

# MELHORIA DA EFICIÊNCIA OPERACIONAL DE PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS<sup>(1)</sup>

Ronaldo de Araújo<sup>(2)</sup>  
Carmen Déa Moraes Pataro<sup>(3)</sup>

## Resumo

Os sistemas de controle dos precipitadores eletrostáticos são projetados de forma a garantir o funcionamento dos mesmos no máximo diferencial de tensão possível entre os eletrodos de descarga e captação, buscando sempre a máxima eficiência de limpeza dos gases tratados pelo equipamento. Entretanto, se a resistividade do particulado atingir valores abaixo de  $10^3$  Ohm.cm ou acima de  $10^{11}$  Ohm.cm, podem ocorrer os fenômenos perda de polaridade, “back” corona e “reentrainment” ou rearraste de partícula que desestabilizam o ponto ideal de funcionamento e reduzem sensivelmente a eficiência de operação do equipamento. Neste trabalho, uma rede neural artificial de multicamadas é treinada para aproximar curvas paramétricas de resistividade de partícula. As curvas obtidas pela rede neural são usadas na determinação da tendência da resistividade do particulado em suspensão, como função da temperatura e da umidade do fluxo gasoso, durante o tratamento do gás. Este conhecimento permite controlar a resistividade do particulado em suspensão dentro do limite adequado ao funcionamento do precipitador, implicando em economia de energia bem como na redução do tamanho do equipamento e conseqüentemente nos custos de operação, fabricação e instalação.

**Palavras-chave:** Redução de custos em precipitadores eletrostáticos; Redes neurais; Tratamento de gases.

---

(1) 60° Congresso Anual da ABM – 25 a 28 de julho de 2005 - Belo Horizonte – MG.

(2) Engenheiro Eletricista e Civil, Gerente Técnico da Thomaz Araújo Engenharia e Prof. da Universidade FUMEC.

(3) Membro da ABM, Eng. Eletricista, M.Sc em Eng. Elétrica, Dr.Sc. em Eng. Metalúrgica e de Minas, Prof. Adjunto da EEUFMG.

# INTRODUÇÃO

## 1. Princípio de Funcionamento

Basicamente, os precipitadores eletrostáticos são constituídos por eletrodos de descarga ligados a uma fonte de energia em alta tensão e separados dos eletrodos de captação por distâncias constantes. Os conjuntos de eletrodos são envolvidos por uma cápsula, contendo em sua parte inferior tremonhas para receber o material coletado além de direcionar e regular a vazão do fluxo gasoso do processo produtivo. A Figura 1 mostra de forma esquemática o fluxo de materiais em um precipitador eletrostático, bem como seus principais componentes.

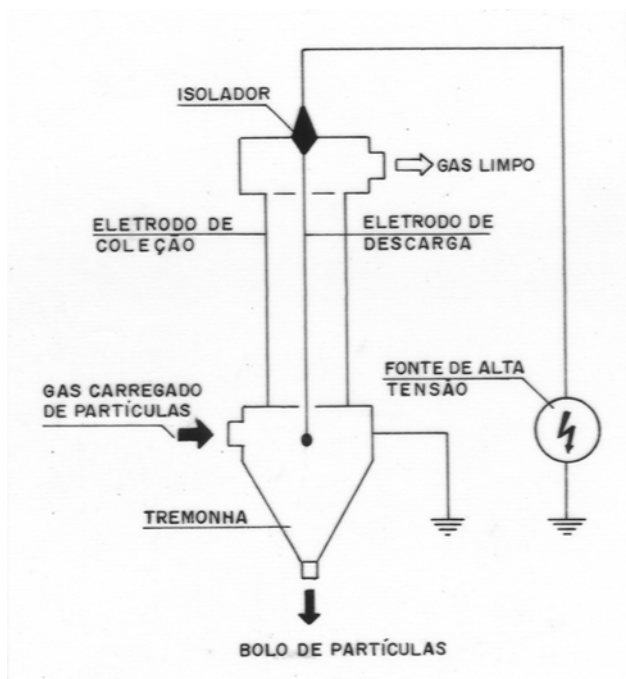


Figura 1. Precipitador Eletrostático - Diagrama Esquemático de Fluxo.

