

X-002 - ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE EXAUSTÃO DE UM PROCESSO DE ELETROFUSÃO

Luiz Felipe Ramos Turci⁽¹⁾

Engenheiro eletricista, doutor em Ciência da Computação e Engenharia Eletrônica.

Mariana Wached de Paiva Côrtes⁽²⁾

Engenheira Química, mestre em Ciência e Engenharia Ambiental.

Marcos Vinícius Rodrigues⁽³⁾

Engenheiro químico, doutor em Engenharia Química.

Endereço⁽¹⁾: Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG. Rodovia José Aurélio Vilela 11999, Cidade Universitária, Poços de Caldas-MG CEP37715-400 – Tel: +55 (35) 36974748 – e-mail: luiz.turci@unifal-mg.edu.br.

RESUMO

Neste trabalho analisou-se a eficiência de um sistema de exaustão de material particulado em um processo real de eletrofusão. Particularmente, realizaram-se análises de distribuição granulométrica em diferentes estágios do processo. Utilizando os dados da análise granulométrica avaliou-se a eficiência do ciclone comparando-a com a eficiência de projeto – adicionalmente, a eficiência do ciclone foi também calculada com base no balanço de massa de todo o processo. Apesar de algumas medidas tomadas pela empresa a fim de melhorar a eficiência do sistema de exaustão, resultados indicam eficiência do ciclone da ordem de 50%, e perda de material particulado para atmosfera da ordem de 1t a cada batelada do processo. Neste trabalho, apresentam-se detalhadamente as etapas da análise de eficiência do sistema de exaustão, particularmente do ciclone, e a proposta de redimensionamento do ciclone.

PALAVRAS-CHAVE: Ciclone, material particulado, sistema de exaustão, eletrofusão.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A partir da Revolução industrial, houve crescente desenvolvimento e aumento da produção industrial, sendo o carvão inicialmente utilizado como fonte de energia [1]. Nessa época, houve alguns episódios históricos de morte relacionados a doenças respiratórias, estas foram associadas à poluição atmosférica [1].

São inúmeras as fontes de poluição atmosférica, particularmente a poluição por emissão de material particulado. Todo processo produtivo pressupõe algum tipo de emissão de poluente; assim sendo, o controle de emissão de material particulado é primordial, pois a poluição atmosférica causada pela presença de material particulado em suspensão está associada a riscos para a saúde pública [1-3].

Atualmente, há maior preocupação em minimizar a quantidade de poluentes emitidos para o meio ambiente culminando, inclusive, na criação de diversos órgãos reguladores e agências fiscalizadoras [1,3]. As indústrias vêm fazendo maiores investimentos na prevenção e minimização de emissões [1].

Em 1985, Lee e colaboradores avaliaram um conjunto de dados de eficiência de ciclone onde foram obtidos o tamanho das partículas, a velocidade de fluxo, o tamanho do ciclone, e as propriedades do gás [4]. Através dos resultados obtidos concluiu-se que a densidade do gás é uma propriedade importante, além da viscosidade do gás na coleta e partículas no ciclone, os efeitos da temperatura dos gases no desempenho ciclone devem ser avaliados representando viscosidade e densidade do gás. A alta viscosidade tende a retardar o desempenho do ciclone e enquanto a alta densidade do gás melhora o desempenho do ciclone. Mais recentemente, Avci e Karagoz (2003) desenvolveram um modelo matemático para o cálculo do tamanho do diâmetro de corte e eficiência fracionada em separadores ciclônicos, levando em consideração o efeito do fluxo, partículas, parâmetros geométricos e aceleração, assumindo que a mistura de fluido e partículas é homogênea, e a aceleração diminui dependendo da fricção e geometria [5]. A análise dos efeitos de vários parâmetros revela que, em adição aos parâmetros geométricos, superfície de atrito, comprimento de vórtice e regimes de fluxo desempenham um papel importante no desempenho do ciclone especialmente em ciclones pequenos.

Estes trabalhos analisam o efeito de vários fatores como temperatura e viscosidade do fluido, velocidade de fluxo, vazão, parâmetros geométricos, etc, na eficiência dos ciclones dos sistemas de exaustão, apontando para o fato de que ciclone é um equipamento crítico para o bom funcionamento do sistema de exaustão.

A motivação deste trabalho vem justamente dessa criticidade do ciclone na determinação da eficiência do sistema de exaustão; particularmente, de um sistema de exaustão para mitigação da emissão de particulados de uma indústria da região de Poços de Caldas – MG que utiliza o processo de eletrofusão em seu sistema produtivo, pois nesse processo há grande fuga de material particulado. Particularmente, neste trabalho, faz-se a caracterização granulométrica do material particulado do sistema de exaustão desde a alimentação de matéria-prima no forno, passando pelo material coletado pelo sistema de exaustão e alimentado no ciclone, o *underflow* do ciclone, e finalmente o material retido no filtro de mangas. Dessa caracterização obtém-se o diâmetro de corte do ciclone, e os parâmetros de modelos de distribuição granulométrica; a partir desses estimadores pode-se calcular a eficiência do ciclone, bem como por balanço de massa, o que também foi feito neste trabalho.

