



## X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica

*“Influência da pesquisa em Engenharia Química no desenvolvimento tecnológico e industrial brasileiro”*

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Universidade Severino Sombra  
Vassouras – RJ – Brasil

### ANÁLISE DO DIÂMETRO DO ORIFÍCIO DE *UNDERFLOW* EM UM HIDROCICLONE FILTRANTE ÓTIMO (HFOT 1)

MARTINS\*<sup>1</sup>, M. P. B.; SILVA<sup>2</sup>, N. K. G. BARROZO<sup>3</sup>, M. A. S.

<sup>1</sup>Aluno da FEQUI/UFU <sup>2</sup>Mestranda da FEQUI/UFU <sup>3</sup>Professor da FEQUI/UFU

Faculdade de Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia

Endereço – UFU, Avenida João Naves de Ávila, 2121, Bloco K, Uberlândia, CEP. 38408-100, MG,  
email: masbarrozo@ufu.br

**RESUMO** - Hidrociclones são equipamentos que realizam a separação de misturas sólido-líquido, líquido-líquido e líquido-gás. Na forma convencional, esse separador consiste em uma seção cônica acoplada a uma seção cilíndrica, apresentando uma corrente de alimentação e duas correntes de saída (*underflow* e *overflow*). Propostas tem sido feitas para modificar essa estrutura convencional do hidrociclone, por exemplo, a incorporação de uma parede filtrante na região cônica (patente de pesquisadores da FEQUI/UFU) e a consequente vazão adicional de filtrado, que provou fornecer melhorias no desempenho do separador para determinadas condições experimentais. Uma vez que a configuração geométrica desse equipamento influencia significativamente no processo de separação, o objetivo deste trabalho foi estudar e quantificar, experimentalmente, o efeito do diâmetro do orifício de *underflow* na separação de um hidrociclone filtrante com geometria ótima (HFOT 1), obtido pelo uso conjunto das técnicas de Evolução Diferencial e superfícies de respostas, que fornece máxima eficiência de separação. De acordo com os principais resultados, observou-se redução na razão de líquido ao diminuir o diâmetro do orifício de *underflow*, este efeito foi quantificado.

**Palavras chave:** eficiência total de separação, sedimentação centrífuga, separação sólido-líquido.

### INTRODUÇÃO

Hidrociclones são separadores sólido-líquido, líquido-líquido e líquido-gás. Devido à facilidade de construção e menor necessidade de espaço físico para sua instalação, se comparado a outros separadores, esses equipamentos tem tido destaque nos processos de separação.

O princípio de separação desses separadores é a sedimentação centrífuga, ou seja, as partículas suspensas são submetidas a uma aceleração centrífuga que as separa do fluido. Essa aceleração ocorre devido à entrada tangencial da corrente de alimentação na parte superior do cilindro, que induz o fluido a realizar, ao longo de sua trajetória, um movimento rotacional. A alimentação escoar de forma descendente dentro do hidrociclone e à

\*Bolsista CNPq.

medida que adentra na seção cônica as partículas mais densas são conduzidas ao orifício de *underflow* situado no vértice inferior do cone. Por outro lado, a parte fluida que contém as partículas mais finas, que não são descarregadas no *underflow*, migra para o centro do eixo do equipamento, formando um vórtice interno ascendente e com movimento rotacional inverso àquele criado pelo primeiro vórtice, e deixa o equipamento pelo orifício de *overflow*, localizado axialmente na parte superior do cilindro (Svarovsky, 1984).

Sabe-se que a geometria de um hidrociclone tem efeito decisivo no seu desempenho bem como no movimento das partículas no interior do equipamento (Petty e Parks, 2001). Dessa forma, têm sido propostas algumas alterações geométricas, para esses separadores, objetivando a melhoria nos seus desempenhos (Wang e Yu, 2006; Vieira *et al.*, 2011).

Neste panorama, pesquisadores da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU) propuseram a incorporação de um cone permeável a um hidrociclone de geometria convencional, denominado hidrociclone filtrante, que por sua vez foi objeto de patente da referida instituição. O princípio de funcionamento do hidrociclone filtrante é análogo ao do equipamento convencional, acrescido do fato de que além das vazões volumétricas de alimentação, *underflow* e *overflow*, há uma corrente adicional de fluido, proveniente da coleta de filtrado produzido na superfície porosa do cone.