O funcionamento da maioria dos equipamentos separadores de partículas suspensas em gás, depende da sua capacidade de forçar o gás e as partículas contidos em seu interior a percorrerem trajetórias diferentes. Nos precipitadores eletrostáticos, este efeito é conseguido pelo campo elétrico interno gerado na direção perpendicular à direção do fluxo gasoso.

A corrente elétrica da ordem de alguns miliampères, que percorre o circuito de alta tensão (80 a 100 kVCC), durante o efeito corona, é responsável pelo carregamento negativo das partículas a serem captadas. As partículas eletricamente carregadas, na presença do campo elétrico estabelecido entre os eletrodos, são atraídas na direção dos eletrodos de captação. A Figura 2 ilustra de forma esquemática os detalhes do fenômeno, que só ocorre quando as condições internas do fluxo gasoso e a tensão entre os eletrodos de descarga e de captação conseguem produzir o efeito corona.

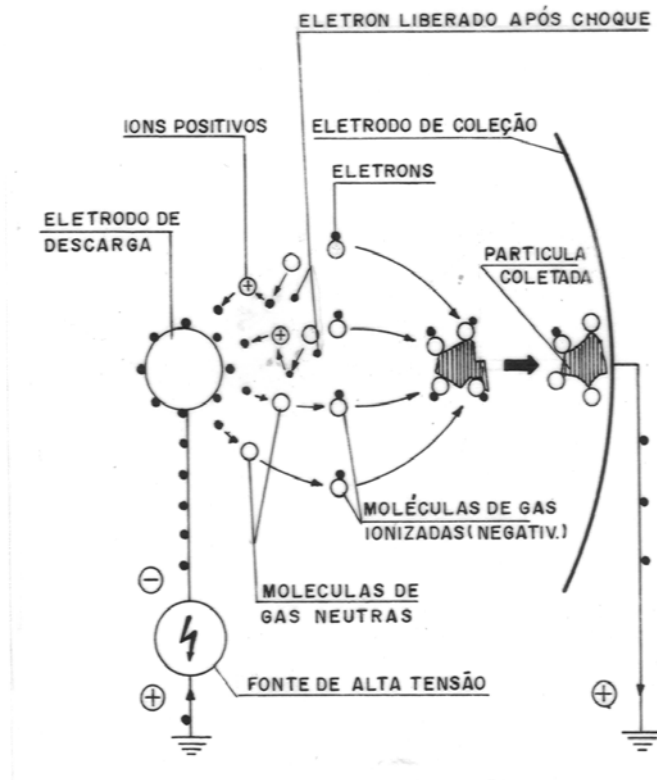


Figura 2. Precipitador Eletrostático – Princípio de Funcionamento

## 2. A Eficiência dos Precipitadores Eletrostáticos

A equação da eficiência dos precipitadores eletrostáticos, também chamada “equação de Anderson-Deutsch, relaciona a eficiência de captação do precipitador com parâmetros do equipamento e do processo. Esta equação, determinada experimentalmente por Anderson (1917) e comprovada teoricamente por Deutsch (1921), é transcrita abaixo juntamente com o significado de seus termos.

$$\eta = 1 - e^{-Aw/Q}$$

onde:

$\eta$  -Eficiência de captação do precipitador;

A -Superfície de captação do precipitador;

Q -Vazão do fluxo gasoso;

W -Representa, na equação de Anderson, um parâmetro relativo à razão de precipitação. Na equação de Deutsch, representa a velocidade de migração das partículas, que é a velocidade com que a partícula carregada chega ao eletrodo de captação.

Vários parâmetros inerentes à instalação e ao material em processamento podem influenciar a eficiência dos precipitadores.

A resistividade das partículas é o termo que descreve a resistência elétrica das partículas ao fluxo de corrente que as percorre. A facilidade de captação de materiais está intimamente relacionada com a sua resistividade, porque esta característica física afeta a velocidade de migração das partículas e, partículas com velocidade de migração inferior a 4 cm/s ou superior a 20 cm/s são difíceis de serem captadas<sup>[1]</sup>.

