

OTIMIZAÇÃO DAS RELAÇÕES GEOMÉTRICAS DE HIDROCICLONES PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA TOTAL DE SEPARAÇÃO

SILVA, D.O.¹, VIEIRA, L.G.M.², BARROZO, M.A.S.³

¹Universidade Federal de Uberlândia. danylo@feq.ufu.br

²Universidade Federal de Uberlândia. luizgustavo.ufu@gmail.com

³Universidade Federal de Uberlândia. masbarrozo@ufu.br

RESUMO

Hidrociclones são muito utilizados para separação de partículas na indústria mineral, devido a vantagens como: baixo custo, estrutura simples, grande capacidade. Sabe-se que a forma e o tamanho dos hidrociclones têm um efeito determinante no escoamento interno da fase contínua e, portanto, na separação ou classificação da fase dispersa. Assim, várias alterações geométricas têm sido propostas na literatura para os separadores visando aumentar a eficiência de separação de partículas. Neste trabalho, foi utilizada a técnica de superfície de resposta aliada ao algoritmo de Evolução Diferencial (ED) para obtenção de uma nova configuração geométrica de hidrociclone. A geometria ótima obtida foi avaliada experimentalmente e por meio de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD). A configuração otimizada do hidrociclone apresentou alta eficiência de separação quando comparada com as geometrias convencionais, tornando-se assim uma boa opção para separação de finos na indústria mineral.

PALAVRAS-CHAVE: separação sólido-líquido; evolução diferencial; fluidodinâmica computacional.

ABSTRACT

Hydrocyclones are widely used for particle separation in the mineral processing industry due to advantages such as: low cost, simple structure, large capacity and small volume. It is known that the shape and size of a hydrocyclone has a decisive effect on the internal flow structure of the continuous phase, and therefore, the separation or classification of the dispersed phase. Therefore, several geometrical changes have been proposed in the literature in order to improve the equipment's particle separation efficiency. In the present paper, a new geometrical configuration of hydrocyclone has been found through the use of response surface technique combined with the Differential Evolution algorithm. The optimized configuration was also evaluated through the Computational Fluid Dynamics (CFD) technique. The optimized configuration of hydrocyclone presented a high efficiency when compared to the conventional geometries of this paper, what makes it a good option for fine particles separation in the mineral processing industry.

KEYWORDS: solid-liquid separation; differential evolution; computational fluid dynamics.

1. INTRODUÇÃO

Hidrociclones são equipamentos muito simples que promovem separações sólido-líquido ou líquido-líquido, dependendo da aplicação. Tais equipamentos utilizam o princípio de separação por ação centrífuga para remover ou classificar partículas sólidas de um líquido, baseado no momento angular da partícula, que relaciona sua distribuição de massa com a velocidade angular. Na operação de um hidrociclone, altas velocidades rotacionais são obtidas quando a suspensão é injetada tangencialmente em sua parte superior. A suspensão adquire um movimento espiralado à medida que flui para baixo na porção exterior da seção cônica. Parte do fluxo descendente sai através do *underflow* arrastando consigo os materiais pesados e/ou mais grossos, enquanto que o resto inverte a sua direção vertical e gira para cima, saindo pelo *overflow*.

Como a forma e o tamanho do hidrociclone são muito importantes para seu desempenho, várias alterações geométricas têm sido estudadas em hidrociclones e ciclones de diferentes famílias com o objetivo de melhorar o desempenho do equipamento (WANG; YU, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2009; DHODAPKAR; HEUMANN, 2011). Vieira *et al.* (2011), estudando a influência de variáveis geométricas no desempenho de hidrociclones, utilizando técnicas de Fluidodinâmica Computacional CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e de superfície de resposta, encontraram uma melhor configuração de hidrociclone, dentre as configurações analisadas. As respostas analisadas foram o número de Euler e o diâmetro de corte. Em seu trabalho, os autores não utilizaram nenhuma técnica específica de otimização.

A determinação da melhor configuração de operação caracteriza um problema de otimização. O algoritmo de Evolução Diferencial (ED), proposto por Price e Storn (1997), configura-se como um interessante método não determinístico (que faz uso de informações do gradiente da função objetivo e das restrições) para a solução de problemas de otimização devido à qualidade dos resultados apresentados na literatura em diferentes aplicações na ciência e na engenharia (STORN, 1995; STORN *et al.*, 2005; LOBATO *et al.*, 2010).

