem como o ficheiro (formato texto) que contém as percentagens mássicas das classes granulométricas das partículas do efluente (ver um exemplo na Tabela 2). A Tabela 3 contém o conjunto de testes realizados e os respectivos resultados.

Dp (μm)	%m
1	0.5
3.5	19.5
7	40
12	30
20	8
50	2

Tabela 2: Distribuição granulométrica das partículas utilizada nas simulações efectuadas.

Analisando a coluna 1 da Tabela 3 verifica-se que a solução apresentada consiste num elevado número de ciclones, quer a

Condições iniciais	1	2	3	4	5	6
Diâmetro inicial proposto (m)	3	3	3	3	3	3
Eficiência pretendida (%)	97.9	97.9	97.9	97.9	80	97.9
Perda de carga pretendida (kPa)	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	0.775
Tolerância	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Nº máximo de ciclones	5000	5000	5000	5000	5000	5000
Caudal (m ³ .s ⁻¹)	165	16.5	165	165	165	165
Viscosidade do fluido (Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)	2.48X10 ⁻⁵	2.48X10 ⁻⁵	2.48X10 ⁻⁵	2.48X10 ⁻⁵	2.48X10 ⁻⁵	2.48X10 ⁻⁵
Densidade do fluido (Kg.m ⁻³)	0.728	0.728	0.728	0.800	0.728	0.728
Densidade da partícula (Kg.m ⁻³)	1600	1600	2000	1600	1600	1600
Ciclones da família Stairmand						
Eficiência para condições iniciais (%)	91.33	46.30	94.27	91.33	91.33	91.33
Perda de carga para condições iniciais (kPa)	60.49	0.60	60.49	66.48	60.49	60.49
Soluções:						
Diâmetro (m)	0.25	0.25	0.31	0.21	0.89	0.18
Eficiência final (%)	97.90	97.91	97.96	97.90	80.04	97.91
Perda de carga final (kPa)	1.52	1.51	1.55	1.22	1.54	0.77
Nº de ciclones	927	93	586	1468	71	2543
Ciclones da família Lapple						
Eficiência para condições iniciais (%)	89.21	43.01	92.60	89.21	89.21	89.21
Perda de carga para condições iniciais (kPa)	54.22	0.54	54.2	59.58	54.21	54.21
Soluções:						
Diâmetro (m)	0.23	0.23	0.29	0.22	0.82	0.17
Eficiência final (%)	97.98	97.98	97.95	97.97	80.04	97.94
Perda de carga final	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	0.77
Nº de ciclones	976	98	619	1119	79	2717

Tabela 3: Resultados de várias experiências de optimização para ciclones da família Stairmand e Lapple. As primeiras 9 linhas indicam os valores dos parâmetros correspondentes à Figura 3. As linhas seguintes indicam a eficiência e perda de carga correspondentes às condições iniciais definidas nas linhas anteriores seguidas pelas soluções do algoritmo, primeiro para ciclones da família Stairmand e depois para ciclones da família Lapple. Todos os resultados foram obtidos em função da distribuição granulométrica indicada na Tabela 2. Os valores a negrito em cada coluna indicam o parâmetro alterado relativamente à coluna 1.

escolha seja a geometria Lapple quer a Stairmand. Isto deve-se ao facto de o problema em estudo ser de difícil resolução técnica uma vez que se pretende tratar de um caudal de gás elevadíssimo, com uma eficiência de captura exigida muito alta. Na coluna 2 da referida tabela verifica-se que uma diminuição de 10 vezes no valor do caudal resulta numa redução muito significativa no número de ciclones neces-

sário para manter a mesma performance, como seria de esperar teoricamente. Outro factor que condiciona significativamente a performance do ciclone é a diferença entre as densidades das partículas e do gás. Os resultados das simulações efectuadas são coerentes com esta expectativa teórica, como se pode ver pelas colunas 3 e 4 da Tabela 3. Note-se em particular o caso do aumento da densidade do gás

(coluna 4): é a situação em que o valor da perda de carga está mais afastado do limite imposto, indicando aparentemente um 'desperdício' na optimização do sistema, mas que é justificado pela necessidade de obedecer à restrição do diâmetro mínimo (equação 8).

Quanto aos valores da performance exigidos para o ciclone, na coluna 5 da Tabela 3 pode-se verificar que as simulações efectuadas comprovam o esperado: diminuindo a eficiência exigida o problema torna-se tecnicamente mais simples de resolver, verificando-se precisamente o contrário quando se diminui a perda de carga tolerada (coluna 6).

5. CONCLUSÕES

O trabalho realizado permitiu o desenvolvimento de um algoritmo de dimensionamento automático de ciclones e a sua implementação em MatLab. Apesar da sua natureza iterativa, a obtenção da solução final é praticamente instantânea num computador pessoal (Pentium 3, por exemplo). O emprego do algoritmo descrito permite evitar a subjectividade típica de realização dos cálculos quando o engenheiro, por tentativa e erro e a partir do seu conhecimento, procura uma solução válida para o problema, que com bastante probabilidade será diferente da solução também válida encontrada por outro engenheiro. Além disso, garante que as dimensões finais obtidas e o respectivo número de ciclones cumprem as restrições impostas, a nível de perda de carga e eficiência, sem "exagero". Ou seja, obtendo valores finais para ambas as restrições praticamente iguais aos valores de projecto. Deste modo, evita-se, por exemplo, reduzir em demasia a perda de carga, sacrificando a eficiência e vice-versa.

