



ESTUDO COMPARATIVO ENTRE UM HIDROCICLONE CONCENTRADOR OTIMIZADO POR ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL E O SEPARADOR DE RIETEMA

YANNE N. KYRIAKIDIS¹, SUÉLEN M. GONÇALVES¹, ANA V. C. L. ALLIPRANDINI¹,
MARCOS A. S. BARROZO¹, LUIZ G. M. VIEIRA^{1*}

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química
*e-mail: luizgustavo@ufu.br

RESUMO – Hidrociclones são equipamentos empregados na separação sólido-líquido e líquido-líquido, os quais possuem como princípio de funcionamento a separação centrífuga. São dispositivos de geometria simples, mas que, a depender das relações entre suas dimensões características, apresentam diferentes tipos de separação, podendo ser utilizados para classificar ou concentrar partículas. Em vista disso, ferramentas de otimização como o Algoritmo de Evolução Diferencial têm sido usadas para o desenvolvimento de geometrias que possibilitem o aperfeiçoamento deste processo. Dito isso, este trabalho teve como objetivo buscar relações geométricas ótimas que propiciassem baixo gasto energético e alta concentração de partículas na corrente de *underflow*, associados a uma satisfatória eficiência em termos de diâmetro de corte reduzido. Ao mesmo tempo, propôs-se comparar a geometria otimizada com resultados da literatura para o separador de Rietema - um tradicional hidrociclone concentrador. Para isto, foram analisadas as respostas número de Euler, razão de líquido, concentração volumétrica do *underflow* e diâmetro de corte reduzido. Os resultados obtidos destacam o poder concentrador do hidrociclone otimizado, chegando a concentrações de *underflow* 3 vezes maiores para a nova geometria quando comparada à de Rietema, apresentando ainda um reduzido gasto energético ($Eu = 1300$) e razoável diâmetro de corte reduzido ($d'_{50} = 15,0 \mu m$).

INTRODUÇÃO

As operações de separação sólido-fluido são amplamente utilizadas em diversos ramos industriais, desde as indústrias de mineração e metalurgia, até as de cosméticos e farmacêuticas. Para realizar a separação de uma fase particulada de uma fase fluida, destacam-se os métodos de filtração, sedimentação e centrifugação. Dentro dessa última categoria, estão as centrífugas e os separadores ciclônicos.

O hidrociclone é um equipamento destinado à separação de uma fase dispersa (sólida ou líquida) de uma fase contínua líquida em campo centrífugo. Diferentemente das centrífugas, os hidrociclones não possuem partes móveis, sendo que sua própria geometria

aliada a uma alimentação sob pressão induz à formação de um intenso campo centrífugo que proporciona a divisão da suspensão alimentada em duas correntes de características distintas: uma corrente efluente com maior proporção de líquido, denominada *overflow*, e outra rica em partículas maiores e mais densas, chamada *underflow* (Svarovsky, 1984). Um esquema representativo de um hidrociclone é apresentado na Figura 1.

Esses separadores geralmente são constituídos de um cilindro com alimentação tangencial acoplado a um tronco de cone, com uma saída localizada no topo do cilindro (tubo de *overflow*) e outra na extremidade de menor diâmetro do tronco de cone (orifício de *underflow*). A depender das razões entre as dimensões características desses equipamentos,

a separação entre as fases pode ser significativamente alterada, ao passo que o escoamento nesses separadores é turbulento e com alta vorticidade (Araújo *et al.*, 2015).

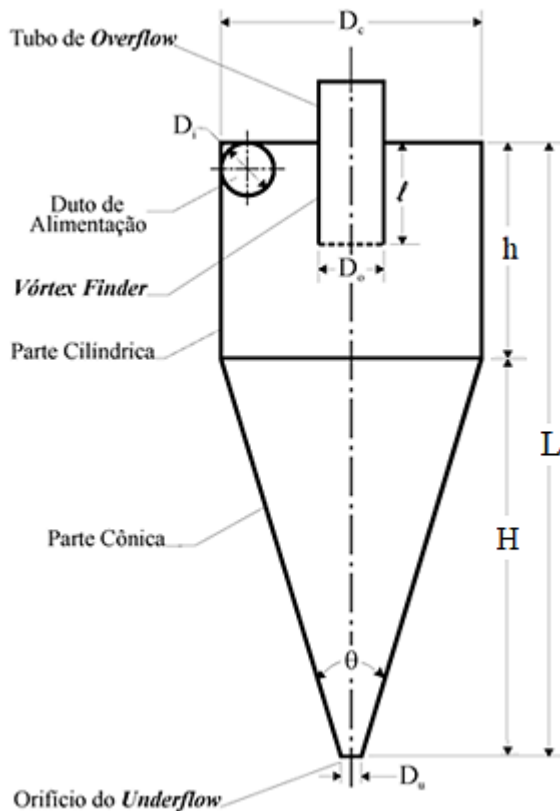


Figura 1: Representação de um hidrociclone e suas partes constituintes.