Tendo em vista a busca por melhorias no poder de classificação em hidrociclones filtrantes, em um estudo de otimização realizado na FEQUI/UFU mediante aplicação de planejamento de experimentos (Box *et al.*, 1978) e superfícies de resposta, Vieira (2006) estudou 25 configurações geométricas de hidrociclones e obteve equações para previsão de alguns índices de desempenho (número de Euler, eficiência total de separação, diâmetro de corte e razão de líquido), em função de algumas variáveis geométricas: o diâmetro da alimentação ( $D_i$ ), o diâmetro de *overflow* ( $D_o$ ), o comprimento total do hidrociclone ( $L$ ) e o ângulo do tronco de cone ( $\theta$ ), sendo as três

primeiras postas em termo de uma relação geométrica com o diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone ( $D_c$ ).

A determinação da melhor configuração de operação caracteriza um problema de otimização. Tradicionalmente, a resolução deste problema tem sido obtida através do uso de métodos determinísticos, isto é, que fazem uso de informações do gradiente da função objetivo e das restrições para a atualização do projeto inicial adotado, sendo que sua utilização se dá devido a recursos computacionais. No entanto, o uso de algoritmos não determinísticos, que não fazem uso de informações do gradiente da função objetivo, tem atraído a atenção da comunidade científica, pois eles não investem todo o esforço computacional em torno de um único projeto inicial, são de fácil concepção conceitual e implementação e são facilmente estruturados em arquitetura paralela (Lobato, 2008).

O algoritmo de Evolução Diferencial (ED), proposto por Price e Storn (1997), configura-se como um interessante método não determinístico devido à qualidade dos resultados apresentados na literatura em diferentes aplicações na ciência e na engenharia.

Sabendo-se que a modificação na dimensão do diâmetro do orifício de *underflow* é capaz de alterar o poder de classificação de partículas em um hidrociclone, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do diâmetro do orifício de *underflow* sobre o poder de classificação do hidrociclone filtrante ótimo encontrado por meio da aplicação da técnica de Evolução Diferencial aliada a técnica de superfície de resposta e capaz de fornecer máxima eficiência de separação.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Planejamento Experimental

O algoritmo de Evolução Diferencial (ED) é capaz de trabalhar com variáveis de projeto discretas e contínuas. Foi utilizada uma otimização discreta com base no Planejamento Composto Central (PCC) de Vieira (2006), mostrado na Tabela 1, e objetivou-se a mudança no ângulo do tronco de cone ( $\theta$ ) bem como as razões, em relação ao diâmetro da

parte cilíndrica, do diâmetro de alimentação ( $D_i/D_c$ ), do diâmetro de *overflow* ( $D_o/D_c$ ), e do comprimento total do hidrociclone ( $L/D_c$ ). A técnica de ED foi responsável, então, por fazer todas as combinações possíveis entre essas quatro variáveis, de forma a fornecer uma geometria de hidrociclone que leva à máxima eficiência total, com base na equação empírica obtida por Vieira (2006) para esta resposta de interesse.

**Tabela 1 – PCC para 4 fatores e 5 réplicas no centro (Vieira, 2006)**

Hidrociclone	$D_i/D_c$ ( $X_1$ )	$D_o/D_c$ ( $X_2$ )	$L/D_c$ ( $X_3$ )	$\theta$ ( $X_4$ )
H1	0,16	0,22	4,7	11,2°
H2	0,16	0,22	4,7	17,8°
H3	0,16	0,22	6,9	11,2°
H4	0,16	0,22	6,9	17,8°
H5	0,16	0,32	4,7	11,2°
H6	0,16	0,32	4,7	17,8°
H7	0,16	0,32	6,9	11,2°
H8	0,16	0,32	6,9	17,8°
H9	0,26	0,22	4,7	11,2°
H10	0,26	0,22	4,7	17,8°
H11	0,26	0,22	6,9	11,2°
H12	0,26	0,22	6,9	17,8°
H13	0,26	0,32	4,7	11,2°
H14	0,26	0,32	4,7	17,8°
H15	0,26	0,32	6,9	11,2°
H16	0,26	0,32	6,9	17,8°
H17	0,13	0,27	5,8	14,5°
H18	0,29	0,27	5,8	14,5°
H19	0,21	0,19	5,8	14,5°
H20	0,21	0,35	5,8	14,5°
H21	0,21	0,27	3,9	14,5°
H22	0,21	0,27	7,6	14,5°
H23	0,21	0,27	5,8	9°
H24	0,21	0,27	5,8	20°
H25(5)	0,21	0,27	5,8	14,5°

### Material Particulado

O material particulado utilizado para a realização dos experimentos foi a rocha fosfática, fornecida pela Copebrás de Catalão/GO, cuja densidade real determinada pela técnica de picnometria a Hélio, foi equivalente a  $3,237 \pm 0,006 \text{ g/cm}^3$ .