2. INFORMAÇÕES PRELIMINARES E METODOLÓGICAS

A planta de eletrofusão possui um sistema de exaustão composto de ciclone como pré-coletor e posteriormente filtro de mangas. Para avaliação da eficiência do sistema de exaustão de material particulado da empresa, foram determinados 4 pontos de coleta de amostra: Ponto 1 - ponto de coleta do material alimentado no forno, Ponto 2 - ponto de coleta do material coletado pelo sistema de exaustão, alimentado no ciclone, Ponto 3 – ponto de coleta do material retido no ciclone, chamado de *underflow* e, Ponto 4 – ponto de coleta do material retido pelo filtro manga.

Os dados de projeto do ciclone estudado foram fornecidos pela empresa parceira do projeto. A Tabela 1 traz os valores de projeto de cada parâmetro geométrico do ciclone do sistema de exaustão; bem como os dados de seu redimensionamento. A vazão (Q) e velocidades (v_e) de projeto do ciclone são, respectivamente, 35.000m³/h e 16,2m/s.

Com os dados de projeto do ciclone foi feita a comparação das relações geométricas entre as famílias de ciclones comumente apresentados na literatura [6] e o ciclone analisado. O ciclone estudado melhor se enquadra na família Lapple, tendo equivalência em 5 de 7 relações paramétricas, vide Tabela 2, e por isso, neste trabalho, foram utilizados equações de estimação de diâmetro de corte e eficiência indicadas para essa família.

Tabela 1 – Parâmetros geométricos de projeto do ciclone estudado.
Parâmetros geométricos do ciclone (mm)

	D _c	D _o	S _c	L _c	Z _c	H _c	B _c	D _u
Valores de projeto	1600	1130	1350	2300	3020	1150	590	405
Reprojeto	1600	800	992	3200	3200	800	400	400

A expressão empírica comumente utilizada para a determinação do diâmetro de corte, D₅₀, de um ciclone é a expressão de Rosin, Rammler e Intelmann [7]:

$$D_{50} = \left[\frac{9 \mu b}{2 \pi N_e v_e (\rho_s - \rho_g)} \right]^{1/2}, \quad \text{equação (1)}$$

em que:

μ = viscosidade do gás;

b = largura da entrada do ciclone;

N_e = número de voltas que o gás executa no interior do ciclone; no caso de um ciclone Lapple o valor usado é de 5;

v_e = velocidade de entrada do gás no ciclone;

ρ_s e ρ_g = densidades do sólido e do gás, respectivamente.

Tabela 2 - Comparação das relações geométricas normalizadas das famílias de ciclone e do ciclone estudado.

DIMENSÕES	CICLONE			
	Lapple	Stairmand	Niigas-11	ESTUDADO
B_c / D_c	1	1	1	1
D_o / D_c	2	3	2	2
H_c / D_c	2	3	2	2
L_c / D_c	8	8	8	4
S_c / D_c	2	3	5	2
Z_c / D_c	8	13	8	5
D_u / D_c	1	2	1	1

Matematicamente, a eficiência global η pode ser calculada através da medida da razão entre a massa de sólidos coletados no *underflow*, e a massa total de sólidos alimentados no ciclone, conforme mostra a Equação 2:

$$\eta = \frac{W_{SU}}{W_S} \quad , \quad \text{equação (2)}$$

em que W_S é massa de sólidos na alimentação do ciclone; e W_{SU} é a massa de sólidos no *underflow* do ciclone.

Uma vez conhecida a distribuição granulométrica das partículas, $x = x(D)$ e a eficiência individual de coleta, é possível estabelecer o valor da eficiência global de coleta no campo centrífugo, utilizando-se a Equação 3:

$$\eta = \int_0^1 x(D) \eta_i(D) D^n dD \quad \text{equação (3)}$$

A integração da Equação (3) para uma situação em que a distribuição granulométrica possa ser representada pelo modelo RRB, para o caso dos ciclones Lapple e Stairmand, leva, segundo Massarani [8], a seguinte equação para eficiência global η_{RRB} do ciclone:

$$\eta_{RRB} = \frac{\frac{1.11n}{0.118+n}}{1.81 - 0.322n + \frac{D'}{D_{50}}} \left(\frac{D'}{D_{50}} \right) \quad , \quad \text{equação (4)}$$

em que n e D' são parâmetros do modelo de distribuição granulométrica *Rosin-Rammeler-Bennet* (RRB).