Assim sendo, usualmente tem-se dois propósitos de separação: a classificação de partículas e o espessamento da suspensão.

A classificação tem por objetivo a diminuição da quantidade de partículas menores e mais finas na corrente de *overflow*, proporcionando uma maior eficiência de coleta e promovendo uma separação por tamanho de partículas. As geometrias que proporcionam esse tipo de separação normalmente apresentam uma corrente de *underflow* diluída, pois o líquido faz o arraste dessas partículas menores para o *underflow*, e frequentemente requerem uma grande energia de pressão, ou seja, dispõem de um alto gasto energético (Almeida, 2008).

Já o espessamento tem como meta a maior recuperação de líquido na corrente de *overflow* e consequente maior concentração de partículas na corrente de *underflow*. Habitualmente, geometrias que demonstram um comportamento concentrador também se

revelam equipamentos de menor gasto energético para o processamento de uma mesma vazão de alimentação, quando comparadas às geometrias classificadoras (Silva *et al.*, 2015).

Por via de regra, segundo Vieira (2006), essas duas finalidades caminham em sentidos opostos, de tal modo que existem hidrociclones de relações geométricas clássicas e específicas para cada aplicação. Como exemplos tradicionais, pode-se citar os hidrociclones de Bradley para a classificação, uma vez que apresentam alta eficiência de coleta e menores diâmetros de corte (tamanho da partícula que possui 50% de probabilidade de ser coletada na corrente de *underflow*), e os hidrociclones de Rietema, que apresentam um menor gasto energético (expresso pelo número de Euler) aliado a um alto poder concentrador (baixas razões de líquido) (Massarani, 1989).

Além das famílias clássicas, com o desenvolvimento dos algoritmos computacionais, pôde-se aprimorar ainda mais a separação nesses equipamentos pela utilização de técnicas de otimização para estimar relações geométricas ótimas (Silva, 2012), que possibilitem aproximar tais objetivos aparentemente divergentes, a fim de se propor geometrias que melhorem a qualidade da separação com um consumo energético cada vez menor.

Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo a otimização geométrica de um hidrociclone concentrador de baixo gasto energético com uma razoável eficiência de separação, utilizando para isto um Algoritmo de Evolução Diferencial (AED) e um banco de dados com resultados de 56 hidrociclones catalogados pela Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU). Como metas deste trabalho, ainda ter-se-ia a construção do equipamento concentrador otimizado e testes experimentais com a nova geometria, a fim de se determinar experimentalmente as respostas número de Euler (Eu), razão de líquido (R_L), concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow* (C_{VU}) e diâmetro de corte reduzido (d'_{50}), comparando os resultados obtidos com os do hidrociclone de Rietema.

MATERIAIS E MÉTODOS

Otimização

A base de dados para a otimização foi construída a partir dos resultados experimentais obtidos em ensaios com hidrociclones estudados na FEQUI/UFU por Vieira (2006), Almeida (2008), Silva *et al.* (2012), Silva *et al.* (2015) e Kyriakidis *et al.* (2018), além de resultados levantados por Vieira (2006) com os hidrociclones clássicos de Bradley, Rietema, Krebs e Demco, todos com diâmetro de cilindro (D_C) igual a 30 mm. Foram catalogados os resultados de número de Euler (Eu), razão de líquido (R_L) e diâmetro de corte reduzido (d'_{50}) na queda de pressão de 177 kPa. Esses resultados encontram-se na Figura 2.