### Unidade Experimental

A unidade experimental de separação sólido-líquido em hidrociclones que esta

montada no laboratório de Sistemas Particulados da FEQUI/UFU, conforme ilustra a Figura 1, é formada por um tanque com capacidade de 250 litros, responsável pelo armazenamento da suspensão. A fim de manter homogênea a concentração da suspensão durante a operação, existe um sistema de homogeneização formado por um agitador mecânico e um par de chicanas. Acoplada ao tanque de suspensão existe uma bomba helicoidal resistente à abrasão. Além disso, imediatamente anterior à entrada da alimentação no hidrociclone, está instalado um manômetro de Bourdon digital.



**Figura 1 - Unidade experimental: (1) Hidrociclone; (2) Reservatório; (3) Bomba helicoidal; (4) Válvula de *bypass*; (5) Válvula; (6) Manômetro; (7) Agitador mecânico (Silva, 2012)**

### Medidas e Condições Operacionais

Os experimentos foram realizados para um valor fixo de queda de pressão:  $-\Delta P = 1,47 \text{ bar}$ , para três valores de diâmetro do orifício de *underflow* (5 mm, 4,5 mm e 2,5 mm) e com concentração de sólido no tanque de, aproximadamente, 1 % em volume.

As concentrações mássicas da alimentação, *underflow* e *overflow* foram obtidas através de técnicas de gravimetria através de amostras coletadas e secas em estufa por volta de 24 h à 105 °C. As vazões volumétricas das correntes supracitadas também foram obtidas coletando uma quantidade de material de cada uma delas, cronometrando-se o tempo de coleta e

pesando-se a amostra, possibilitando o cálculo da vazão mássica e, com a informação da densidade, da vazão volumétrica.

No estudo, a vazão volumétrica da alimentação foi calculada pela Equação 1.

$$Q_a = \frac{W_a}{\rho_a} \quad (1)$$

onde:  $Q_a$  é vazão volumétrica da alimentação,  $W_a$  a vazão mássica da alimentação e  $\rho_a$  representa densidade da alimentação (fluido mais sólido).

De posse dos resultados obtidos para as vazões mássicas e concentrações mássicas das correntes de alimentação e *underflow*, calculou-se a eficiência total de separação a partir da Equação 2.

$$\eta = \frac{C_{wu} \cdot W_u}{C_w \cdot W_a} \quad (2)$$

O número adimensional de Euler (Eu), que expressa a relação entre uma queda de pressão local (determinada pelo manômetro digital instalado na entrada do hidrociclone) e a energia cinética por unidade de volume na alimentação é obtido pela Equação 3.

$$Eu = \frac{\pi D_c^4 (-\Delta P)}{8 \rho Q_a^2} \quad (3)$$

A razão de líquido, quociente entre a vazão volumétrica de líquido do *underflow* e a vazão volumétrica de líquido da alimentação, é calculada pela Equação 4.

$$R_L = \frac{Q_u (1 - C_{vu})}{Q_a (1 - C_v)} \quad (4)$$

para:  $Q_u$  (vazão volumétrica de *underflow*),  $C_v$  (concentração volumétrica de alimentação) e  $C_{vu}$  (concentração volumétrica de *underflow*).

### Hidrociclone utilizado

A geometria encontrada por meio das técnicas de otimização através do uso de superfície de resposta e ED, foi denominada HFOT1 (Hidrociclone Filtrante Otimizado 1), e está ilustrada na Figura 2. As dimensões

reais do hidrociclone otimizado foram:  $D_i = 3,9$  mm,  $D_o = 5,7$  mm,  $L = 174$  mm,  $\theta = 9^\circ$  e  $\ell = 12$  mm.