A densidade média da partícula do material alimentado no ciclone, igual a 3520 kg/m³, foi estimada utilizando o picnômetro de gás hélio Accupyc 1330 da marca Micromeritics. A temperatura do gás da tubulação (40°C), foi medida utilizando o termômetro infravermelho MT-360. A viscosidade (μ), igual a 1,85x10⁻⁵ kg/m.s, e densidade do gás (ρ_g), igual a 1,12 kg/m³ foram obtidos na literatura. Utilizando o equipamento Testo 510 em combinação com o tubo de Pitot foi medida a velocidade do fluxo de ar na tubulação, igual a 24 m/s. Com isto e o diâmetro do tubo (0.85m), obtém-se a vazão de 48960 m³/h. Nota-se que os valores de velocidade e vazão de operação são ambos maiores que os valores de projeto.

Amostras foram coletadas 3 vezes por dia, durante 5 dias, nos quatro pontos de coleta, na seguinte sequência: 23h (1ª amostragem), 8h (2ª amostragem) e 14h (3ª amostragem). Esse período de operação de 23h a 8h, chamado de batelada. Através dos resultados de diâmetro (D_i) e volume (%) de partícula, obtidos na análise das amostras realizada no equipamento Malvern, pode-se obter a curva de distribuição granulométrica de cada amostra. Para isso, calculou-se a porcentagem da fração em massa acumulada (x) para cada diâmetro de partícula (D_i).

A fim de se calcular o D_{50} de cada amostragem, em cada ponto, foi utilizado o método de interpolação linear a partir de pontos das curvas de distribuição granulométrica. Realizando a média aritmética dos valores da linha de alimentação do ciclone obtém-se o $D_{50\text{operação}}$ em cada ponto de análise. A partir deste ponto, refere-se a esses valores calculados de D_{50} como $D_{50\text{operação}}$. Demais grandezas estimadas utilizando os valores $D_{50\text{operação}}$ recebem o subscrito “operação”.

Ainda, para cálculo de eficiência via Equação 4 é preciso determinar os parâmetros n e D' do modelo RRB. Para realizar a estimação paramétrica utilizando mínimos quadrados utilizaram-se os dados de granulometria da pior condição de operação (a condição de operação com maior granulometria média no *underflow*).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O valor de diâmetro de corte obtido para a alimentação do ciclone obteve-se o valor de 53,9 μm . Valores de diâmetros de corte desta ordem são bastante elevados, indicando baixa eficiência do ciclone; desta forma, o filtro de mangas, eficiente para partículas da ordem de 10 μm , [9] está sendo saturado, tendo eficiência e vida útil das mangas reduzidas. O diâmetro de corte $D_{50\text{operação}}$ da alimentação do ciclone e do *underflow* do ciclone estão próximos, esperava-se assim que o ciclone tenha ótima eficiência [10]. Acredita-se que isso não ocorra no sistema de exaustão em análise, pois o $D_{50\text{operação}}$ do material retido no filtro de manga é elevado, em média 36,1 μm .

Utilizando a Equação 1, calculam-se o $D_{50\text{calculado}} = 37\mu\text{m}$ e $D_{50\text{projeto}} = 54,8 \mu\text{m}$, utilizando, respectivamente, velocidade e vazão, medidos (valores de operação) e de projeto. Demais grandezas estimadas utilizando os valores $D_{50\text{calculado}}$ e $D_{50\text{projeto}}$ recebem, respectivamente, os subscritos “calculado” e “projeto”. Nota-se que o $D_{50\text{calculado}}$ é menor que o $D_{50\text{projeto}}$. Isso ocorre devido ao aumento na velocidade utilizada na operação em relação à velocidade de projeto, pois a velocidade de projeto = 16,2 m/s e a medida = 24,0 m/s.

3.1. ANÁLISE DE EFICIÊNCIA GLOBAL

3.1.1. POR BALANÇO DE MASSA

A eficiência global pode ser determinada utilizando o balanço de massa. Os parâmetros para cálculo de balanço de massa foram obtidos a partir da média das 5 bateladas, sendo $W_s = 1.294,60 \text{ kg}$ e $W_{SU} = 710,60 \text{ kg}$. Chega-se a uma eficiência global de coleta = 55,3%. Vale ressaltar que a perda para atmosfera durante o processo é de uma tonelada por fornada, gerando perda financeira e aumento de emissão para atmosfera.

3.1.2. UTILIZANDO O AJUSTE DE MODELO RRB

Os parâmetros estimados do modelo RRB foram $n = 2,06780$, e $D' = 64,79569$. Utilizando-se esses estimadores paramétricos, aplicando-se a Equação (4), foi calculada a eficiência global $\eta_{RRB} = 54,5 \%$.

