



## **Modelagem matemática não linear em ciclones: levantamento de dados experimentais e influência das condições de operação na eficiência de coleta** **Cyclones non-linear mathematical modeling: experimental data collection and the influence of operating conditions in collection efficiency**

Márcia Peixoto Vega Domiciano<sup>1</sup>

Claudia Miriam Scheid<sup>2</sup>

Thiago Ferreira Ribeiro<sup>3</sup>

Marcela Galdino Freitas<sup>4</sup>

Rafael Patricio<sup>5</sup>

Frederico Costa<sup>6</sup>

**Resumo:** Ciclones são frequentemente utilizados na indústria química para promover a separação de partículas em uma corrente gasosa. A facilidade de construção, os baixos custos de operação e a habilidade de poder operar a altas temperaturas e pressões são algumas das características que tornam este equipamento de separação atraente para a indústria. A suspensão sólido-gás é alimentada tangencialmente na região próxima ao topo do equipamento e a separação das partículas no interior do ciclone é efetuada pela ação do campo centrífugo resultante da configuração do equipamento e do modo pelo qual a suspensão é alimentada. O desempenho de um ciclone depende de suas dimensões e das proporções entre elas, das propriedades físicas do sistema particulado e das condições operacionais. Foi construída uma aparelhagem experimental que possibilitasse o levantamento de dados experimentais em diversas condições de operação. Os efeitos da vazão de operação, da concentração de sólidos e do diâmetro de partícula foram estudados para a obtenção da eficiência de coleta e do diâmetro de corte do ciclone. Apesar de o ciclone utilizado ter sido

<sup>1</sup>UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

<sup>2</sup>UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

<sup>3</sup>UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

<sup>4</sup>UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

<sup>5</sup>UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

<sup>6</sup>UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

confeccionado com geometria diferente das famílias de ciclone Lapple e Stairmand, os resultados obtidos corroboraram os dados da literatura. O principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia para operação de ciclones para fins de obtenção de dados experimentais a serem utilizados na elaboração de modelos empíricos não lineares baseados em redes neurais.

**Palavras-chave:** Eficiência; particulado; separação.

---

**Abstract:** Cyclones are often used in the chemical industry to promote the separation of particles in a gas stream. The ease of construction, low operating costs and the ability to operate at high temperatures and pressures are some of the features that make this an attractive separation equipment for the industry. The solid-gas suspension is fed tangentially in the region near the top of the equipment and the separation of the particles inside the cyclone is made by the action of the resulting centrifugal field of equipment configuration and the way in which the suspension is fed. The performance of a cyclone depends on its dimensions and proportions between them, the physical properties of the particulate system, and the operating conditions. An experimental apparatus was built that enabled the collection of experimental data for various operating conditions. The influence of the operating flow rate, solids concentration and particle diameter were studied for predicting the collection efficiency of the cyclone and the cutting diameter. Although the cyclone has been made to use different geometry than Stairmand and Lapple cyclone families, the results corroborate the literature. The main objective of this work was to develop a methodology for cyclone operation for the purpose of obtaining experimental data to be used for building non-linear empirical models based on neural networks.

**Keywords:** Efficiency; particulate; separation.

---

## 1. Introdução

Amplamente utilizados na indústria química para promover a separação de partículas em uma corrente gasosa, os ciclones são constituídos por uma região cilíndrica acoplada a uma seção cônica. Suas principais vantagens são a facilidade de construção, os baixos custos de operação e a habilidade de poder operar a altas temperaturas e pressões.

A suspensão sólido-gás é alimentada tangencialmente na região próxima ao topo do equipamento e a separação das partículas no interior do ciclone é efetuada pela ação do campo centrífugo resultante da configuração do equipamento e do modo pelo qual a suspensão é alimentada. O desempenho de um ciclone depende de suas dimensões e das proporções entre elas (a configuração), das propriedades físicas do sistema particulado (densidades do sólido e do fluido, viscosidade do fluido, distribuição granulométrica das partículas) e das condições operacionais (vazão de fluido e concentração de sólidos na alimentação).

Os ciclones são caracterizados por apresentar comportamento não linear. A identificação de sistemas não lineares ainda apresenta questões em aberto porque não há uma teoria bem estabelecida para este ramo do controle de processos. Foi construída uma aparelhagem experimental que possibilitou o levantamento de dados experimentais em diversas condições de operação visando à construção de um modelo matemático não linear. No tratamento dos dados obtidos experimentalmente, foram feitas análises visando o estudo do desempenho do ciclone em relação às informações presentes na literatura. As variáveis analisadas neste trabalho foram a influência da vazão de operação, da concentração de sólidos e do diâmetro de partícula na obtenção da eficiência de coleta e do diâmetro de corte do ciclone.