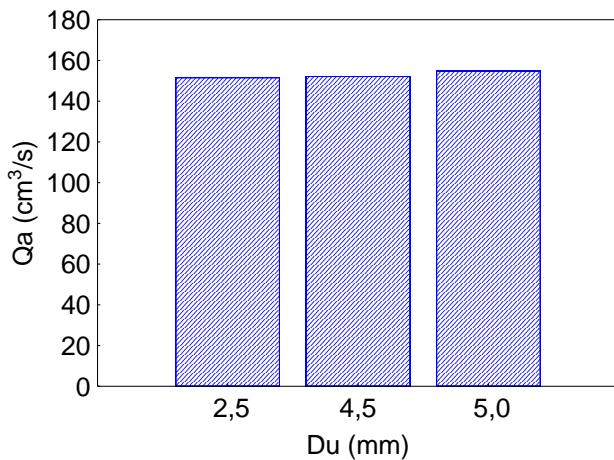
**Figura 2 – HFOT1**

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

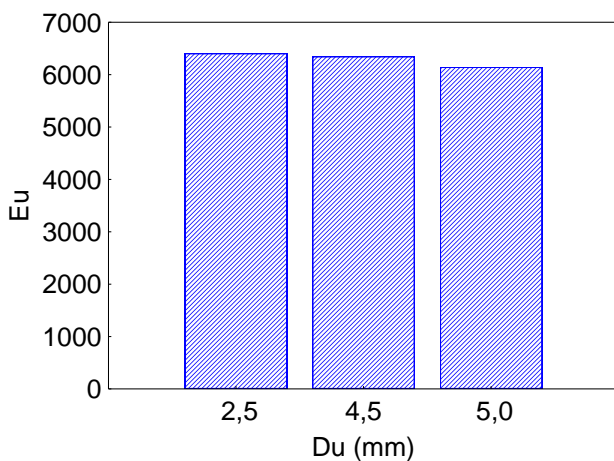
Os resultados obtidos experimentalmente para o HFOT1, com a incorporação dos três diâmetros de orifício de *underflow* para uma queda de pressão fixa de 1,47 bar, foram analisados com base em algumas variáveis associadas ao desempenho de hidrociclone: vazão volumétrica da alimentação, número adimensional de Euler, razão de líquido e eficiência total de separação.

Com base na Figura 3, é possível observar que para o diâmetro do orifício de *underflow* igual a 5 mm foi encontrado o maior valor de vazão volumétrica da alimentação. É válido ressaltar que em hidrociclones, a vazão volumétrica da alimentação está relacionada com o gasto energético do equipamento, expresso em termos do número adimensional de Euler, ou seja, quanto maior a vazão de alimentação menor será o consumo energético (Eu), isso pode ser observado pela analisando-se simultaneamente as Figuras 3 e 4. Embora o valor da vazão volumétrica de alimentação para  $D_u = 5$  mm tenha sido superior às demais vazões correspondentes aos outros valores de  $D_u$  (2,5 e 4,5 mm), observou-se que a influência de  $D_u$  na vazão de alimentação é pequena.

A Figura 4 apresenta os valores obtidos para o número de Euler. Quando maior o valor de  $Du$ , menor foi o consumo energético apresentado pelo equipamento.



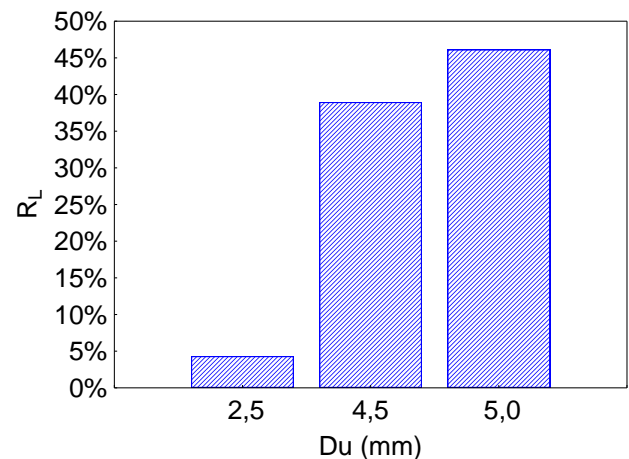
**Figura 3 - Vazão de alimentação para  $Du$  igual a 2,5, 4,5 e 5 mm**