6. NOMENCLATURA

- a Altura da secção de entrada do gás no ciclone (m)
- b Largura da secção de entrada do gás no ciclone (m)
- d_p Diâmetro das partículas (m)
- d_{50} Diâmetro da partícula capturada com 50% de eficiência no ciclone (m)
- D Diâmetro do corpo cilíndrico do ciclone (m)
- D* Valor do diâmetro do ciclone abaixo do qual pode ocorrer re-entrada de partículas no gás
- Db Menor diâmetro do corpo cónico do ciclone (m)
- De Diâmetro do cilindro por onde o gás sai do ciclone (m)
- h Altura do corpo cilíndrico do ciclone (m)
- H Altura total do ciclone (m)
- N Número total de ciclones numa bateria de ciclones em paralelo
- Q Caudal de gás que atravessa o ciclone ($m^3.s^{-1}$)
- s Comprimento, no interior do ciclone, do cilindro por onde sai o gás (m)
- v_{tmax} Velocidade tangencial máxima no interior do ciclone ($m.s^{-1}$)
- β Coeficiente na equação (1)
- ΔP Perda de carga do gás no ciclone (kPa)
- ΔP_{lim} Valor máximo admitido para a perda de v «carga do gás no ciclone (kPa)
- ρ Densidade do gás ($Kg.m^{-3}$)
- ρ_p Densidade das partículas ($Kg.m^{-3}$)
- μ Viscosidade do gás ($Kg.m^{-1}.s^{-1}$)
- μ Eficiência global de captura das partículas no ciclone (%)
- η_{dp} Eficiência fraccional de captura das partículas de diâmetro d_p no ciclone

- η_{lim} Valor mínimo admitido para a eficiência global de captura das partículas no ciclone
- $\%m_{dp}$ Percentagem mássica correspondente às partículas da classe de diâmetro d_p

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bohnet, M. e Lorenz, T. (1993). Separation Efficiency and Pressure Drop of Cyclones at High Temperatures. *In: Clift, R., Seville, J. P. K. (Ed.). Gas Cleaning at High Temperatures.* London, Blackie Academic and Professional, pp. 17-31.
- Clift, R., Ghadir, M. e Hoffman, A. C. (1991). A Critique of Two Models for Cyclone Performance. *In: AIChE J.*, 37, pp. 285-289.
- Heumann, W.L. (1991). Cyclone Separators: A Family Affair. *In: Chem. Eng.*, June, pp. 118-123.
- Hoffman, A.C., Groot, M. e Hospers, A. (1996). The Effect of Dust Collection System on the Flowpattern and Separation Efficiency of a Gas Cyclone. *In: Can. J. Chem. Eng.*, 74, pp. 464-470.
- Ioza, D.L. e Leith, D. (1989). Effect of Cyclone Dimensions on Gas Flow Pattern and Collection Efficiency. *In: Aerosol Science and Technology*, 10, pp. 491-500.
- Ioza, D. L., e Leith, D. (1990). The Logistic Function and Cyclone Fractional Efficiency. *In: Aerosol Science and Technology*, 12, pp. 598-606.
- Leith, D. e Licht, W. (1972). The Collection Efficiency of Cyclone Type Particle Collectors – A New Theoretical Approach. *In: AIChE Symp. Ser.*, 126, pp. 196-206.
- Li, E. e Wang, Y. (1989). A New Theory of Cyclone Separators. *In: AIChE. J.*, 15, pp. 666-669.
- Licht, W. (1980). *Air Pollution Control Engineering - Basic Calculations for Particulate Collections.* New York, Marcel Dekker.
- Moes, H. e Löffler, F. (1988). Prediction of Particle Removal in Cyclone Separators. *In: Int. Chem. Eng.*, 28, pp.231-240.
- Ogawa, A. (1997). Mechanical Separation Process and Flow Patterns of Cyclone Dust Collectors. *In: Appl. Mech. Rev.*, 50, pp. 97-130.
- Ramachandran, G.; Leith, D.; Dirgo, J. e Feldman, H. (1990). Cyclone Optimization based on a New Empirical Model for Pressure Drop. *In: Aerosol Sci. Technol.*, 15, pp. 135-148.
- Salcedo, R.L. (1993). Collection Efficiencies and Particle Size Distribution from Sampling Cyclones - Comparison of Recent Theories with Experimental Data. *In: Can. J. Chem. Eng.*, 71, pp. 20-27.
- Salcedo, R.L. e Fonseca, A.M. (1996). Grade Efficiencies and Particle Size Distributions from Sampling Cyclones. *In: P. Cheremisinoff (Ed.). Mixed-Flow Hydrodynamics - Advances in Engineering Fluid Mechanics Series,* Gulf Publishing Company, pp. 539-561.
- Salcedo, R. L. e Coelho, M. A. (1999). Turbulent Dispersion Coefficients in Cyclone Flows: An Empirical Approach. *In: Can. J. Chem. Eng.*, 77, pp. 609-617.
- Salcedo, R. L. e Pinho, M. J. (2003). Pilot and Industrial-Scale Experimental Investigation of Numerically Optimized Cyclones. *In: Ind. Eng. Chem. Res.*, 42 (1), pp. 145-154.
- Vasconcelos, J.B. e Carvalho, J.V. (2005). *Algoritmia e Estruturas de Dados. Programação nas Linguagens C e Java.* Centro Atlântico.
- Xiang, R.; Park, S.H. e Lee, K.W. (2001). Effects of Cone Dimension on Cyclone Performance, *In: Journal of Aerosol Science*, 32, pp. 549-561.