## 2. Revisão de literatura

A análise granulométrica classifica um conjunto de partículas baseada na distribuição por tamanhos (CARNEIRO, 1981). Tal distribuição pode ser caracterizada por uma fração em massa de partículas ( $Y$ ) com diâmetro menor que  $D$  (diâmetro característico de cada análise).

As análises granulométricas podem ser feitas por diversas técnicas experimentais e uma das mais simples é o peneiramento. Existem também equipamentos mais sofisticados, os quais permitem uma análise com precisão muito maior, tais como o equipamento Malvern Mastersizer 2000, empregado neste trabalho. Existem na literatura modelos estatísticos simples que podem ser usados para ajustar os dados provenientes de uma análise granulométrica (ALLEN, 1997).

Alguns dos principais equipamentos utilizados na remoção de partículas de correntes gasosas são (DAMASCENO, 1996): câmaras de poeira, filtros de mangas, lavadores de gases, precipitadores eletrostáticos e ciclones. Os ciclones são equipamentos amplamente utilizados na

indústria química para promover a separação de partículas em uma corrente gasosa e são constituídos por uma região cilíndrica acoplada a uma seção cônica (KOCH & LICHT, 1980, RODRIGUES, 2001).

Para o projeto de ciclones é necessário o uso de métodos que permitam o cálculo antecipado da eficiência de coleta. O estudo da fluidodinâmica da partícula vem recebendo contribuições teóricas significativas, indicando que, num futuro próximo, o projeto e análise do desempenho destes equipamentos poderão deixar de ser fundamentalmente empíricos, como ocorre com os modelos clássicos de Lapple (1951) e Leith & Litch (1972). Os modelos desenvolvidos foram incorporando cada vez mais hipóteses para tentar simular corretamente os fenômenos que ocorrem no interior do ciclone. As teorias existentes incorporaram as propriedades físicas do sólido alimentado, as propriedades físicas do fluido de transporte, as condições de operação e as características geométricas do ciclone (LEITH & LITCH, 1972).

Diversas teorias (modelos) foram desenvolvidas baseando-se em hipóteses simplificadoras distintas. Um destes primeiros métodos desenvolvidos para estimar a eficiência de coleta de ciclones foi o modelo de Lapple (1951). Sua teoria baseou-se num balanço de forças para a partícula quase estacionária, assumindo que o tempo de residência da partícula pode ser expresso através do número de voltas do gás dentro do ciclone (RODRIGUES, 2001).

Barth (1956) calculou a velocidade terminal das partículas com base no balanço de forças que nelas atuam. Dirgo et al. (1985a, b) modificaram a teoria de Barth e encontraram uma expressão simples para descrever o gráfico de Barth sobre eficiência de coleta. Iozia et al. (1990), baseados nas teorias de Lapple e Barth, descreveram a eficiência de coleta, em ciclones de diferentes geometrias (variações da configuração *Stairmand* de alta eficiência), com a construção de uma função logística.

Leith & Litch (1972) desenvolveram uma estratégia muito popular para o projeto de ciclones, admitindo a hipótese de mistura perfeita; entretanto, há evidências experimentais de gradientes radiais de concentração em ciclones. Leith et al. (1972) consideraram que a turbulência do gás promove a mistura das partículas suspensas em todo ciclone e então determinaram um tempo de residência baseado no volume do ciclone e no fluxo do gás e desenvolveram uma teoria que pode prever a eficiência fracionária do ciclone. Algumas das simplificações utilizadas por Leith & Litch (1972) impuseram que a velocidade radial do gás seria zero e que seria satisfatório adotar a velocidade tangencial do gás na parede do ciclone como sendo aproximadamente igual a velocidade média do gás na entrada do ciclone. Clift et al. (1991) modificaram a estimativa do tempo de residência médio do gás e deduziram a eficiência de coleta com base na teoria de Leith e Licht. A teoria de Dietz (1981) dividiu o ciclone em três regiões, propondo o intercâmbio de partículas entre as mesmas. Mothes et al. (1988) ampliaram os conceitos de Dietz para incluir uma quarta região, próxima à saída do ciclone, objetivando quantificar o efeito rebote do pó. LI et al. (1989) levaram em conta gradientes radiais de

concentração, porém desprezaram a divisão dos ciclones em regiões. Kim et al. (2001) propuseram uma teoria para ciclones de alta eficiência baseada em regiões turbulentas próximas à parede do equipamento. Muschelknautz et al. (1992) ampliaram a teoria de Barth, levando em conta rugosidade de parede, escoamento secundário, perda de carga, etc.