Por outro lado, todo precipitador que trata gases com poeiras de resistividade inferior a  $5 \times 10^3$  Ohm.cm ou superior a  $2 \times 10^{10}$  Ohm.cm fica sujeito aos fenômenos: perda de polaridade, “back corona” e “reentrainment” que causam distúrbios no fluxo de poeira e reduzem bem a eficiência do equipamento<sup>[2]</sup>. A experiência tem demonstrado que poeiras com resistividades compreendidas entre os valores limites acima especificados são facilmente captadas por precipitadores eletrostáticos.

A resistividade das partículas é uma função não linear da temperatura. Para temperaturas muito baixas e muito altas, observa-se que a resistividade pode atingir valores críticos. Também a umidade, contida no fluxo gasoso contendo partículas em suspensão, afeta de forma não linear a resistividade das partículas, influenciando a eficiência de captação do precipitador. A umidade é absorvida pelas partículas sólidas em baixas temperaturas e, na maioria dos casos, umidades abaixo de 20% podem levar a resistividade das partículas a valores indesejáveis para a instalação<sup>[2]</sup>.

## METODOLOGIA

### 1. Desenvolvimento

A velocidade de migração das partículas e os fenômenos Perda de Polaridade, “Back” Corona e “Reentrainment”(Rearraste de Partículas) estão intimamente relacionados com a resistividade das partículas. Foram encontradas, na literatura técnica, curvas paramétricas da resistividade x temperatura tendo como parâmetro a umidade, para poeira de cimento e fumos de chumbo de sinterização, mostradas nas figuras 3 e 4 respectivamente<sup>[2, 3]</sup>.

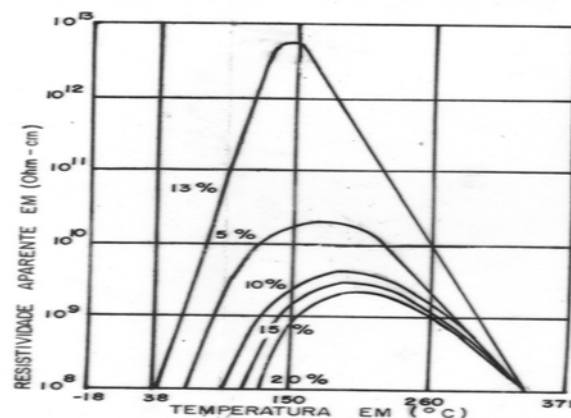
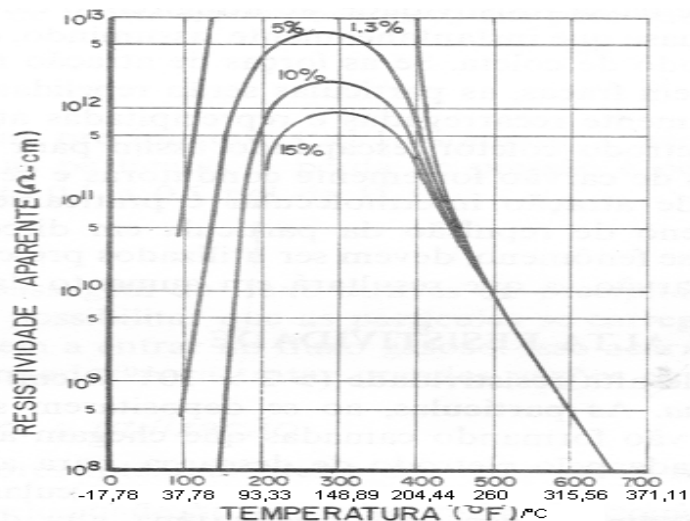


Figura 3. Curvas de Resistividade x Temperatura/Umidade para Poeira de Cimento.

Como são conhecidos os limites máximo e mínimo de valores de resistividade das partículas, dentro dos quais os precipitadores apresentam bom desempenho de captação<sup>[2]</sup>, partiu-se do princípio de que, se forem conhecidas as curvas de resistividade das partículas x temperatura/umidade do fluxo gasoso, pode-se controlar a resistividade das partículas, atuando na temperatura e/ou na umidade do fluxo gasoso em tratamento, mantendo sob certo controle a velocidade de migração e, ao mesmo tempo, evitando que os fenômenos indesejáveis ocorram de forma a manter a eficiência do precipitador no máximo.



