

MINIMIZAÇÃO DA RAZÃO DE LÍQUIDO DE HIDROCICLONES A PARTIR DE UM ALGORITMO BASEADO EM EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E RESTRIÇÕES FÍSICAS

V. C. F. REIS, M. A. S. BARROZO e L. G. M. VIEIRA

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química
E-mail para contato: victor.cfreis@gmail.com

RESUMO – Hidrociclones são equipamentos destinados à separação de suspensões sólido-líquido e líquido-líquido em campo centrífugo. São versáteis e simples, por isso podem ser aplicados a diversas atividades industriais, como a deslamagem, a classificação seletiva, o espessamento e a recuperação de líquidos. Em um contexto de otimização, diversas alterações nas variáveis geométricas e operacionais desses equipamentos têm sido estudadas com o objetivo de avaliar sua performance, melhorando, assim, seu desempenho. A concentração de suspensões é uma operação bastante utilizada em boa parte dos processos industriais. Neste panorama, o presente trabalho consistiu na aplicação de técnicas de otimização, visando a obter os menores valores possíveis para razão de líquido, o que caracteriza um hidrociclone concentrador. Os resultados foram satisfatórios e forneceram uma razão de líquido de 2,45% e uma eficiência total de aproximadamente 56%.

1. INTRODUÇÃO

Hidrociclones são equipamentos utilizados em diversas áreas do setor industrial para separação de uma fase dispersa (sólida ou líquida) de uma fase contínua (líquida) em campo centrífugo. Em comparação a outros separadores como, por exemplo, as centrífugas, possuem estrutura simples, pequeno volume e ausência de partes móveis, o que lhes confere um baixo custo de manutenção e aquisição. (Svarovsky, 2000). Em função da versatilidade em sua aplicação, os hidrociclones podem ser encontrados nos mais variados processos de separação sólido-líquido, tais como: a classificação seletiva, a deslamagem, o espessamento, o fracionamento, a pré-concentração, a recuperação de líquidos etc.

O princípio básico de operação de um hidrociclone convencional consiste de uma alimentação que, dotada de energia de pressão, é injetada tangencialmente na parte superior do equipamento. Na medida em que o fluido adentra na parte superior cilíndrica, um vórtice descendente é criado, fazendo com que a força centrífuga atue em suas partículas, que, por sua vez, são direcionadas às paredes do hidrociclone. As partículas maiores ou mais densas são, dessa forma, arrastadas e descarregadas no orifício de *underflow*. Já a parcela de suspensão não descarregada no *underflow*, migra para o centro do equipamento, criando um vórtice interno ascendente, deixando o hidrociclone através do duto de *overflow*, carregando as partículas menores ou menos densas.

Este estudo teve como principal objetivo empregar técnicas de otimização visando à minimização da razão de líquido, característica que define um hidrociclone concentrador. Neste contexto, para um melhor entendimento do processo de separação sólido-líquido em hidrociclones, serão doravante apresentados alguns conceitos relacionados ao desempenho e ao projeto desses equipamentos.

Razão de Líquido

A relação entre a vazão volumétrica de líquido que entra na corrente de alimentação e, posteriormente, sai na corrente de *underflow*, é denominada Razão de Líquido. Estando diretamente relacionada ao poder de classificação do equipamento, vem representada através da Equação 1 e pode ser facilmente determinada uma vez conhecidas as vazões volumétricas das correntes de alimentação e *underflow*, bem como as respectivas concentrações volumétricas.

$$R_L = \frac{Q_U(1 - C_{VU})}{Q_A(1 - C_{VA})} \quad (1)$$

Eficiência Total

Conhecendo-se as vazões mássicas das correntes de alimentação (W_A) e *underflow* (W_U), e as suas respectivas concentrações mássicas, pode-se obter a Eficiência Total em um hidrociclone. Esta resposta contabiliza a relação entre a massa da fase dispersa coletada na corrente de *underflow* frente à massa continuamente introduzida na alimentação, sendo representada através da Equação 2.

$$\eta = \frac{C_{Wi} W_U}{C_{WA} W_A} \quad (2)$$

Número de Euler

O Número de Euler avalia a capacidade de operação de um hidrociclone, ou seja, o consumo energético deste equipamento através da razão entre a queda de pressão e a energia cinética por unidade de volume. Na Equação 4 são fornecidas as informações necessárias para o cálculo desse adimensional quando conhecidas as vazões volumétricas de alimentação, queda de pressão e densidade da fase contínua na temperatura de operação em cada ensaio realizado.