Massarani (1997) modificou a equação proposta por Lapple e obteve uma equação contendo um parâmetro adimensional característico da configuração do equipamento, a ser determinado experimentalmente, e um termo que leva em conta o efeito da concentração na coleta das partículas. Em ciclones operando com suspensões muito diluídas, este termo pode ser admitido como unitário. O número de Euler fornece a relação entre a queda de pressão no ciclone e a energia cinética por unidade de volume na alimentação, sendo este valor dependente da geometria do ciclone. Para Massarani (1997) o número de Euler pode ser considerado constante numa faixa operacional dos ciclones de uma determinada família sendo, deste modo, um parâmetro diferente para cada família de ciclones.

Zhao (2004) desenvolveu um modelo matemático baseado na teoria da separação por tamanho da partícula e da camada limite. Mohamed-Swaray et al. (2004) desenvolveram um modelo semi-empírico para diversos materiais pulverulentos. Halasz et al. (2000) desenvolveram modelos empíricos neuronais para descrever a eficiência de coleta em ciclones, empregando métodos de validação tradicionais. Vega et al. (2005) demonstraram, através do uso de análise de bifurcação, que os modelos neuronais de Halasz et al. (2000) apresentavam comportamentos anômalos.

Vale ressaltar que o escoamento em ciclones é tridimensional e complexo. Além disso, diferentes condições de operação tais como temperatura, pressão e velocidade de escoamento adicionam ainda mais dificuldades para o problema da modelagem matemática de tais equipamentos. Portanto, na maioria dos casos, emprega-se um modelo simplificado ou equações empíricas. A identificação de um sistema não-linear envolve a seleção dos parâmetros do modelo, a determinação da função perturbação que é introduzida na planta para gerar a saída, a estimativa dos parâmetros do modelo e comparação de informações da planta e previsões do modelo, empregando-se dados não utilizados no desenvolvimento do modelo (validação). O uso de redes neuronais (NNs) provou ser uma ferramenta útil e é amplamente utilizada na literatura para fins de desenvolvimento de modelo não-linear (VEGA et al., 2008). O objetivo final deste trabalho foi a construção de uma NNs, a partir de dados experimentais. As NNs foram validadas em termos de métodos tradicionais, Pollard et al. (1992) e Srinivas et al. (1995), e em termos do seu comportamento estático e dinâmico. Neste trabalho, implementa-se uma análise estática-dinâmica do modelo fazendo parte de um procedimento de validação adicional para implementação de modelos de NN. Desse modo, foram empregadas as famílias de ciclones *Stairmand*, *Läpple* e famílias de configuração incomum. Os dados experimentais foram obtidos através de uma unidade experimental que pode empregar diferentes tipos de ciclones. Mostra-se

que a análise estática e dinâmica de NNs pode ser muito útil para o desenvolvimento adequado e implementação de identificação do modelo.

### 3. Material e métodos

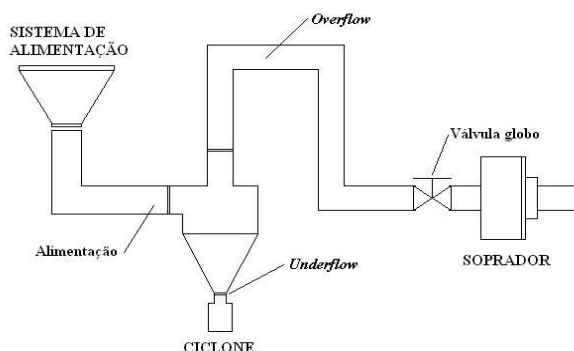
Foi construída uma unidade experimental contendo um tubo de Pitot para medição da vazão de operação, um painel com manômetros de tubo em U, para obtenção da perda de carga do ciclone, um soprador de 4 CV e um sistema de despejo de material particulado para a atmosfera.

Conforme observado na Figura 1, a unidade experimental dispõe de: Ciclone confeccionado com chapas de ferro galvanizado; Soprador de 4 CV; Manômetros de tubo em U; Tubo de Pitot; Alimentador de sólidos; Pote de selagem; Termômetros; Balanças; Cronômetros e frasco para coleta de amostras do material particulado

O alimentador de sólidos (Figura 1) é um equipamento que dispõe de uma calha vibratória e um funil de alimentação. O material particulado é adicionado no funil de alimentação e é conduzido à calha vibratória. Por meio de um vibrador eletromagnético, a calha transporta o material particulado até a entrada da unidade, onde o material é sugado em direção ao ciclone. O vibrador eletromagnético permite a mudança da intensidade de vibração possibilitando, desta maneira, a obtenção de diferentes velocidades de distribuição.