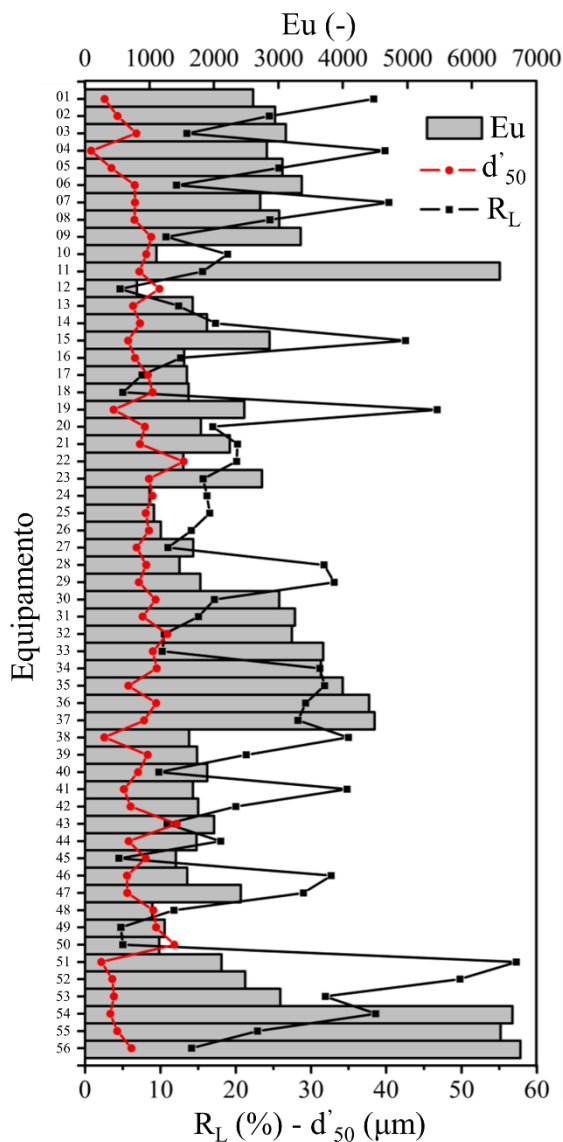


Figura 2: Resultados catalogados no banco de dados experimental da FEQUI/UFU. Adaptado de: Ullmann *et al.*, 2021.

Vale ressaltar que em todos os trabalhos a concentração volumétrica de sólidos na alimentação permaneceu constante em 1,0% e o material particulado possuía granulometria similar, todos ajustados ao modelo RRB (Rosin, Rammler e Bennet) com parâmetro $d_{63,2}$ entre 8,80 e 12,89 μm , bem como densidade real entre 2740,0 e 2980,0 kg/m^3 .

Para a otimização, foram calculadas as relações geométricas de cada hidrociclone, que são definidas pela razão de cada dimensão característica pelo diâmetro da parte cilíndrica (D_C), com exceção do comprimento de *vortex finder*, que foi associado à altura da parte cilíndrica (h), e do ângulo do tronco de cone (θ). Os domínios dessas variáveis encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Domínios das variáveis não codificadas do banco de dados.

Variável	Domínio
D_i/D_C	[0,130; 0,290]
D_o/D_C	[0,160; 0,350]
L/D_C	[3,900; 7,600]
θ	[9,0°; 20,0°]
ℓ/h	[0,015; 1,200]
D_U/D_C	[0,100; 0,167]

As relações geométricas foram codificadas segundo a Equação 1, em que X_i é o valor da variável codificada, σ_i é o valor da variável na escala original, $\bar{\sigma}_i$ é o nível central na escala original e d_i é a diferença entre os níveis +1,0 e -1,0 na escala original (Box *et al.*, 1978).

$$X_i = 2 \frac{(\sigma_i - \bar{\sigma}_i)}{d_i} \quad (1)$$

A razão entre o diâmetro da alimentação e o diâmetro do cilindro (D_i/D_C) foi codificada na variável X1, o diâmetro de *overflow* pelo diâmetro do cilindro (D_o/D_C) foi codificado na variável X2, a razão entre o comprimento total e o diâmetro do cilindro (L/D_C) foi codificada na variável X3, o ângulo do tronco de cone (θ) foi codificado em X4, o comprimento de *vortex finder* pela altura da parte cilíndrica (ℓ/h) foi codificado na variável X5, e o diâmetro de *underflow* pelo diâmetro do cilindro (D_U/D_C) foi codificado na variável X6. Os domínios das

variáveis codificadas do banco de dados encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Domínios das variáveis codificadas do banco de dados.

Variável Codificada	Domínio
X1	[-1,660; +1,660]
X2	[-1,571; +1,143]
X3	[-1,362; +1,551]
X4	[-1,222; +1,222]
X5	[-0,223; +1,623]
X6	[-1,000; +1,000]

Com os resultados catalogados e as dimensões geométricas codificadas, por meio de regressões múltiplas utilizando o *software* Statistica® foi possível a estimativa de superfícies de resposta (Myers, 1976) para o número de Euler (Eu) e o diâmetro de corte reduzido (d'_{50}), com um nível de significância de 10%.