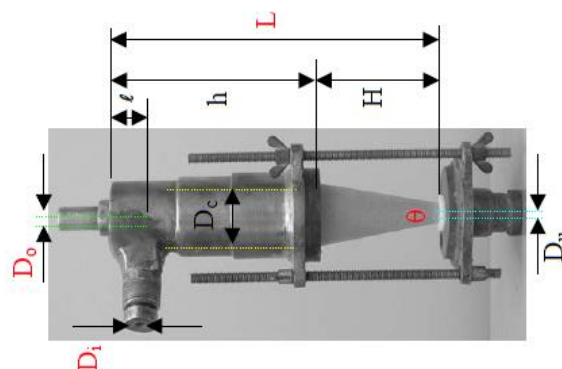
$$Eu = \frac{-\Delta P}{\frac{\rho}{2} \left(\frac{4Q}{\pi D_C^2} \right)^2} \quad (3)$$

2. Materiais e Métodos

2.1. Planejamento Experimental

As técnicas de otimização empregadas neste estudo tomaram como base um Planejamento Composto Central (PCC), utilizado por Vieira (2006), que levou em consideração as dimensões geométricas mais relevantes de um hidrociclone. As variáveis geométricas escolhidas por Vieira (2006) foram: 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 (θ), sendo as três primeiras postas em termos de uma relação geométrica com o diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone (D_c).

Figura 1 – Dimensões relevantes no estudo de hidrociclones



Pelo Planejamento Composto Central, considerando os quatro fatores escolhidos ($k = 4$), as cinco réplicas no centro ($n_r = 5$) e os três níveis ($n = 3$), Vieira (2006) propôs uma sistemática de experimentos, contabilizando 25 diferentes hidrociclones ($2^k + n_r + 2k$).

Assim, as variáveis D_i/D_c , D_o/D_c , L/D_c , θ e $-\Delta P$ foram codificadas em X_1 , X_2 , X_3 , X_4 e X_5 respectivamente, conforme as Equações (4) a (8), com fator de ortogonalidade (α) equivalente a 1,66.