A unidade experimental permite a alternância entre ciclones de diferentes configurações. Esta flexibilidade é importante, pois visa à obtenção de dados experimentais que possibilitem a construção de um modelo empírico não-linear para descrever ciclones das famílias *Stairmand* e *Lapple* e de configurações diversas.

A unidade (Figura 1) foi submetida a corridas para obtenção dos dados experimentais, empregando um ciclone com a configuração da Tabela 1. Através do tubo de Pitot disponível na unidade pôde-se determinar a faixa de vazão de ar fornecida pelo soprador, sendo esta regulada pela válvula globo de 2" da unidade. Os dados obtidos estão compilados na Tabela 2.



**Figura 1.** Esquema da unidade experimental

O objetivo deste trabalho foi o de levantar dados fornecidos pela unidade experimental construída no laboratório em diferentes condições operacionais; de modo a permitir a análise não-linear em ciclones de diferentes configurações através de redes neuronais.

Utilizou-se  $\rho_s = 2830 \text{ kg/m}^3$  para a densidade do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e o valor de  $\rho_s = 4150 \text{ kg/m}^3$  para a densidade da baritina ( $\text{BaSO}_4$ ). A densidade do ar foi calculada através da Equação 9. Foram aferidas quatro temperaturas em quatro pontos diferentes do laboratório, ao redor do experimento, e fez-se a média destes valores sendo a temperatura obtida igual a  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Os materiais particulados carbonato de cálcio e baritina foram previamente analisados através do MalvernMastersize. A distribuição de tamanho de partícula é uma ferramenta muito utilizada em análises granulométricas e isto se deve ao fato de que ela permite relacionar uma fração de amostra com um dado diâmetro de partícula.

**Tabela 1.** Relações geométricas do ciclone da unidade experimental

Ciclone ( $D_c = 10,5 \text{ cm}$ )	
$B_c / D_c$	0,19
$D_o / D_c$	0,37
$H_c / D_c$	0,38
$L_c / D_c$	1,19
$Z_c / D_c$	3,10
$D_u / D_c$	0,23

**Tabela 2.** Dados de vazão disponíveis para unidade experimental

$\Delta h \text{ (m)}$	$v \text{ (m/s)}$	$Q \text{ (m}^3\text{/s)}$
0,035	26,205	0,053
0,030	24,261	0,049
0,025	22,147	0,045
0,020	19,809	0,040
0,015	17,155	0,035
0,010	14,007	0,028
0,005	9,905	0,020

#### 4. Resultados e discussão

Após cada corrida experimental, o material particulado obtido no pote de selagem, proveniente da corrente de underflow, foi analisado no Malvern-Mastersizer e ajustado pelo modelo RRB.

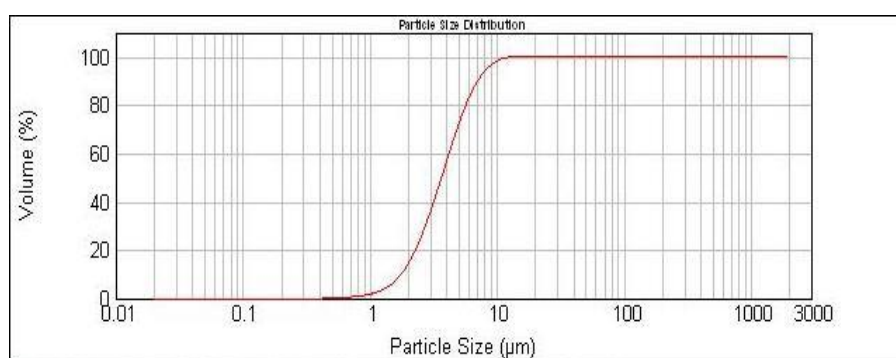
Para cada experimento foram obtidos os parâmetros  $n$  e  $K$  do modelo RRB, entretanto, por serem similares, serão apresentadas as figuras de apenas uma corrida representativa para cada vazão trabalhada.

Para  $Q = 0,035 \text{ m}^3/\text{s}$ , a corrente de underflow do carbonato de cálcio apresenta a granulometria ilustrada na Figura 2a. A Figura 2b demonstra o ajuste dos dados experimentais pelo modelo RRB. Nos experimentos com  $Q = 0,028 \text{ m}^3/\text{s}$ , a corrente de underflow do carbonato de cálcio apresentou a granulometria ilustrada na Figura 2c. O modelo RRB ajustou os dados experimentais com muita precisão como ilustrado pela Figura 2d. Ao utilizar  $Q = 0,020 \text{ m}^3/\text{s}$ , obteve-se a seguinte granulometria para o carbonato de cálcio proveniente do underflow (Figura 2e). A comparação entre os dados experimentais e o ajuste do modelo RRB está ilustrada na Figura 2f.

