



CONGRESSO BRASILEIRO
DE ENGENHARIA QUÍMICA EM
INICIAÇÃO CIENTÍFICA

21-24 Julho de 2019
Uberlândia/MG



AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS NA EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DE PARTÍCULAS DE ENXOFRE EM HIDROCICLONES

G. L. D. PEREIRA¹, A. R. IGARASHI, F. N. C. ALMEIDA, D.C. S. MAIA, N. C. PEREIRA

Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Química
ra107321@uem.br¹

RESUMO – O sulfeto de hidrogênio pode ser removido de correntes gasosas, como biogás, por meio do processo de absorção oxidativa com soluções aquosas de Fe/EDTA, produzindo o enxofre elementar. O hidrociclone pode ser empregado para realizar a separação do enxofre da solução de Fe/EDTA. Por este motivo, este trabalho objetiva avaliar a influência dos parâmetros geométricos na eficiência de separação de partículas de enxofre de uma solução aquosa. Utilizando simulações de fluidodinâmica computacional (CFD), variou-se em $\pm 50\%$ os valores dos diâmetros superior e inferior, juntamente com a altura da sessão cilíndrica de um hidrociclone da família Bradley dimensionado previamente. Observou-se que há uma forte correspondência linear entre os diâmetros superior e inferior e a eficiência de separação, enquanto que a altura da sessão cilíndrica não influencia significativamente.

1. INTRODUÇÃO

Hidrociclones são amplamente utilizados nas indústrias ambiental, química e do petróleo, devido as suas vantagens como uma estrutura simples, baixo consumo e grande potencial de aplicação (WEI *et al.*, 2017). Os hidrociclones são formados por peças cilíndricas e cônicas, na qual o movimento linear de um fluido (alimentação) é convertido em um movimento circular. Deste modo, as partículas dispersas no fluido são aceleradas por centrifugação e a sedimentação das partículas aumenta, de acordo com a sua densidade, tamanho e forma. Assim, os sólidos movem-se para baixo e deixam o hidrociclone no fundo (*underflow*). O fluido deixa o hidrociclone no topo (*overflow*) (SRIPRIYA *et al.*, 1997).

Os hidrociclones são agrupados em famílias, possuindo como característica a proporção entre suas medidas geométricas associadas com o diâmetro da seção cilíndrica (D_c). De acordo com Massarani (2002), as famílias mais conhecidas e estudadas são as de Rietema e de Bradley. Pelo fato do comportamento do escoamento do fluido em um hidrociclone ser bastante complexo, existem diversos modelos empíricos propostos para auxiliar no dimensionamento do equipamento. Um modelo utilizado para calcular o diâmetro de corte corrigido do hidrociclones é o modelo proposto por Plitt, sendo que ao longo dos anos foram propostas várias correções.

Uma das maneiras mais empregadas para avaliar os hidrociclones é calculando a sua eficiência de separação, que pode ser melhorada modificando os parâmetros geométricos ou o fluxo característico (MOTSAMAI, 2010). Pinto *et al.* (2008) otimizaram a eficiência de

separação modificando os diâmetros superior e inferior (D_o e D_u respectivamente) usados para a separação de células (diâmetros de 8 a 40 μm), atingindo eficiências acima de 97 %.

No entanto, avaliar experimentalmente mudanças nos parâmetros de projeto do hidrociclone pode tomar tempo demasiado e gerar custos excessivos, com a construção dos hidrociclones. Desta forma, é mais vantajoso simular estas mudanças utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD).

A fluidodinâmica computacional (CFD, “Computational Fluid Dynamics”) é a análise, por meio de métodos computacionais, de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, como reações químicas, através de simulações computacionais (VERSTEEG E MALALASEKERA, 1995). O CFD é uma técnica versátil para estudar o escoamento de fluidos e tem sido amplamente empregada em várias aplicações de engenharia, incluindo na simulação de hidrociclones (VIEIRA *et al.*, 2013). Sendo assim, o trabalho objetiva utilizar a modelagem de CFDs para avaliar a influência dos parâmetros geométricos na eficiência de separação de partículas de enxofre de uma solução aquosa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Características da partícula e solução

O enxofre produzido após o processo de absorção do H_2S foi utilizado como material particulado para o dimensionamento e a simulação do processo de separação. O diâmetro médio foi de $1,093 \pm 0,004 \mu\text{m}$, seguindo uma distribuição normal, determinado por meio do método DLS (*Dynamic Light Scattering*), em um Zetasizer versão 7.10 (Malvern Instruments Ltd).