**Figura 4.** Curvas de Resistividade x Temperatura/Umidade para Fumos de Chumbo de Sinterização.

Não existem levantadas curvas de resistividade para todas as partículas geradas nos processos industriais, mesmo porque processos iguais podem gerar partículas diferentes, já que estas dependem dos teores das matérias primas utilizadas no processo que as geram. Por outro lado, o levantamento em laboratório das curvas de resistividade de cada partícula para todos os pontos das faixas de temperatura e umidade do processo que a gera é algo impraticável economicamente.

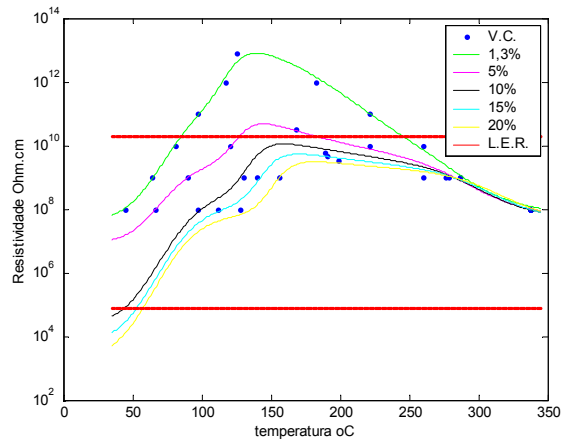
Pode-se então, a partir de apenas alguns pontos das curvas de resistividade de uma determinada partícula, levantados em laboratório<sup>[4]</sup>, utilizar redes neurais artificiais para aproximá-las integralmente<sup>[5]</sup>. O trabalho foi iniciado pelas curvas de resistividade de partículas conhecidas e mostradas nas Figuras 3 e 4. Delas, foram extraídos alguns pontos para treinar a rede neural artificial. Após o treinamento, a rede foi utilizada para traçar as curvas aproximadas correspondentes às curvas já conhecidas.

A rede utilizada foi uma rede MLP (“Multilayer Perceptron”)<sup>[6]</sup> com 5 neurônios na camada escondida e um neurônio na camada de saída. Na entrada da rede, foram fornecidos os pontos de temperatura e umidade conhecidos e na saída foram obtidos os valores correspondentes da resistividade. Como função de ativação dos neurônios da camada escondida foi utilizada a função tangente hiperbólica e como função de

ativação da camada de saída foi usada uma função linear. Foram estabelecidas 3000 interações e meta de erro de 0,01.

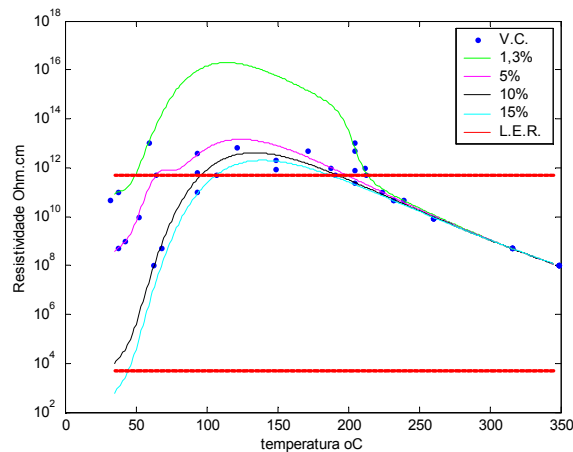
## 2. Resultados

Após o treinamento da rede com os valores conhecidos(V.C.), foi feita a simulação para os dados da poeira de cimento tendo sido obtidas as curvas mostradas na Figura 5. As retas L.E.R.(Limites Extremos de Resistividade) referem-se aos limites de resistividade conhecidos.



**Figura 5.** Aproximação das Curvas de Resistividade X Temperatura/Umidade para poeira de cimento.

Para fumos de chumbo de sinterização, foram obtidas as curvas mostradas na Figura 6.