Para a baritina observa-se que as curvas de distribuição de tamanho de partícula da corrente de underflow estão mais próximas da curva de alimentação quando comparadas com as do carbonato de cálcio. Isto pode ser explicado levando-se em consideração que os valores de eficiência global de coleta para a baritina são maiores que os do carbonato de cálcio. Quanto maior a eficiência de coleta mais parecidas são as granulometrias da alimentação e da corrente de underflow até que, no caso hipotético da eficiência de coleta obtida ser igual a 100%, a granulometria da corrente de underflow será a mesma da alimentação.

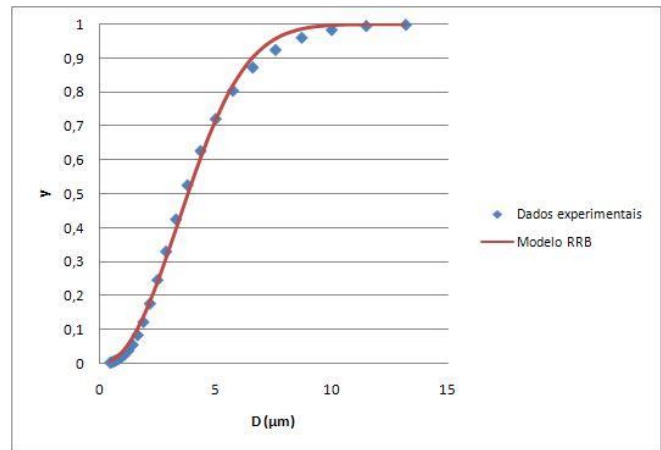
Pelos dados experimentais obtidos observou-se que a concentração volumétrica de sólidos não possuiu impacto significativo na eficiência global de coleta do ciclone. Mantendo-se constante a vazão de ar e o diâmetro de partícula, os valores de eficiência global de coleta não variaram significativamente, tanto para o carbonato de cálcio quanto para a baritina.

a. Distribuição de tamanho de partícula para frações menores que um dado diâmetro para o carbonato de cálcio obtido no *underflow* com  $Q = 0,035 \text{ m}^3/\text{s}$



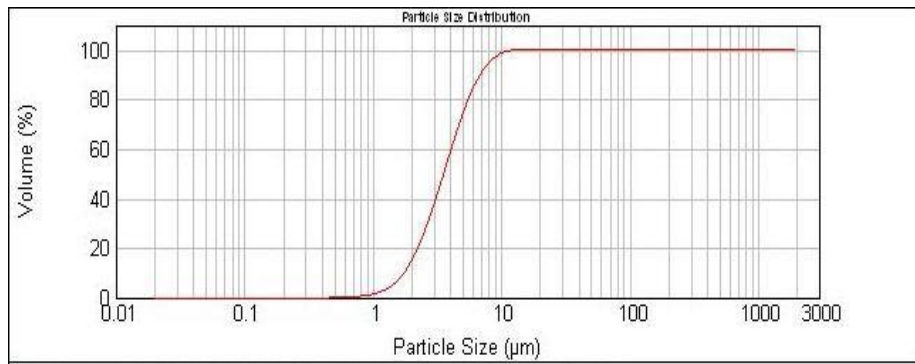
b. Comparação entre os dados experimentais e os dados gerados pelo modelo RRB para o  $\text{CaCO}_3$  obtido na corrente de *underflow* com  $Q = 0,035 \text{ m}^3/\text{s}$



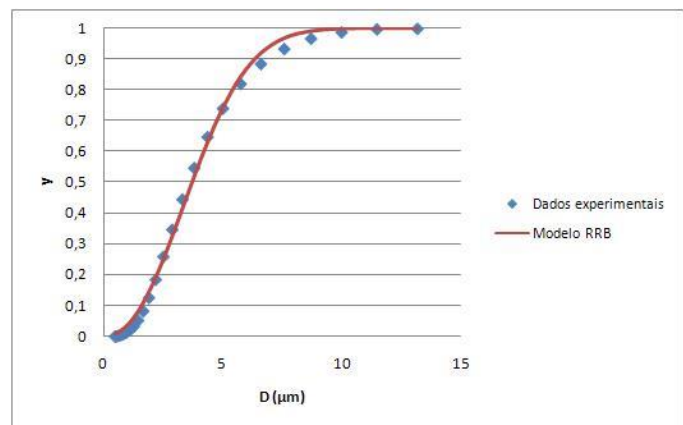


c. Distribuição de tamanho de partícula para frações menores que um dado diâmetro para o carbonato de cálcio obtido no *underflow* com  $Q = 0,028 \text{ m}^3/\text{s}$ .