Diante do que foi apresentado, o objetivo do presente trabalho foi formular e resolver um problema de otimização para a determinação da geometria de um hidrociclone que obtenha a máxima eficiência de separação de partículas, utilizando o algoritmo de ED associado a equações empíricas de eficiência total de separação e número de Euler. Além disso, este trabalho teve por objetivo conduzir testes experimentais com a geometria obtida através do estudo de otimização, a fim de validar a metodologia proposta e conduzir simulações através de técnicas de CFD para avaliar o escoamento no interior da geometria otimizada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Metodologia Experimental

Para obter as equações empíricas de eficiência total de separação (η) e número de Euler (Eu), vinte e cinco diferentes hidrociclones foram construídos. As variáveis geométricas escolhidas para o estudo foram o diâmetro de alimentação (D_i), o diâmetro do *overflow* (D_o), o comprimento total do hidrociclone (L) e o ângulo da parte cônica (θ), sendo que as três primeiras foram postas em termos de uma relação geométrica com o diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone (D_c), o qual foi mantido constante para todas as configurações de hidrociclone estudadas. Cada variável geométrica foi estudada em 5 diferentes níveis utilizando um Planejamento Composto Central (PCC) ortogonal (BOX *et al.*, 1978). Assim, a matriz de planejamento continha 25 hidrociclones em estudo, e os intervalos de estudo de cada variável foram: $0,13 \leq D_i/D_c \leq 0,29$; $0,19 \leq D_o/D_c \leq 0,35$; $3,9 \leq L/D_c \leq 7,6$ e $9^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$. As variáveis D_i/D_c , D_o/D_c , L/D_c e θ foram codificadas e são apresentadas na sequência.

$$X_1 = 20 \left(\frac{D_i}{D_c} - 0,21 \right) \quad (1)$$

$$X_2 = 20 \left(\frac{D_o}{D_c} - 0,27 \right) \quad (2)$$

$$X_3 = \frac{1}{1,1} \left(\frac{L}{D_c} - 5,8 \right) \quad (3)$$

$$X_4 = \frac{1}{3,3^\circ} (\theta - 14,5^\circ) \quad (4)$$

Todos os hidrociclones foram construídos de latão. O diâmetro da seção cilíndrica (D_c), o diâmetro do duto de *underflow* (D_u) e o comprimento do *vortex finder* foram fixados, respectivamente, em 30·mm, 5 mm, e 12·mm. Utilizou-se como material particulado a rocha fosfática com densidade de 2980 kg/m³. A distribuição granulométrica da rocha fosfática utilizada neste estudo foi obtida por difração a *laser*, cujos parâmetros do modelo RRB (que melhor se ajustou aos dados) foram: $d_{63,2} = 8,90 \mu\text{m}$ e $n=0,79$. O estudo foi conduzido na seguinte faixa experimental de queda de pressão: $88200 < \Delta P < 176400$ Pa. Na seção de “Resultados e Discussão” serão apresentados apenas as informações para um valor intermediário de queda de pressão equivalente a 147 kPa.

Amostras de suspensão eram retiradas das correntes de alimentação, *underflow* e *overflow* para determinação das taxas mássicas, concentrações e distribuições granulométricas. A distribuição de tamanho das correntes foi medida por difração a *laser*. A suspensão de teste era suficientemente homogeneizada através de um agitador mecânico para prevenir sedimentação de partículas na base do tanque. Os experimentos foram conduzidos com concentração de sólidos de aproximadamente 1% em volume.

2.2. O algoritmo de Evolução Diferencial (DE)

Evolução Diferencial (ED) é um algoritmo proposto por Price e Storn (1997) baseado em operações vetoriais para gerar candidatos potenciais para resolver problemas de otimização. Esta abordagem apresenta as seguintes vantagens: estrutura simples, facilidade de uso, velocidade, robustez e capacidade de escapar de ótimos locais. A principal ideia por trás desta técnica é o esquema proposto para atualização do vetor de variáveis de projeto de uma população. Basicamente, a diferença ponderada, via taxa de perturbação F , entre dois indivíduos é adicionada a um terceiro indivíduo. Os principais parâmetros de controle em ED são: o tamanho da população (N), a probabilidade de cruzamento (CR) e a taxa de perturbação aplicada (F).