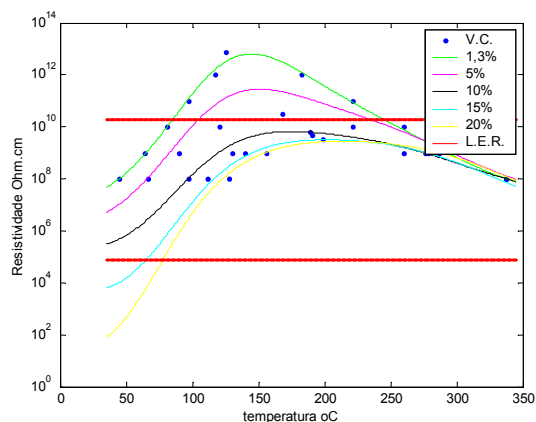


**Figura 6.** Aproximação das Curvas de Resistividade X Temperatura/Umidade para fumos de chumbo de sinterização.

Comparando as curvas obtidas usando a rede neural com as curvas originais da literatura técnica, conclue-se que foram obtidas aproximações satisfatórias. Foram feitos ainda os seguintes experimentos para verificar a confiabilidade dos dados obtidos pela rede neural neste tipo de aplicação:

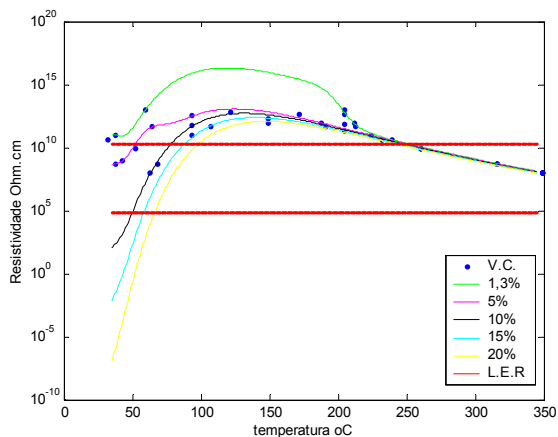
1. Treinamento da rede para poeira de cimento eliminando os pontos de temperatura correspondentes à umidade de 5% e após o treinamento, foi

solicitado que rede treinada traçasse as curvas inclusive a curva com umidade de 5%. Foi obtida a resposta mostrada na Figura 7, obviamente com distorção em relação às curvas da figura 5, pois o erro foi de aproximadamente 3%.



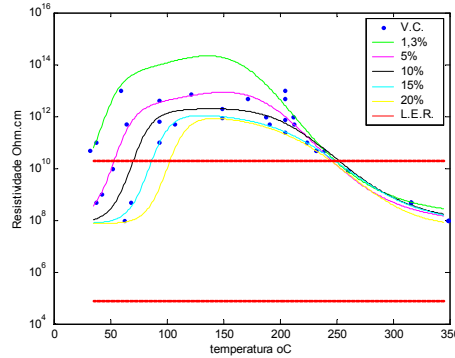
**Figura 7.** Aproximação das Curvas de Resistividade X Temperatura/Umidade para poeira de cimento a partir do treinamento com dados incompletos.

2. Simulação das curva para fumos de chumbo de Sinterização incluindo a curva para umidade de 20%, dados que não estão disponíveis nas informações encontrada na literatura técnica, como mostrado na Figura 8.



**Figura 8.** Curvas de Resistividade x Temperatura/Umidade para Fumos de Chumbo de Sinterização incluindo umidade de 20%.

3. Treinamento da rede para fumos de chumbo de sinterização, eliminando os pontos de temperatura correspondentes à umidade de 10% e, após o treinamento, foi solicitado que rede treinada traçasse as curvas inclusive para as curvas com umidades de 10% e 20%, como mostrado na Figura 9.



**Figura 9.** Aproximação das Curvas de Resistividade X Temperatura/Umidade para poeira de Sinterização a partir do treinamento com dados incompletos.