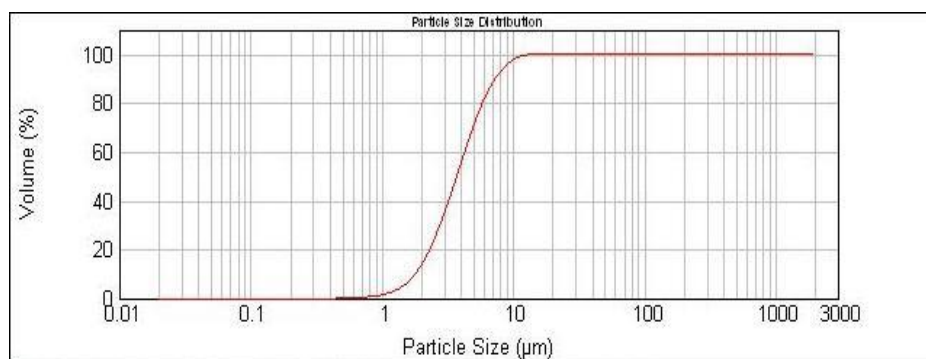
**Figura 2.** Distribuição de tamanho de partícula para frações menores que um dado diâmetro para o carbonato de cálcio



d. Comparação entre os dados experimentais e os dados gerados pelo modelo RRB para o  $\text{CaCO}_3$  obtido na corrente de *underflow* com  $Q = 0,028 \text{ m}^3/\text{s}$ .



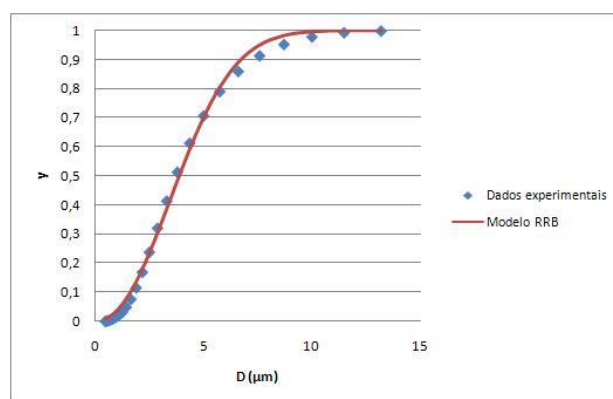
e. Distribuição de tamanho de partícula para frações menores que um dado diâmetro para o carbonato de cálcio obtido no *underflow* com  $Q = 0,020 \text{ m}^3/\text{s}$ .



f. Comparação entre os dados experimentais e os dados gerados pelo modelo RRB para o  $\text{CaCO}_3$  obtido na corrente de *underflow* com  $Q = 0,020 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Figura 2.** Distribuição de tamanho de partícula para frações menores que um dado diâmetro para o carbonato de cálcio

Da mesma maneira pode-se observar que o diâmetro de partícula influencia diretamente a eficiência global de coleta do equipamento. Para uma mesma vazão de ar e concentrações de sólidos similares, os valores de eficiência global de coleta da baritina são maiores que os valores obtidos para o carbonato de cálcio. Isto evidencia que quanto maior o diâmetro de partícula, neste caso a baritina possui diâmetro maior que o carbonato de cálcio, maior será a eficiência global de coleta do equipamento.



**Continuação da Figura 2.** Distribuição de tamanho de partícula para frações menores que um dado diâmetro para o carbonato de cálcio

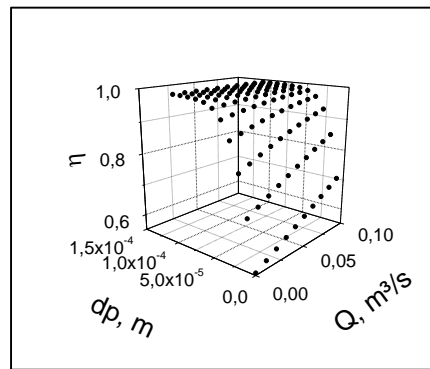
A influência da vazão de trabalho sobre a eficiência global de coleta também é conhecida através da literatura e enuncia que quanto maior a vazão de ar maior será a eficiência global de coleta observada. Os dados experimentais obtidos corroboram tal afirmação, pois, para o mesmo diâmetro de partícula (baritina e carbonato de cálcio) e concentrações de sólidos similares, o aumento da vazão acarretou em um aumento na eficiência de coleta.