$$X_1 = 20 \left(\frac{D_i}{D_c} - 0,21 \right) \quad (4)$$

$$X_2 = 20 \left(\frac{D_o}{D_c} - 0,27 \right) \quad (5)$$

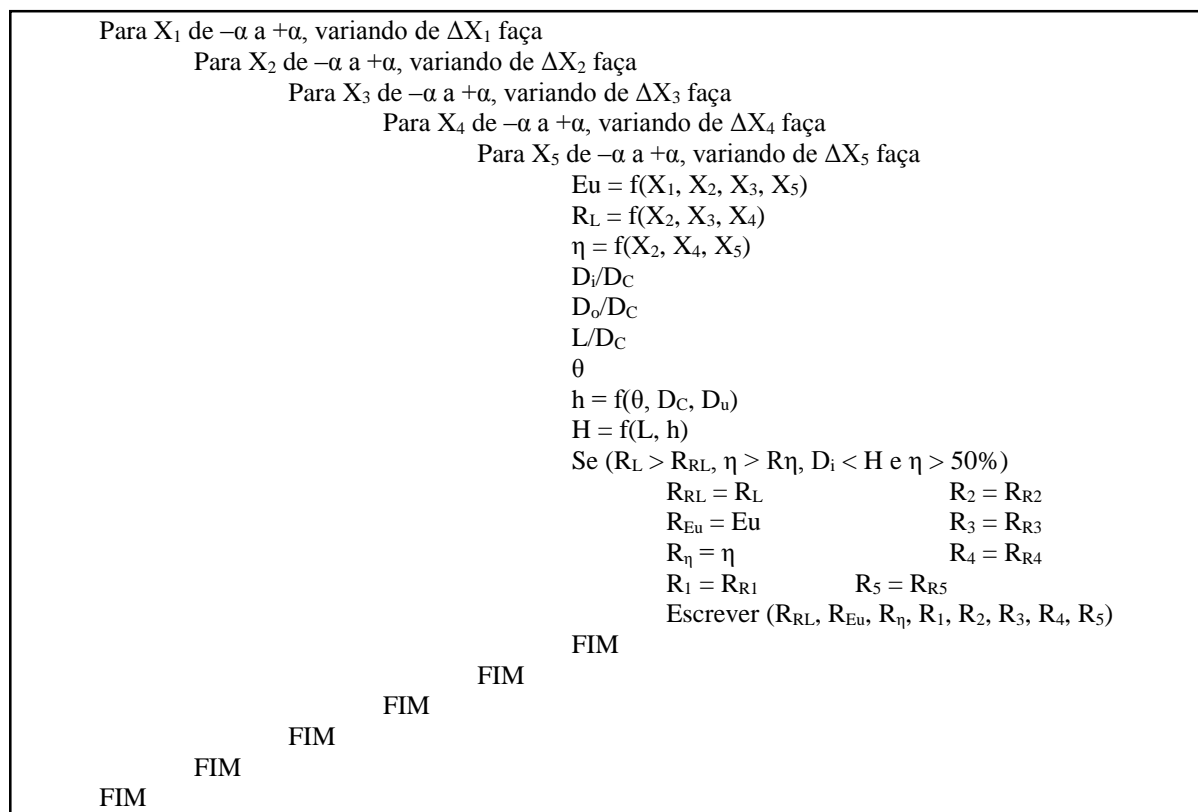
$$X_3 = 20 \left(\frac{L}{D_c} - 5,8 \right) \quad (6)$$

$$X_4 = \frac{1}{3,3^\circ} (\theta - 14,5^\circ) \quad (7)$$

$$X_5 = \frac{-\Delta P - 1,35}{0,45} \quad (8)$$

2.2. Metodologia

O algoritmo utilizado para otimização das relações geométricas foi implementado em Linguagem C, utilizando-se o *software Code Blocks*. Neste algoritmo, aplicou-se uma restrição para a Eficiência Total, que deveria ser superior a 50%. Tal restrição foi adotada para porque representa o mínimo patamar ordinariamente tolerado pelos processos industriais que fazem uso de hidrociclone. É apresentado, em sequência, um esquema da lógica utilizada:



No esquema apresentado, nota-se que a estrutura de laço consiste em uma varredura dos valores de X_i no domínio de $-\alpha$ a $+\alpha$ (-1,66 a +1,66) que, em conjunto com as restrições aplicadas para Eficiência, Número de Euler e Diâmetro de Alimentação, são capazes de fornecer os menores valores possíveis para a Razão de Líquido.

Seguem, abaixo, as Equações de Regressão que foram utilizadas na implementação desses algoritmos para cálculo de Número de Euler (Equação (9)), Razão de Líquido (Equação (10)) e Eficiência Total (Equação (11)). Tais equações foram obtidas por Vieira (2006) por meio da aplicação de técnicas de regressões múltiplas.

$$Eu = 1607 - 1176X_1 - 283X_2 - 186X_3 + 86X_5 + 604X_1^2 + 122X_2^2 \quad (9)$$

$$R_L = 21,14 - 7,21X_2 + 1,47X_3 - 4,26X_4 + 1,96X_3X_4 + 3,36X_2^2 \quad (10)$$

$$\eta = 65,18 - 4,94X_2 - 5,23X_4 + 2,05X_5 + 1,28X_2^2 \quad (11)$$

3. RESULTADOS

A Tabela 1, abaixo, apresenta os resultados obtidos mediante a implementação do algoritmo mencionado anteriormente.