2.3. Modelagem CFD

Neste estudo, as simulações foram feitas no pacote comercial CFD Fluent 12.1[®]. Para construção das geometrias e geração das malhas utilizou-se o pacote de pré-processamento GAMBIT. O domínio computacional foi definido para iniciar na entrada tangencial onde a corrente de

alimentação era injetada. A condição de contorno na entrada é a vazão mássica (*mass flow inlet*) de alimentação para a queda de pressão de 147 kPa. Condição de contorno do tipo pressão de saída (*pressure outlet*) foi definida em ambos os orifícios de saída (*overflow* e *underflow*), nos quais se adotou condição de pressão atmosférica normal. Para modelagem do escoamento dotado de altas vorticidades, como no caso de hidrociclones, o modelo RSM (*Reynolds Stress Model*) é considerado ser uma escolha apropriada (VIEIRA, 2006; LEEUWNER; EKSTEEN, 2008).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Equações Empíricas

Duas respostas principais foram escolhidas para obtenção das equações empíricas deste estudo: a eficiência total de separação (η) e o número de Euler (Eu). O número de Euler é um número adimensional que expressa a relação entre uma queda de pressão local e a energia cinética por volume – portanto, um baixo número de Euler significa uma menor queda de pressão (perda de carga) na mesma vazão (menor custo energético) ou uma maior capacidade (vazão) à mesma queda de pressão. De posse dos dados experimentais para as 25 configurações de hidrociclone estudadas, correlações empíricas foram ajustadas aos mesmos para prever a eficiência total de separação (η) e o número de Euler (Eu) como funções das variáveis geométricas codificadas. As equações ajustadas para cada resposta são dadas, em notação matricial, pelas Equações (5) e (6) para eficiência total de separação e número de Euler, respectivamente.

$$\eta = 63,12 + X'b_1 + X'B_1X \quad (5)$$

$$\text{em que } b_1 = \begin{bmatrix} 2,056 \\ -4,144 \\ -0,214 \\ -2,381 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} -1,067 & 0,106 & -1,112 & 0,240 \\ 0,106 & 3,402 & 0,103 & -0,095 \\ -1,112 & 0,103 & -3,909 & -0,301 \\ 0,240 & -0,095 & -0,301 & -0,504 \end{bmatrix} \text{ e } X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}.$$

$$Eu = 1909,19 + X'b_2 + X'B_2X \quad (6)$$

$$\text{em que } b_2 = \begin{bmatrix} -1183,08 \\ -335,14 \\ -257,37 \\ -141,85 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 627,28 & 25,47 & -7,405 & 1,595 \\ 25,47 & 73,77 & 22,155 & 0,53 \\ -7,405 & 22,155 & 3,52 & 40,405 \\ 1,595 & 0,53 & 40,405 & -28,78 \end{bmatrix} \text{ e } X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}.$$

Os coeficientes de correlação (R^2) obtidos indicaram que 84% da variabilidade dos dados de eficiência total de separação foram explicados pela Equação (5) e 96% da variabilidade dos dados de número de Euler foram explicados pela Equação (6). A análise de resíduos dessas regressões mostrou que estes foram independente e identicamente distribuídos de acordo com uma distribuição normal com média zero e variância fixa.

3.2. Aplicação do Algoritmo de Evolução Diferencial (ED) e validação experimental

A fim de avaliar a metodologia proposta neste trabalho, algumas informações concernentes à aplicação do procedimento de otimização devem ser enfatizadas:

- A função objetivo (FO) é maximizar a eficiência total de separação com uma restrição no número de Euler, que deverá ser menor que 6400 (máximo Euler da faixa experimental).
- Os parâmetros utilizados pelo algoritmo são: 50 indivíduos, 250 gerações, taxa de perturbação e probabilidade de cruzamento iguais a 0,8 e estratégia DE/rand/1/bin para a geração de candidatos potenciais. Para os parâmetros considerados, o número de avaliações da função objetivo é 12550.
- Critério de parada: um dado número de gerações é definido para interromper o procedimento.

A Tabela I apresenta os resultados do algoritmo de otimização. Doravante, o hidrociclone obtido através do algoritmo ED é denominado HCOT1. É importante ressaltar que a restrição imposta ao número de Euler (6400) foi atendida. Além disso, os valores encontrados pelo algoritmo para as variáveis D_i/D_c , D_o/D_c , L/D_c e θ , estão todas na faixa de validade das Equações (5) e (6) ($0,13 \leq D_i/D_c \leq 0,29$; $0,19 \leq D_o/D_c \leq 0,35$; $3,9 \leq L/D_c \leq 7,6$ e $9^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$).