A estratégia tradicional de normalização dos dados de entrada e de saída é adotada a fim de serem evitados pesos com elevadas ordens de grandeza, aprendizado não uniformidades e mínimos locais. O conceito de validação cruzada de Pollard et al. (1992), que define o melhor mapeamento como aquele que minimiza o erro de predição frente ao conjunto de dados inéditos, foi utilizado para evitar super-treinamento. Também para evitar super-treinamento, a arquitetura neuronal ótima é escolhida com base nas regras apresentadas em Pollard et al. (1992). Assim, estes pesquisadores recomendaram aumentar progressivamente o número de neurônios ocultos, monitorando-se o erro de predição do mapeamento frente a dados inéditos, até que o decréscimo do erro não seja mais significativo. Portanto, foi empregado o critério de Pollard et al. (1992) para determinar o número mínimo de neurônios na camada oculta que assegura um desvio mínimo entre a saída neuronal e os dados de validação.

Além disso, para análise do comportamento das redes neuronais estudadas, um conjunto de dados inéditos foi utilizado para avaliação dos parâmetros da rede, objetivando analisar se as redes estavam se especializando apenas no conjunto de treinamento, conferindo robustez e impedindo que eventuais comportamentos espúrios e ruído sejam erroneamente modelados, buscando evitar o super-treinamento. Os parâmetros da rede que apresentaram erro mínimo frente a dados inéditos foram armazenados para avaliação e análise. Os parâmetros da rede na iteração final de treinamento foram também armazenados para avaliação e análise. Vale ressaltar que a estratégia tradicional de normalização dos dados de entrada e de saída foi adotada, a fim de evitar a obtenção de pesos com elevadas ordens de grandeza, aprendizado não uniformes e mínimos locais.

Uma rede neural *feedforward* de três camadas, usando tangente hiperbólica e funções de ativação linear nas camadas ocultas e de saída, respectivamente, foi construída a partir dos dados experimentais obtidos da unidade. Uma camada oculta com um número ótimo de neurônios (5 neurônios) foi selecionada, em conformidade com os procedimentos padrão de validação cruzada (Pollard et al, 1992; Srinivas et al, 1995).

Na construção dos modelos empíricos baseados em NNs, dois conjuntos de dados independentes (treinamento e validação) foram utilizados. Para fins de construção de um modelo empírico generalizado, foi empregada uma arquitetura composta na entrada das variáveis:  $D_c$ ,  $P$ ,  $Q$ ,  $H_c / D_c$ ,  $B_c / D_c$ ,  $D_o / D_c$ ,  $S_c / D_c$ ,  $Z_c / D_c$ ,  $LC / D_c$ ,  $D_u / D_c$  e  $d_p$ . O modelo baseado em NN previu com sucesso a eficiência de coleta de partículas ( $\eta$ ) de vários tipos de coletores de pó, incluindo as famílias Lapple, Stairmand (empregando dados da literatura) e configurações não convencionais (empregando dados da unidade experimental), Figura 3. É importante mencionar que as previsões do modelo baseado em NNs estão de acordo com o comportamento padrão dos ciclones relatado pela literatura, que afirma que há um aumento da eficiência de coleta de partículas com o aumento de  $Q$ ,  $d_p$  e da densidade dos sólidos. Além disso, a eficiência de coleta de partículas diminui à medida que  $D_c$  aumenta.



**Figura 3.** Previsões do modelo baseado em NNs.

## 5. Conclusões

Este trabalho desenvolveu uma metodologia para operação de ciclones para fins de obtenção de dados experimentais a serem utilizados posteriormente na elaboração de modelos empíricos não lineares baseados em redes neurais.

Demonstrou-se experimentalmente que o aumento da vazão de operação produziu um aumento da eficiência de coleta do ciclone. Com a utilização de materiais particulados diferentes, pôde-se concluir que o aumento do diâmetro da partícula também causou um aumento da eficiência de coleta do equipamento. Dentro das condições operacionais analisadas, a eficiência do equipamento não foi relevantemente influenciada pelo aumento da concentração de sólidos da alimentação.

Foram obtidos valores para o diâmetro de corte do ciclone em condições de operação diversas sendo que estes valores corresponderam corretamente ao aumento da eficiência de coleta do equipamento.