Com o aumento da velocidade e vazão utilizados no sistema de exaustão, houve, pelos cálculos, redução do $D_{50\text{projeto}}$ de 54,8 μm para $D_{50\text{calculado}}$ de 37 μm . Esperava-se com isso, segundo os cálculos, que a eficiência melhorasse de 52% para 70% (eficiência parcial calculada para $D_{50\text{projeto}}$). Este aumento de eficiência não ocorreu, o que é comprovado através do valor de eficiência de 53% obtido a partir do $D_{50\text{operação}} = 53,9 \mu\text{m}$. As eficiências globais estimadas a partir de duas metodologias distintas também corroboram com essa conclusão.

A empresa aumentou a velocidade do fluxo de gás, aumentando assim o consumo energético, esperando ter um ganho de eficiência, o que de fato não ocorreu. A comprovada baixa eficiência do ciclone explica a necessidade atual dos operadores do processo descarregarem o filtro de mangas durante as bateladas – com a baixa eficiência do ciclone, o filtro de mangas está sendo saturado, tendo eficiência e vida útil das mangas reduzidas.

3.2. REDIMENSIONAMENTO DO CICLONE

Utilizando as relações geométricas do ciclone da família Lapple, foi feito o redimensionamento do ciclone contido no sistema de exaustão estudado. Mantendo-se o mesmo diâmetro da parte cilíndrica, $D_c = 1600 \text{ mm}$, redimensionaram-se os demais parâmetros a partir das relações para um ciclone Lapple. O resultado esta

resumido na Tabela 1. Ao fazer a comparação do ciclone atual com o ciclone redimensionado nota-se para o ciclone estudado os parâmetros D_o , S_c , H_c , B_c e D_u são 330, 358, 350, 190 e 5mm maiores e os parâmetros L_c , Z_c são 900 e 180mm menores do que o indicado para o ciclone da família Lapple. Espera-se que com o redimensionamento do ciclone a eficiência esteja entre 70 a 90% [11].

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho fez-se a avaliação da eficiência do ciclone de um sistema de exaustão através do balanço de massa, e a partir estimativas calculadas com equações bem conhecidas na literatura utilizando dados de projeto e operacionais. As análises dos dados granulométricos revelaram que o ciclone opera com o diâmetro de corte de 53,9 μm , valor elevado que indica baixa eficiência do ciclone.

Com relação à eficiência do ciclone, todos os resultados encontram-se em torno de 55% de eficiência, ou seja, baixa eficiência quando se comparado à eficiência de ciclone de no mínimo 80% sugerida na literatura. Portanto, a medida de aumento da vazão e velocidade do fluido no sistema de exaustão não melhorou sua eficiência de 70% esperada pela empresa, aumentando somente o custo energético de operação do sistema.

Conclui-se que é necessário fazer o redimensionamento do ciclone para que haja melhoria no sistema de exaustão da empresa e redução da perda e emissão de material de particulado. Sugere-se também realizar um ensaio de operação de um ciclone piloto em escala reduzida para se obter a curva de eficiência em função da vazão, e determinar assim o ponto ótimo de operação do ciclone hoje instalado.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio da FAPEMIG, CAPES, CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RODRIGUES, K. Filtração de Gases: Estudo da Deposição de Diferentes Tortas de Filtração em Diferentes Meios Filtrantes. 2006. 224f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, 2006.
2. SA, A. Meio ambiente do trabalho, conceituação e prevenção de riscos. 2007.
3. MAGALHÃES, L. Study of atmospheric particulate matter and metals associated with total suspended particulates in the city of Ouro Preto, MG. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.
4. LEE, K.W.; GIESEKE, J.A.; PIISPANEN, W.H. *Evaluation of cyclone performance in different gases. Atmospheric Environment*, v.19, n.6, p.847-852, 1985.
5. AVCI, A.; KARAGOZ, I. *Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators. Journal of Aerosol Science*, v.34, p.937-955, 2003.
6. RODRIGUES, M.V. Análise do Desempenho de um Ciclone com Mangas: Efeito da Permeabilidade do Meio Filtrante. 2001. 111f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2001.
7. CERRI, F.F.P. Estudo para validação de modelo gás-sólido em separação ciclônica de sais de iodo na indústria química. 2010. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
8. MASSARANI, G. Projeto e Análise do Desempenho de Ciclones e Hidrociclones II. Anais do Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, 17, São Carlos – SP, v.2, p.125-135, 1989.
9. MACINTYRE, A.J. Ventilação Industrial e Controle da Poluição. 2ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
10. SANTINI, J. Filtro de mangas para o controle de emissões atmosféricas de material particulado gerados no beneficiamento de mármore e granitos. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de engenharia e arquitetura. Passo Fundo, 2011.
11. PACHECO, T.A. *Como obter o rendimento máximo dos filtros de manga, Revista Química e Derivados*, p.56-64, 2012.