Tabela 1 – Resultados obtidos para as principais respostas e relações geométricas estudadas

R_L	Eu	η	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
2,45	1593,00	56,10	1,66	1,06	-1,64	1,66	1,66
D_i/D_C		D_o/D_C		L/D_C		θ	$-AP$
0,29		0,32		5,72		20°	178000 Pa

De acordo com a resposta prevista pelo algoritmo de otimização, foi possível observar um resultado muito satisfatório para a razão de líquido. O valor encontrado (2,45%) certamente proporcionaria uma corrente de *underflow* extremamente concentrada na fase dispersa e está abaixo de todas as razões de líquido observadas por Vieira (2006). A título de exemplificação, a menor razão de líquido observada por Vieira (2006) no estudo experimental dos 25 hidrociclones foi de 10%.

É interessante notar que, em se tratando de hidrociclones, os pontos axiais (-1,66 e +1,66) podem perfeitamente representar condições em que determinada demanda é potencializada, principalmente quando se refere ao diâmetro de alimentação, ângulo e queda de pressão.

Vale ressaltar que o hidrociclone previsto pelo algoritmo de otimização ainda apresentou uma Eficiência Total de 56% (maior que a restrição física imposta), mostrando que o campo centrífugo ainda estaria atuando com uma contribuição bem significativa no que tange à separação da fase dispersa (aproximadamente 53,55%).

Além do excelente patamar de concentração (2,45%) e separação (56%), o hidrociclone proposto indicou um número de Euler relativamente baixo (1593), algo extremamente positivo e compatível com os hidrociclones concentradores disponíveis no mercado (Rietema).

4. CONCLUSÃO

O propósito deste trabalho foi obter o menor patamar possível de razão de líquido a partir da otimização das condições operacionais de um hidrociclone. Uma vez que a principal finalidade seria empregá-lo em processos de concentração ou espessamento de suspensões, o valor obtido para razão de líquido ($R_L = 2,45\%$) mostrou-se viável tecnicamente para um processo de hidrociclonagem. No presente caso, as variáveis operacionais obtidas pelo algoritmo de otimização foram 0,29; 0,32; 5,72; 20° e 178000 Pa para D_i/D_C , D_o/D_C , L/D_C , θ e $-AP$, respectivamente, capazes de prover uma boa concentração de sólidos em um patamar satisfatório de eficiência total de 56%.

5. NOMENCLATURA

C_{VA} - concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação (-)

C_{VU} - concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow* (-)
 C_{WA} - concentração mássica de sólidos na corrente de alimentação (-)
 C_{WU} - concentração mássica de sólidos na corrente de *underflow* (-)
 D_C - diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone (L)
 d_p - diâmetro da partícula (L)
 D_u - diâmetro de *underflow* (L)
 Eu - número de Euler (-)
 η - eficiência total (-)
 L - comprimento total da seção cilíndrica do hidrociclone (L)
 H - altura da parte cônica do hidrociclone (L)
 h - altura da parte cilíndrica do hidrociclone (L)
 Q - vazão volumétrica da corrente de alimentação (L^3T^{-1})
 Q_U - vazão volumétrica da corrente de *underflow* (L^3T^{-1})
 R_L - razão de líquido (-)
 Re_u - variável de restrição para Número de Euler (-)
 R_i - variável de restrição para as variáveis codificadas X_i , onde $i = 1, 2, 3, 4$ ou 5
 R_{RL} - variável de restrição para Razão de Líquido (-)
 R_η - variável de restrição para Eficiência Total (-)
 W_A - vazão mássica corrente alimentada (MT^{-1})
 W_U - vazão mássica corrente de *underflow* (MT^{-1})
 $-\Delta P$ - queda de pressão no hidrociclone ($ML^{-1}T^{-2}$)
 ρ - densidade do fluido (ML^{-3})
 ρ_s - densidade do sólido/particulado (ML^{-3})
 μ - viscosidade do fluido ($ML^{-1}T^{-1}$)

6. REFERÊNCIAS

SVAROVSKY, L. Solid-Liquid Separation. 4th Edition. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: Butterworth-Heinemann, 2000. 554 p.

VIEIRA, L. G. M. Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes. 2006. 297 f. [Tese de Doutorado]. Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia; 2006.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e ao Laboratório de Separação e Energias Renováveis (LASER) da FEQUI/UFU.