Uma rede neural feedforward de três camadas, usando tangente hiperbólica e funções de ativação linear nas camadas ocultas e de saída, respectivamente, foi empregada. A arquitetura dispunha na entrada de informações de:  $D_c$ ,  $P$ ,  $Q$ ,  $H_c / D_c$ ,  $B_c / D_c$ ,  $D_o / D_c$ ,  $Sc / D_c$ ,  $Z_c / D_c$ ,  $LC / D_c$ ,  $Du / D_c$  e  $dp$ . O modelo baseado em NNs previu com sucesso a eficiência de coleta de partículas de vários tipos de coletores de pó, incluindo Lämpfle, Stairmand e configurações não convencionais.

## 6. Referências

- ALLEN, T.,1997. Particle size Measurement, 5. Ed. London, Chapman and Hall.
- BARTH W., 1956. Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations, Brennst.Warme Kraft., 8, 1–9.

- CARNEIRO, A. L. M., 1981. Caracterização de Partículas Sólidas. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro RJ., COPPE/UFRJ.
- CLIFT, R., GHADIRI, M. AND HOFFMAN, A. C., 1991. A critique of two models for cyclone performance, *AIChE J.* vol. 37, (2), p. 285–289.
- DAMASCENO, C. T. M., 1996. Controle de Particulados em Ambiente Ocupacional de Empresas Beneficiadoras de Arroz, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia MG.
- DIETZ, P.W., 1981. Collection efficiency of cyclone separators, *AIChE J.*, 27, 6, 888–892.
- DIRGO, J. and LEITH, D. 1985a. Cyclone collection efficiency: comparison of experimental results with theoretical predictions. *Aerosol Science and Technology*, 4, 401-415.
- DIRGO, J. and LEITH, D., 1985b. Performance of Theoretically optimized cyclones, *Filtration & Separation*, 119-125.
- DOEDEL, E., 2001. AUTO: Software for Continuation and Bifurcation Problems in Ordinary Differential Equations, California Institute of Technology, Pasadena.
- HALASZ, M.R.T. and MASSARANI, G., 2000. Performance analysis and design of small diameter cyclones. *Braz. J. Chem. Eng.*, 17, 451-458.
- IOZIA, D. L. and LEITH, D., 1990. The logistic function and cyclone fractional efficiency. *Aerosol Science and Technology*, 25, p. 598-606.
- KIM, C.H. and LEE, J.W., 2001. A new collection efficiency model for small cyclones considering the boundary-layer effect, *J. Aerosol Sci.*, 32, 251–269.
- KOCH, W. H. & LICHT, W., 1980. New design approach boosts cyclone efficiency. In: *Industrial Air Pollution Engineering Magazine Chemical Engineering Magazine*, McGraw Hill Publications, Edited by Vicent Cavaseno, 175-183.
- LAPPLE, C. E., 1951. Dust and mist collection. In: PERRY, J. H., ed. *Chemical Engineering Handbook*. 3 Ed. New York, McGraw-Hill, 1013-1050.
- LEITH, D. & LICHT, W., 1972. The collection efficiency for cyclone type particle collectors – A new theoretical approach. *AIChE Symposium Ser.*, 68, 126, 196-206.
- LEVENBERG, K. 1944. A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares, *Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164–168.
- LI, E.L. and WANG, Y.M., 1989. A new collection theory of cyclone separators, *AIChE J.*, 35, 4, 666–669.
- MARQUARDT, D. 1963. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11, 2, 431–441.
- POLLARD, J.F., BROUSSARD, M.R., GARRISON, D.B. & SAN, K.Y., 1992. “Process Identification Using Neural Networks”, *Computer Chem. Engng*, 16 4, 253-270.

RODRIGUES, M.V., 2001. Análise do Desempenho de um Ciclone com Mangas: Efeito da Permeabilidade do Meio Filtrante, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MASSARANI, G.,1997. Fluidodinâmica em Sistemas Particulados, Editora UFRJ, Rio de Janeiro RJ., p. 47-77.

MOHAMED-SWARAY, S.G. and HAM-DULLAHPUR, F. ,2004. A new semi-empirical model for predicting particulate collection efficiency in low-to high temperature gas cyclone separators, 15, 2, 137-164.

MOTHES, H. and LÖFFLER, F.,1988. Prediction of particle removal in cy-clone separators, Int. Chem. Eng., 28, 2, 231–240.

MUSCHELKNAUTZ, E. and TREFZ, M. ,1992. Pressure drop and separation efficiency in cyclones, VDI-Heat At-las, Lj., 1–8.

VEGA, M.P, COIMBRA, K.B., MATTOS, J.A., SCHEID, CM.,2005. Use of Bifurcation Analysys for Model Identification Purposes. Dynamics and Control of Process Systems, Elsevier Science, 697-702.

ZHAO, B.,2004. Development of a new method for evaluating cyclone efficiency, Chemical Engineering and Processing in press.