### 3. Comentários

De posse dos dados fornecidos pela rede neural e pelos valores instantâneos medidos da temperatura e umidade do fluxo gasoso produzido no processo, o sistema de controle fica sabendo a resistividade instantânea das partículas. Portanto, se a resistividade estiver fora da faixa adequada para a captação, o sistema poderá decidir a medida a ser implementada para levá-la ao valor adequado. Se a resistividade já estiver contida na faixa de segurança, o sistema pode analisar sua tendência à medida que o processo ocorre, de forma a tomar medidas justas para não permitir seu afastamento da faixa ideal.

Pode-se simular o que ocorreria em um precipitador tratando gás proveniente de uma sinterização com 10% de umidade, numa vazão de  $72.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , com temperatura nas caixas de vento variando de  $120$  a  $140^\circ\text{C}$ . Nestas condições, a rede neural informa que a resistividade das partículas de sinter é de  $2,5 \times 10^{12} \text{ Ohm.cm}$ , portanto que o precipitador terá dificuldade para fazer a limpeza do gás (figura 6). Neste caso, não adianta atuar na umidade do fluxo gasoso para melhorar a eficiência de coleta. A melhor alternativa para manter a resistividade das partículas em níveis captáveis é elevar a temperatura para algo acima de  $250^\circ\text{C}$  e mantê-la neste patamar.

Se o precipitador empregado for do tipo planar com eletrodos trefilados e a eficiência de captação for de 98%, a superfície coletora necessária ao precipitador<sup>[7]</sup> será de:

$$A_c = -\frac{Q}{\omega} \ln(1-\eta) \Rightarrow A_c = -\frac{72000/3600}{0,068} x - (3,912) \Rightarrow A_c = 1150,60 \text{ m}^2$$

Se o precipitador não dispuser de sistema para controlar a resistividade, nem de outro recurso que evite a ocorrência do fenômeno “back”corona, a superfície coletora necessária para tratar o gás deverá ser mais que três vezes maior, ou seja:

$$A_c = -\frac{Q}{\omega} \ln(1-\eta) \Rightarrow A_c = -\frac{72000/3600}{0,022} x - (3,912) \Rightarrow A_c = 3556,36 \text{ m}^2$$

Se contudo, o fluxo gasoso em tratamento for proveniente de uma fábrica de cimento e estiver numa temperatura de  $150^\circ\text{C}$  com 5% de umidade, a rede neural informará que a resistividade das partículas de cimento é da ordem de  $3 \times 10^{10} \text{ Ohm.cm}$ , o que também implica na dificuldade de captura das partículas, a menos que a temperatura do fluxo seja elevada para o patamar de  $300^\circ\text{C}$ . Neste caso, se o sistema de controle conseguir manter a temperatura e a umidade nestes patamares, o precipitador apresentará bom



desempenho de captação e necessitará de de uma superfície coletora 2,5 vezes menor do que aquela necessária a um precipitador não provido de meios para evitar o efeito “back” corona. A redução no tamanho do equipamento implica na redução dos custos de fabricação e instalação proporcionais à relação de tamanhos<sup>[8].(\*)</sup>. Além da redução dos custos de fabricação e instalação do equipamento, há de se considerar a redução de custo operacional, também obtida graças à manutenção da eficiência de captação, mantida no máximo através da implementação de controle da resistividade. O custo de operação anual pode ser calculado pela equação:  $C_o = 24 \times 365 \times f_u \times P \times S \times C_e$ , onde:  $f_u$  = coeficiente de utilização;  $S$ =Superfície coletora;  $C_e$ =Custo de eletricidade;  $P$ =Potência específica igual a  $12 \text{ W/m}^2$  para precipitador convencional e  $4 \text{ W/m}^2$ , para precipitador com controle de resistividade. A relação dos custos operacionais, calculados por essas equações, permite concluir que as reduções percentuais nos custos  $C$  e  $C_o$  foram de 50,39% e 67,65%, para o primeiro caso e de 43,42% e 59,90%, para o segundo caso.

(\*) Os custos básico de fabricação e instalação podem ser calculados pela equação:  $C = k \cdot S^E$ , onde  $k=5170,51$  e  $E=0,6216$  se  $S < 4600 \text{ m}^2$  e  $k=812,47$  e  $E=0,1411$  se  $S > 4600 \text{ m}^2$ .  $S$ =Superfície coletora<sup>1</sup>.