Assim, com os domínios das variáveis codificadas e com as superfícies de resposta estimadas, utilizando um código desenvolvido em Maple® empregou-se um Algoritmo de Evolução Diferencial (Price *et al.*, 2005) para o estudo de caso de minimização do número de Euler, almejando-se também a concentração da corrente de *underflow*, uma vez que essas duas características andam alinhadas. Foi considerada como restrição ao problema de otimização o diâmetro de corte reduzido menor do que $15,0 \mu\text{m}$, o que proporcionaria uma razoável eficiência do processo, considerando o material particulado a ser utilizado nos ensaios experimentais.

Ensaio Experimentais

Material Particulado: O material particulado empregado nos ensaios experimentais foi o quartzito, gentilmente cedido pela empresa ANEX Mineração S.A. Segundo análises de espectrofotometria de raios X realizadas pela própria empresa, o material era composto 95% por sílica (SiO_2) e 5% por impurezas diversas.

A densidade real do material foi determinada por picnometria a gás hélio com valor igual a $2740,0 \pm 0,5 \text{ kg/m}^3$.

O quartzito foi moído em moinho de bolas até que sua distribuição granulométrica, ajustada ao modelo RRB, fosse equivalente à

faixa do parâmetro $d_{63,2}$ utilizada nos trabalhos analisados no banco de dados. Assim, por meio de técnicas de difração de raios *laser*, obteve-se a distribuição granulométrica da suspensão a ser tratada, sendo expressa na Figura 3.

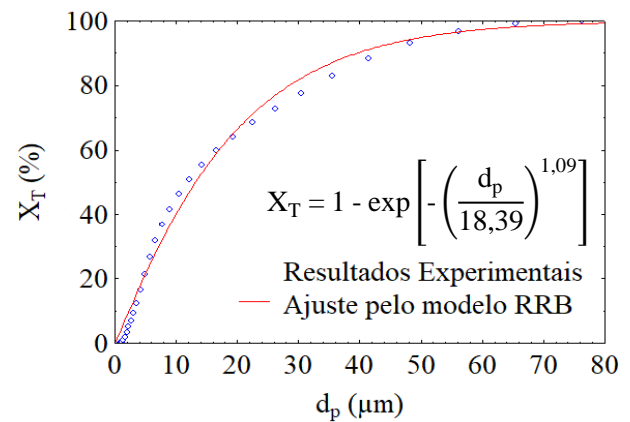


Figura 3: Distribuição granulométrica do material particulado utilizado.

Unidade Experimental e Manufatura do Hidrociclone: A unidade experimental deste trabalho encontrava-se instalada no Laboratório de Separação e Energias Renováveis (LASER) da FEQUI/UFU, bloco 1Z-B 109, e era constituída por um reservatório de 250 L com chicanas e agitador mecânico para homogeneização da suspensão, uma bomba centrífuga que fornecia energia de pressão à linha de alimentação do hidrociclone, um medidor de vazão *Coriolis* e um manômetro de *Bourdon* digital instalado imediatamente à montante do hidrociclone para aferir a queda de pressão do sistema, além de válvulas globo na linha principal e gaveta na linha de *by-pass* para controle da queda de pressão.

A geometria resultante do estudo de otimização proposto neste trabalho foi projetada em um sistema modular, onde as partes eram acopladas por rosqueamento e/ou travas mecânicas. O cilindro do equipamento dutos de *overflow* e alimentação foram fabricados em aço inoxidável, ao passo que o tronco de cone foi feito em latão e o duto de *underflow* em Teflon®. As dimensões características do equipamento concentrador otimizado serão apresentadas na seção de Resultados e Discussão, ao passo que os resultados experimentais deste trabalho utilizando o hidrociclone concentrador otimizado serão comparados com os resultados obtidos por Vieira (2006) utilizando um

hidrociclone de Rietema de mesmo diâmetro de cilindro, ou seja, nas dimensões apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Dimensões características do hidrociclone da família de Rietema. Fonte: Vieira (2006).

Dimensão Característica	Hidrociclone Rietema
D _c (mm)	30,0
D _i (mm)	8,4
D _o (mm)	10,2
L (mm)	150,0
h (mm)	79,0
θ (°)	20,0
ℓ (mm)	12,0
D _u (mm)	5,0

Procedimento Experimental: Os experimentos foram conduzidos em quatro quedas de pressão ($-\Delta P$): 88; 118; 147 e 177 kPa. Os ensaios foram realizados com uma suspensão de alimentação com concentração de 1,0% v/v em sólidos. Pela manipulação das válvulas das linhas de alimentação e *by-pass*, fixava-se a queda de pressão e iniciava-se o experimento com a aferição da temperatura da suspensão no tanque. As vazões mássicas de alimentação eram obtidas pelo medidor eletromagnético e as vazões mássicas de *underflow* eram calculadas pela pesagem de amostras, com o auxílio de um cronômetro.