**Figura 4 – Número de Euler para  $Du$  igual a 2,5, 4,5 e 5 mm**

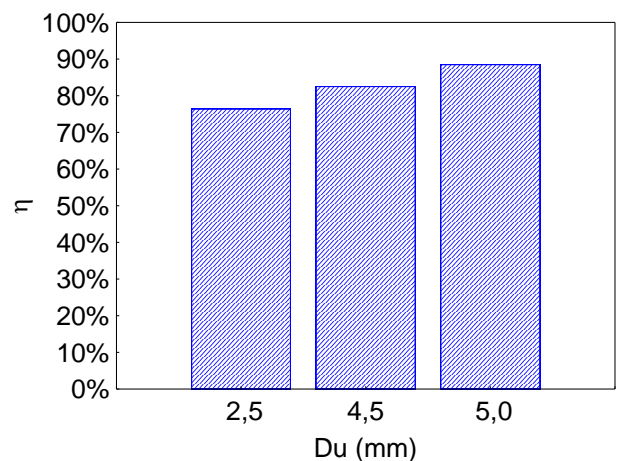
Quanto maior o  $Du$ , maiores foram os valores da razão de líquido, conforme ilustra a Figura 5. Para o diâmetro do orifício de *underflow* igual a 5 mm observa-se um salto no valor da razão líquido, se comparado ao menor  $Du$  (2,5 mm), e ainda um acréscimo de aproximadamente 10% em comparação ao valor obtido com a incorporação do diâmetro de *underflow* de 4,5 mm. Uma vez que o diâmetro do orifício de *underflow* está diretamente relacionado com a razão de líquido (quanto maior o  $Du$  maior  $R_L$ ) é válido ressaltar que para o  $Du$  de 5 mm a corrente de *underflow* apresenta maior porcentagem de líquido, dessa forma, é possível classificá-la

como uma corrente de *underflow* mais diluída, ou menos concentrada em sólidos.



**Figura 5 – Razão de líquido para  $Du$  igual a 2,5, 4,5 e 5 mm**

A Figura 6 mostra os valores de eficiência total obtidos para o HFOT1 frente à variação do diâmetro de *underflow* ( $Du$ ). Observa-se que quanto maior o  $Du$ , maior é o valor da eficiência. Isso é explicado pela análise conjunta das Figuras 5 e 6: quanto mais líquido é descarregado no *underflow*, mais partículas são arrastadas com ele e maior é a eficiência. Logo, para razões de líquido maiores, tem-se maiores eficiências.



**Figura 6 - Eficiência total para  $Du$  igual a 2,5, 4,5 e 5 mm**

## CONCLUSÃO

Partindo-se de uma geometria de hidrociclone filtrante otimizada pelo uso conjunto das técnicas de Evolução Diferencial

e de superfície de resposta, que fornecesse máxima eficiência total de separação, buscou-se avaliar a influência do diâmetro do orifício de *underflow* no poder de classificação desse equipamento.

Os resultados mostraram que o melhor *Du* a ser incorporado nesse separador é o de 5 mm, pois para este caso, o equipamento apresentou alta eficiência de separação bem como baixo número de Euler, ou seja, menor consumo energético, quando comparados aos resultados obtidos para os demais diâmetros do orifício de *underflow* estudados.

## NOMENCLATURA

$C_w$  – concentração volumétrica da alimentação (%)

$C_{wu}$  – concentração mássica do *underflow* (%)

$D_c$  – diâmetro do cilindro do hidrociclone (mm)

$D_u$  – diâmetro do orifício de *underflow* (mm)

$Eu$  – número de Euler

HFOT1 – hidrociclone filtrante otimizado 1

$-\Delta P$  – queda de pressão entre a saída da corrente de *overflow* e a corrente de alimentação do hidrociclone (Pa)

$Q_a$  – vazão volumétrica da alimentação ( $m^3/s$ )

$R_L$  – razão de líquido (%)

$W_u$  – vazão mássica do *underflow* (g/s)

$\eta$  – eficiência total de separação (%)

$\rho$  – densidade do fluido ( $kg/m^3$ )

## REFERÊNCIAS

- BOX, M. J.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. (1978), Statistics for Experimenters - An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building, J. Wiley and Sons, New York-EUA
- LOBATO, F.S., (2008), Otimização Multi-objetivo para o Projeto de Sistemas de Engenharia. UFU, Uberlândia – MG, (Tese de Doutorado) 402p.
- PETTY, C. A., PARKS S. M., (2001), “Flow predictions within hydrocyclones”. Filtration and Separation, v. 38, p. 28-34.
- PRICE, K., STORN, R. (1997), “Differential evolution – a simple evolution strategy for fast optimization”. Dr. Dobb’s Journal, v.22, p.18-24.

SILVA, D.O., (2012), Otimização da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclones Mediante Modificações Geométricas. PGEQ/Faculdade de Engenharia Química da UFU, Uberlândia – MG, (Tese de Doutorado) 189p

SVAROVSKY, L., (1984), Hydrocyclone, Holt, Rinehart & Winston, Eastbourne, UK. 198p.

VIEIRA, L. G. M., (2006), Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes, PPGEQ/Faculdade de Engenharia Química da UFU, Uberlândia – MG, (Tese de Doutorado).

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

WANG, B., YU, A. B., (2006). “Numerical study of particle-fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions”. Min. Eng., v. 19, p. 1022-1033

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo subsídio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.