Tabela I. Resultados obtidos através do algoritmo ED.

| Nível codificado | Variáveis | | | | η | Eu |
|------------------|------------------|------------------|----------------|--------------------|--------|------|
| | $X_1=1$ | $X_2=-1,66$ | $X_3=-0,1567$ | $X_4=-1,66$ | | |
| Nível Original | $D_i/D_c = 0,26$ | $D_o/D_c = 0,19$ | $L/D_c = 5,63$ | $\theta = 9^\circ$ | 81,14 | 2279 |

A Tabela II apresenta os resultados preditos para eficiência e número de Euler (Equações 5 e 6) e os resultados experimentais para o hidrociclone otimizado (HCOT1) e algumas das configurações que tiveram as eficiências mais altas (dentre as 25 configurações do PCC) nas mesmas condições de operação. Pode-se notar que a configuração otimizada tem a maior eficiência de separação predita dentre todas as configurações analisadas. Além disso, os resultados experimentais tiveram a mesma tendência dos dados preditos, confirmando a boa predição das equações empíricas propostas e o melhor desempenho da configuração otimizada.

Tabela II. Predição das equações de superfície de resposta e resultados experimentais de eficiência total de separação e número de Euler.

| Hidrociclone | η (%) | | | Eu | | |
|--------------|------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------------|-----------------------------------|
| | Predição (Eq. 5) | Resultado experimental | Comparação experimental com HCOT1 | Predição (Eq. 6) | Resultado experimental | Comparação experimental com HCOT1 |
| HCOT1 | 81,1 | 85,5 | - | 2225 | 2151 | - |
| H3 | 68,4 | 70,4 | -17,7% | 3933 | 3801 | +76,7% |
| H9 | 70,8 | 71,7 | -16,2% | 2223 | 2365 | +9,9% |
| H19 | 78,4 | 76,0 | -11,2% | 2634 | 2803 | +30,3% |

É importante destacar que o HCOT1 apresentou valores de razão de líquido (R_L) em torno de 44,50%, superior a todos os equipamentos do PCC, o que pode justificar sua maior eficiência de

separação, uma vez que maiores valores de razão de líquido podem levar a maiores velocidades axiais, arrastando, conseqüentemente, maior quantidade de partículas para o orifício de *underflow*, aumentando assim a eficiência de separação. Para um melhor entendimento, foram conduzidas simulações em CFD para o equipamento otimizado HCOT1 e a figura 1 apresenta os perfis de velocidade axial simulados para o equipamento.

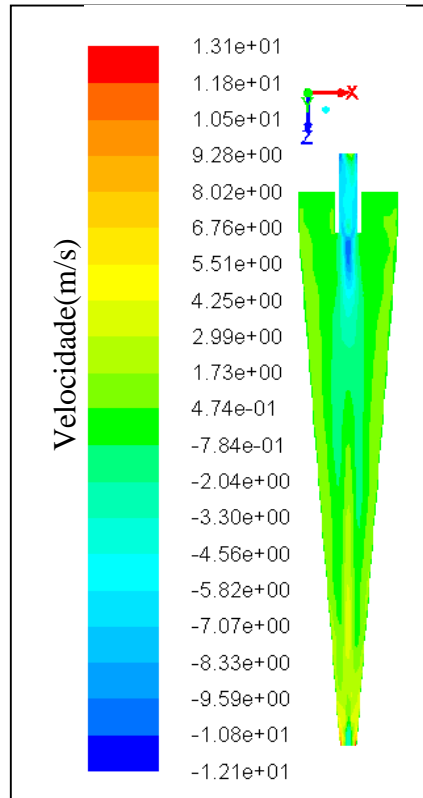


Figura 1. Perfis de velocidade axial do hidrociclone otimizado.

Segundo Leeuwner e Eksteen (2008) partículas na parte externa da região de velocidade vertical zero (LZVV) tendem a ser rejeitadas na corrente de *underflow*, enquanto que as partículas na parte interna tendem a ser coletadas na corrente de *overflow*. Esta região pode ser vista na figura 6 em tons mais claros na parte central do equipamento. A simulação indica que a região de inversão do sentido de escoamento de baixo para cima no hidrociclone HCOT1 foi muito pequena, o que implica que, nesta configuração geométrica, a influência da velocidade axial descendente é mais determinante para o escoamento que velocidades ascendentes. Justifica-se assim, o resultado alcançado para a eficiência do equipamento otimizado HCOT1.