As concentrações das correntes eram estimadas por técnicas gravimétricas (amostragem e armazenamento em estufa a 105°C por 24 h) e as distribuições granulométricas das correntes eram determinadas pela coleta de alíquotas e posterior análise por difração de raios *laser*. Este procedimento foi repetido para todas as quedas de pressão estudadas e a coleta das amostras foram feitas em triplicatas em todos os experimentos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Superfícies de Resposta

A partir do levantamento dos dados de pesquisas anteriores, foram feitas regressões múltiplas e equações foram ajustadas para as respostas número de Euler (Eu) e diâmetro de corte reduzido (d'_{50}). As superfícies de resposta

para Eu e d'_{50} são apresentadas nas Equações 2 e 3, sendo os coeficientes de determinação (R^2) dos ajustes iguais a 0,987 e 0,835, respectivamente. Nas Equações 2 e 3, X é a matriz das variáveis codificadas, X' é a matriz transposta de X, b_1 é a matriz dos efeitos lineares e B_1 é a matriz dos efeitos quadráticos e cruzados.

$$Eu [-] = 2187 + X' b_1 + X' B_1 X \quad (2)$$

Sendo:

$$X = \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \\ X4 \\ X5 \\ X6 \end{bmatrix}; b_1 = \begin{bmatrix} -1401 \\ -485 \\ -410 \\ -409 \\ +644 \\ -138 \end{bmatrix};$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} +636 & +60 & +129 & +131 & +397 & 0 \\ +60 & +99 & 0 & 0 & -134 & 0 \\ +129 & 0 & 0 & +64 & 0 & +64 \\ +131 & 0 & +64 & 0 & 0 & +72 \\ +397 & -134 & 0 & 0 & -792 & 0 \\ 0 & 0 & +64 & +72 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$d'_{50} [\mu m] = 9,01 + X' b_2 + X' B_2 X \quad (3)$$

Sendo:

$$X = \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \\ X4 \\ X5 \\ X6 \end{bmatrix}; b_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ +1,17 \\ -1,68 \\ 0 \\ -7,38 \\ -1,69 \end{bmatrix};$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -0,32 & -0,86 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +2,06 & +0,77 & 0 & 0 \\ -0,32 & 0 & +0,77 & 0 & +4,14 & 0 \\ -0,86 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Tanto o alto coeficiente de determinação quanto os efeitos lineares e quadráticos apontam para um bom ajuste das equações aos dados catalogados. Em especial, para D_c fixo, observa-se uma forte relação entre Eu e D_i, como também com ℓ. Analisando apenas o efeito linear dessas variáveis sobre a resposta

número de Euler (Equação 2), percebe-se que incrementos no diâmetro de alimentação tendem a reduzir o adimensional em questão, porém ainda existem efeitos de interação entre essa variável e outras estudadas.

O efeito inverso é percebido com a variável comprimento de *vortex finder*: incrementos nessa dimensão acarretam um aumento no consumo energético do equipamento, considerando os hidrociclones do banco de dados. Entretanto, segundo a Equação 3, incrementos em ℓ podem contribuir com a eficiência de separação do equipamento, diminuindo o diâmetro de corte reduzido. Discussões similares podem ser conduzidas para todas as variáveis, considerando os efeitos lineares, quadráticos e de interação.

Ambas as Equações 2 e 3 possibilitaram o estudo de caso de otimização que resultou no Hidrociclone Concentrador Otimizado (HICOT).

Hidrociclone Concentrador Otimizado (HICOT)

Aplicando o Algoritmo de Evolução Diferencial, obteve-se uma configuração ótima, que a princípio minimizaria o número de Euler com restrição ao diâmetro de corte reduzido, provendo ainda uma alta eficiência de separação. A essa geometria foi dado o nome de Hidrociclone Concentrador Otimizado (HICOT) e suas dimensões características são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4: Dimensões características do Hidrociclone Concentrador Otimizado (HICOT).