## CONCLUSÃO

O emprego das redes neurais artificiais, para aproximação das curvas de resistividade, mostrou resultados satisfatórios com erros de 1%, se forem fornecidos pontos de todas as curvas paramétricas na fase de treinamento da rede e, próximo de 3%, se forem omitidos pontos de alguma curva paramétrica. Estes erros podem ser minimizados, fornecendo mais pontos ou deixando-se a rede em treinamento por mais tempo. Após o treinamento, as curvas de aproximação podem ser obtidas em fração de segundos, quando são disponibilizados os vetores de resistividade, temperatura e umidade correlacionados. Os valores vetoriais obtidos serão de extrema importância no controle da umidade e da temperatura do fluxo gasoso que passa em um precipitador, funcionando em tempo real. Qualquer sistema de medição e controle da umidade e temperatura do fluxo gasoso, implementado a partir dos “set points” L.E.R. e dos valores de resistividade fornecidos pela rede neural artificial, garantirá substancial redução nos custos de operação, fabricação e instalação de um precipitador em relação aos custos de outro precipitador, projetado para a limpeza do mesmo fluxo gasoso, porém considerando-se a possibilidade de ocorrência dos fenômenos indesejáveis<sup>[7, 8]</sup>.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. OGLESBY, Jr. S. Design Considerations electrostatic precipitators. In: SPECIALITY CONFERENCE ON DESIGN, OPERATION AND MAINTENANCE OF HIGH EFFICIENCY PARTICULATE CONTROL EQUIPMENT, 1973, Saint Louis, Missouri, USA, APCA, 1973. p.37-51.
2. SNOWDEN, W.D. Electrostatic Precipitators. s.n.t. 11p. il.
3. A.L.S. MESQUITA, F.A.GUIMARÃES, N.NEFUSSI – Engenharia de Ventilação Industrial Convênio CETESB ASCETESB 1985.

4. WHITE, H. J. Industrial Electrostatic Precipitation. Addison-Wesley Publishing Co., 1963.
5. BRAGA, A.P.; CARVALHO, A.P.L.F.; LUDEMIR, T. B. Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações – LTC Editora – 2000.
6. WIDROW, B. & LEHR, M. A. - 30 Years of Adaptive Neural Networks: Perceptron, Madaline, and Backpropagation. Proceedings of the IEEE, vol.78, No. 9, September 1990.
7. LORA, E. E. S. - Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte. Núcleo de Estudo em Sistemas Técnicos da EFEI.
8. CAPUTO, A. C.; GIACCHETTA, G.; PELAGAGGE, P. M. Economical Comparison of Conventional and Pulsed Electrostatic Precipitators in Industrial Applications, In: 6th INTERNATIONAL CONFERENCE On ELECTROSTATIC PRECIPITATION (VI ICESP), , july 28,2001, Faculty of Engineering, University of L'Aquila, Italy, Air Pollution Control,2001, 7p.

# OPERATIONAL EFFICIENCY IMPROVEMENT OF ELECTROSTATIC PRECIPITATOR

*Ronaldo de Araújo  
Carmen Déa Moraes Pataro*

## **Abstract**

The control systems of electrostatic precipitators are designed to keep them at the maximum voltage between the electrodes for achieving the maximum clean efficiency of gases treated by the equipment. However, if the particle resistivity goes to values upper to  $10^{11}$  Ohms.cm or lower then  $10^3$  Ohms.cm, the back corona and the precipitator repulsion phenomena can happen respectively and take the ideal point of operation out of the stability, decreasing the equipment operational efficiency. A feedforward neural network multilayer perceptron(MLP) is trained to approach the resistivity parametric curves of the particles. These approached curves are used to establish the resistivity trend of suspended particles in the treating gas as a function of the gas flow temperature and humidity. This knowledge allows to control the suspended particles resistivity inside the optimal limits for the precipitator operation, which means energy saving and equipment lower costs of operation, manufacturing and installation.

**Key-words:** Precipitator cost reduction, Neural network, Gas cleaning.