4. CONCLUSÕES

Através do uso de um Planejamento Composto Central (PCC), 25 configurações de hidrociclones foram estudadas, o que permitiu a obtenção de correlações empíricas ajustadas aos dados experimentais para previsão da eficiência total de separação (η) e do número de Euler (Eu) como função de variáveis geométricas codificadas. A utilização destas equações associadas ao algoritmo de Evolução Diferencial (ED) permitiu a obtenção de uma nova configuração que aperfeiçoou o desempenho do hidrociclone, ou seja, maximizou a eficiência total de separação com baixo número de Euler. Resultados experimentais confirmaram a previsão do algoritmo ED. Quando comparado às outras 25 configurações, o hidrociclone ótimo (HCOT1) apresentou a mais alta eficiência total de separação ($\eta = 85,5\%$) com um número de Euler igual a 2150. Portanto, as relações geométricas que

proporcionaram a melhor eficiência total de separação foram: $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,26; 0,19; 5,63; 9^\circ\}$.

5. NOMENCLATURA

| | |
|-------------------------|---|
| <i>CR</i> | Probabilidade de cruzamento – parâmetro do algoritmo ED [-] |
| <i>d₅₀</i> | Diâmetro de corte [m] |
| <i>d_{63,2}</i> | Parâmetro do modelo RRB [m] |
| <i>Dc</i> | Diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone [m] |
| <i>Di</i> | Diâmetro do duto de alimentação [m] |
| <i>Do</i> | Diâmetro do duto de <i>overflow</i> [m] |
| <i>Du</i> | Diâmetro do duto de <i>underflow</i> [m] |
| <i>Eu</i> | Número de Euler [-] |
| <i>F</i> | Taxa de perturbação – parâmetro do algoritmo ED [-] |
| <i>L</i> | Comprimento do hidrociclone [m] |
| <i>n</i> | Parâmetro do modelo RRB [-] |
| <i>N</i> | Tamanho da população – parâmetro do algoritmo ED [-] |
| <i>RL</i> | Razão de líquido [-] |
| <i>X</i> | Matriz das variáveis codificadas [-] |
| <i>X₁</i> | Codificação da variável <i>Di/Dc</i> [-] |
| <i>X₂</i> | Codificação da variável <i>Do/Dc</i> [-] |
| <i>X₃</i> | Codificação da variável <i>L/Dc</i> [-] |
| <i>X₄</i> | Codificação da variável θ [-] |
| $-\Delta P$ | Queda de pressão no hidrociclone [Pa] |
| η | Eficiência total de separação [%] |
| θ | Ângulo do cone do hidrociclone [°] |

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio técnico-financeiro destinado à execução deste trabalho e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos recursos concedidos no Projeto de Participação Coletiva em Evento Científico ou Tecnológico (PCE-00019-13).

7. REFERÊNCIAS

BOX, M. J.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building. New York: John Wiley and Sons, 1978.

DHODAPKAR, S.; HEUMANN, W. L. Harnessing the power of a cyclone. Chemical Engineering, v.118, p.34-43, 2011.

LEEUWNER, M. J.; EKSTEEN, J. J. Computational fluid dynamic modelling of two phase flow in a hydrocyclone. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v.108, p.231-236, 2008.

LOBATO, F. S.; STEFFEN JR, V.; SILVA NETO, A. J. Estimation of Space-Dependent Single Scattering Albedo in Radiative Transfer Problems using Differential Evolution Algorithm. In:

Inverse Problems, Design and Optimization Symposium, 2010, João Pessoa/PB, Brazil. Proceedings... João Pessoa, 2010. CD-ROM.

OLIVEIRA, D. C.; ALMEIDA, C. A. K.; VIEIRA, L. G. M.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Influence of geometric dimensions on the performance of a filtering hydrocyclone: an experimental and CFD study. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.26, n.3, p.575-582, 2009.

PRICE, K. V.; STORN, R. M. Differential Evolution. *Dr. Dobb's Journal*, v.22, p.18-24, 1997.

STORN, R. Differential Evolution Design of an IIR-Filter with Requirements for Magnitude and Group Delay. Berkeley, CA: International Computer Science Institute, 1995. 15 p. TR-95-026.

STORN, R.; PRICE, K.; LAMPINEN, J. A. *Differential Evolution - A Practical Approach to Global Optimization*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.

VIEIRA, L. G. M. *Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes*. 2006. 297 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química)–Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2006.

VIEIRA, L. G. M.; SILVÉRIO, B. C.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Performance of hydrocyclones with different geometries. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.89, n.4, p.655-662, 2011.

WANG, B.; YU, A. B. Numerical study of particle-fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions. *Minerals Engineering*, v.19, n.10, p.1022-1033, 2006.