Dimensão Característica	Hidrociclone Concentrador Otimizado (HICOT)
D_C (mm)	30,0
D_i (mm)	6,3
D_o (mm)	10,5
L (mm)	228,0
h (mm)	114,0
θ (°)	12,5
ℓ (mm)	91,2
D_U (mm)	5,0

Percebe-se que essa nova geometria possui uma altura da parte cilíndrica e um comprimento de *vortex finder* expressivamente

maiores do que a geometria de Rietema. Sabe-se que o tamanho da parte cilíndrica é inversamente proporcional ao gasto energético do equipamento (Vieira, 2006), o que está de acordo com o esperado. Entretanto, o aumento de ℓ pode contribuir para o aumento do número de Euler. Pela superfície de resposta ajustada para d'_{50} (Equação 3), pode-se inferir que a restrição no diâmetro de corte reduzido fez com que o algoritmo de otimização retornasse um maior valor para essa variável, haja vista que aumentos em ℓ impactam positivamente a eficiência de separação. Contudo, tais inferências devem ser postas à prova por meio de ensaios experimentais.

Resultados Experimentais e Comparativos

Como o objetivo da otimização era a minimização do número de Euler, esta foi a primeira resposta a ser analisada. A Figura 4 traz um comparativo entre o HICOT e os dados levantados por Vieira (2006) para o hidrociclone de Rietema com relação a Eu.

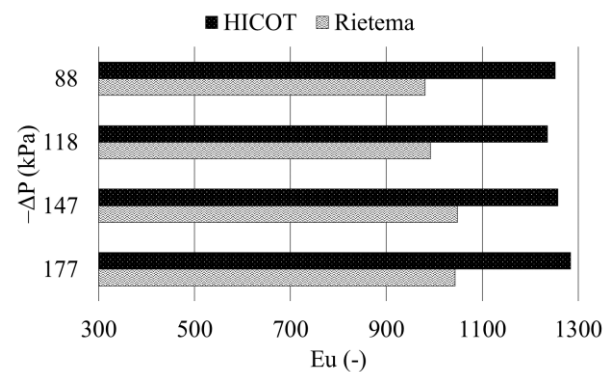


Figura 4: Resultados experimentais do número de Euler (Eu) para o HICOT, em comparação aos resultados de Vieira (2006) para o hidrociclone Rietema.

Pela Figura 4, nota-se que em todas as quedas de pressão o hidrociclone HICOT apresentou um valor de número de Euler maior que a geometria de Rietema, analisando os resultados de Vieira (2006), sem, contudo, ultrapassar o patamar máximo de 1300 para essa resposta. Apesar do maior valor obtido para Eu, o HICOT ainda se situa entre os equipamentos de baixo consumo energético, se comparado a hidrociclones classificadores, que apresentam números de Euler entre 3000 e 7000.

A princípio, poder-se-ia pensar que a otimização via AED não retornou uma geometria viável. Todavia, é necessária uma investigação das outras respostas associadas à hidrociclonagem, como a razão de líquido, cujos resultados comparativos são mostrados na Figura 5.

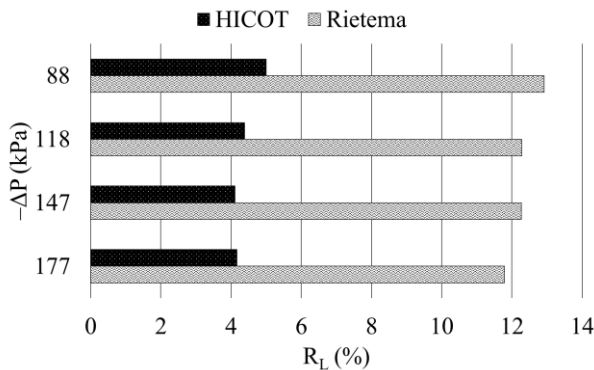


Figura 5: Resultados experimentais da razão de líquido (R_L) para o HICOT, em comparação aos resultados de Vieira (2006) para o hidrociclone Rietema.

Observa-se pela Figura 5 uma expressiva redução de R_L em todas as quedas de pressão quando se emprega a geometria HICOT, em detrimento ao equipamento de Rietema (Vieira, 2006). Uma menor razão de líquido expressa a capacidade concentradora do hidrociclone, uma vez que é definida como a parcela de líquido que entra no separador e sai pela corrente de *underflow*. Os resultados da Figura 5 mostram uma R_L até 3 vezes menor para o hidrociclone concentrador otimizado, o que certamente aumentaria a concentração da corrente de *underflow*. Fato este ratificado pelos resultados mostrados na Figura 6.

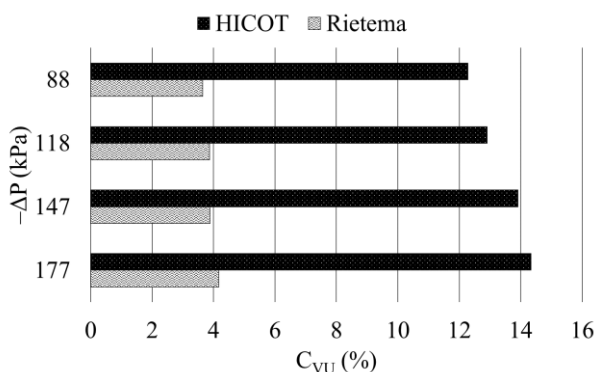


Figura 6: Resultados experimentais da concentração volumétrica de *underflow* (C_{VU}) para o HICOT, em comparação aos resultados de Vieira (2006) para o hidrociclone Rietema.

Pela Figura 6, percebe-se que em uma mesma queda de pressão, a concentração volumétrica da corrente de *underflow* (C_{VU}) é mais do que triplicada quando se emprega o separador HICOT em comparação ao hidrociclone Rietema (Vieira, 2006). Considerando uma corrente de alimentação com concentração de 1,0% em volume, o HICOT foi capaz de concentrar em até 14 vezes a suspensão inicial de sólidos, em contraste à média de 4% de C_{VU} obtidos por Vieira (2006) com a geometria de Rietema.

Como dito anteriormente, o espessamento e a classificação de partículas geralmente são objetivos antagônicos. Uma baixa razão de líquido frequentemente leva a uma perda da eficiência de coleta das partículas. Esse efeito também foi percebido no HICOT, em especial, no diâmetro de corte reduzido (d'_{50}), como mostrado na Figura 7.

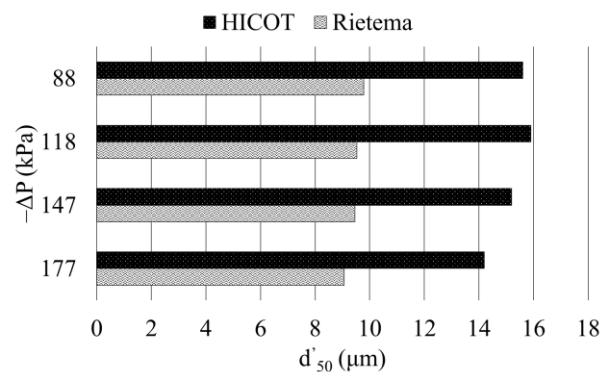


Figura 7: Resultados experimentais do diâmetro de corte reduzido (d'_{50}) para o HICOT, em comparação aos resultados de Vieira (2006) para o hidrociclone Rietema.

Nota-se que a baixa razão de líquido influenciou negativamente o d'_{50} , que foi aumentado para o hidrociclone HICOT, mas ainda apresentando um valor aceitável, dentro do intervalo de restrição inicialmente almejado (aproximadamente 15,0 μm), que promove uma razoável classificação de partículas.

Portanto, os resultados obtidos apontam o grande poder concentrador do equipamento HICOT aliado a um bom poder de separação nas condições estudadas.

CONCLUSÃO

Com o auxílio do Algoritmo de Evolução Diferencial (AED) foi possível estimar relações geométricas ótimas que proporcionaram uma excepcional concentração da corrente de *underflow*, um razoável gasto energético e um diâmetro de corte reduzido dentro dos limites da restrição imposta ao problema. A nova geometria foi chamada de Hidrociclone Otimizado (HICOT).

Comparando-se com os resultados de Vieira (2006) para a geometria Rietema, conclui-se que os ganhos em termos de razão de líquido e concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow* fazem do HICOT uma excelente opção de equipamento espessador com baixos patamares de número de Euler e um satisfatório diâmetro de corte reduzido.

O poder concentrador do HICOT se mostrou, em média, 3 vezes maior do que o hidrociclone de Rietema nas quedas de pressão estudadas, chegando a razões de líquido próximas de 4,0% e concentrações volumétricas de *underflow* de 14,0%. Além disso, os ensaios experimentais com o HICOT constataram um número de Euler menor do que 1300 para a operação com esse equipamento e um d'_{50} de cerca de 15,0 μm .

NOMENCLATURA

B_1	Matriz dos efeitos quadráticos e de interação das variáveis sobre a resposta número de Euler (-)
b_1	Matriz dos efeitos lineares das variáveis sobre a resposta número de Euler (-)
B_2	Matriz dos efeitos quadráticos e de interação das variáveis sobre a resposta diâmetro de corte reduzido (μm)
b_2	Matriz dos efeitos lineares das variáveis sobre a resposta diâmetro de corte reduzido (μm)
C_{VU}	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> (-)
d'_{50}	Diâmetro de corte reduzido (μm)
$d_{63,2}$	Parâmetro ajustado do modelo RRB (μm)

D_C	Diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone (mm)
d_i	Diferença entre os níveis +1,0 e -1,0 da variável genérica i em sua escala original (-)
D_i	Diâmetro do duto de alimentação do hidrociclone (mm)
D_o	Diâmetro do duto de <i>overflow</i> do hidrociclone (mm)
d_p	Diâmetro da partícula (μm)
D_U	Diâmetro do orifício de <i>underflow</i> do hidrociclone (mm)
Eu	Número de Euler (-)
H	Comprimento do tronco de cone do hidrociclone (mm)
h	Comprimento da seção cilíndrica do hidrociclone (mm)
L	Comprimento total do hidrociclone (mm)
ℓ	Comprimento do <i>vortex finder</i> (mm)
R_L	Razão de líquido (-)
X	Matriz das variáveis codificadas na Superfície de Resposta (-)
X'	Matriz transposta das variáveis codificadas na Superfície de Resposta (-)
X_1	Variável diâmetro do duto de alimentação codificada (-)
X_2	Variável diâmetro do duto de <i>overflow</i> codificada (-)
X_3	Variável comprimento total codificada (-)
X_4	Variável ângulo do tronco de cone codificada (-)
X_5	Variável comprimento de <i>vortex finder</i> codificada (-)
X_6	Variável diâmetro do orifício de <i>underflow</i> codificada (-)
X_i	Variável genérica i codificada (-)
X_T	Fração mássica de partículas iguais ou menores do que d_p na corrente de alimentação (-)
$-\Delta P$	Queda de pressão (kPa)
θ	Ângulo do tronco de cone do hidrociclone ($^\circ$)
σ_i	Valor da variável genérica i em sua escala original (-)
$\bar{\sigma}_i$	Média entre os níveis da variável genérica i em sua escala original (-)

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo auxílio financeiro para a execução deste projeto, bem como à FEQUI/UFU, em especial ao LASER, pelo apoio e disponibilização da estrutura necessária para a condução das pesquisas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. A. K. (2008) Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de underflow e no tubo de vortex finder. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UFU, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.
- ARAÚJO, C. A. O.; SCHEID, C. M.; KLEIN, T. S.; LOUREIRO, J. B. R.; MEDRONHO, R. A. (2015) Eficiência de separação de hidrociclones para a separação de mistura óleo-água com alto teor de óleo: comparação entre resultados simulados e experimentais. In: XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP 2015, São Paulo, p. 958-965.
- BOX, M. J.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. (1978) Statistics for Experiments: An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building. 653 p. John Wiley and Sons, New York.
- KYRIAKIDIS, Y. N.; SILVA, D. O.; BARROZO, M. A. S.; VIEIRA, L.G.M. (2018) Effect of variables related to the separation performance of a hydrocyclone with unprecedented geometric relationships. Powder Technology, v. 338, p. 645–653.
- MASSARANI, G. (1989) Projeto e análise do desempenho de ciclones e hidrociclones ii. In: XVII Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos, São Carlos, p. 125-136.
- MYERS, R. H. (1976) Response Surface Methodology. 246 p. Edwards Brothers, Blacksburg, Virginia.
- PRICE, K. V.; STORN, R. M.; LAMPINEN, J. A. (2005) Differential Evolution – A Practical Approach to Global Optimization. 538 p. First Edition. Verlag: Natural Computing Series: Springer.
- SILVA, D. O. (2012) Hidrociclones: Um Estudo de Otimização e Análise do Efeito das Variáveis Geométricas Utilizando Técnicas Experimentais e de CFD. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – UFU, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.
- SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M.; BARROZO, M. A. S. (2015) Optimization of Design and Performance of Solid-Liquid Separators: A Thickener Hydrocyclone. Chemical Engineering & Technology, v. 38, p. 319–326.
- SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M.; LOBATO, F. S.; BARROZO, M. A. S. (2012) Optimization of the design and performance of hydrocyclones by Differential Evolution technique. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, v. 61, p. 1-7.
- SVAROVSKY, L. (1984) Hydrocyclones. 198 p. Eastbourne, UK: Holt, Rinehart & Winston.
- ULLMANN, G.; GONÇALVES, S. M.; KYRIAKIDIS, Y. N.; BARROZO, M. A. S.; VIEIRA, L. G. M. (2021) Optimization study of thickener hydrocyclones. Minerals Engineering, v. 170, p. 107066.
- VIEIRA, L. G. M. (2006) Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes. 297 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - UFU, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.