2.2. Planejamento experimental

Preliminarmente ao estudo deste trabalho, foi dimensionado um hidrociclone baseado no modelo de Bradley, Tabela 1, e em seguida identificado quais variáveis (D_u , D_o , D_i , H_c , H_{vf} , θ , Q) mais influenciavam na eficiência de separação de enxofre e na recuperação de solução de Fe/EDTA, por meio de planejamento fracionário. As variáveis selecionadas foram: diâmetro *underflow* (D_u); diâmetro *overflow* (D_o) e altura da sessão cilíndrica (H_c).

Tabela 1 – Parâmetros geométricos de base

Diâmetro do underflow [D_u (mm)]	13,14
Diâmetro do overflow [D_o (mm)]	2,63
Diâmetro do inlet [D_i (mm)]	1,75
Altura da sessão cilíndrica [H_c (mm)]	28,04
Altura do vortex finder [H_{vf} (mm)]	4,15
Ângulo da sessão cônica [θ (°)]	9
Vazão volumétrica da solução [Q (L/min)]	0,488

Desta forma, neste estudo, um projeto composto central rotativo (DCCR) foi empregado para estudar a influência dos parâmetros de projeto (D_u , D_o e H_c) na eficiência de separação



do enxofre. Os valores do ponto central foram obtidos a partir do dimensionamento de Bradley e dos pontos axiais foram obtidos variando em $\pm 50\%$. Foram projetados e simulados 17 modelos de hidrociclones, com três replicatas no ponto central. Os dados obtidos nas simulações foram analisados pelo software Statistica 7.0. A análise de variância (ANOVA) foi realizada para determinar o coeficiente de regressão (R^2), a significância ($p < 0,05$) do modelo e de todos os termos da equação polinomial. Por fim, foram gerados os gráficos de superfície de resposta para avaliar a influência dos parâmetros na eficiência de separação.

2.3. Simulação

Para avaliar os projetos, os hidrociclones foram construídos e simulados no software ANSYS (versão 19.2, licença estudantil). Para a construção do modelo geométrico foi utilizado o pacote ANSYS SpaceClaim. As malhas cartesianas foram geradas no pacote ANSYS Meshing, empregando uma abordagem Euleriana-Lagrangiana. Para a resolução das equações diferenciais foi usado o Solver do pacote ANSYS Fluent, definindo a água como a fase contínua e partículas de enxofre como a fase discreta. O desempenho dos hidrociclones na simulação foi avaliado com base na eficiência de separação. A eficiência de separação nas simulações (E_f) foi calculada com base no rastreamento Lagrangiano das partículas injetadas no sistema (Vega-Garcia *et al.*, 2018), ou seja, as partículas recuperadas no *underflow* dividido pelo total de partículas injetadas (Equação 1).

$$E_s (\%) = \frac{n^{\circ} \text{ partículas recuperadas}_{\text{underflow}}}{n^{\circ} \text{ partículas injetadas}_{\text{feed}}} \quad (1)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de eficiência da simulação são apresentados na Tabela 2. A eficiência de separação do enxofre variou de 0,00% a 100,00%.

Tabela 2 - Valores obtidos para o planejamento DCCR

Simulação	$D_u(\text{mm})$	$D_o(\text{mm})$	$H_c(\text{mm})$	$E_f(\%)$
1	0,985	1,315	14,02	71,43
2	0,985	1,315	42,06	100
3	0,985	3,945	14,02	11,77
4	0,985	3,945	42,06	1,64
5	2,955	1,315	14,02	100
6	2,955	1,315	42,06	100
7	2,955	3,945	14,02	100
8	2,955	3,945	42,06	100
9	0,313	2,63	28,04	0
10	3,63	2,63	28,04	100
11	1,97	0,418	28,04	100
12	1,97	4,842	28,04	71,45
13	1,97	2,63	4,46	100
14	1,97	2,63	51,62	100
15	1,97	2,63	28,04	75,16
16	1,97	2,63	28,04	75,16
17	1,97	2,63	28,04	75,16



Pode-se notar que os pontos 4 e 9 possuem uma eficiência reduzida, como seus diâmetros de *underflow* são muito pequenos quando comparados com seus diâmetros de *overflow*. Desta forma, grande parte das partículas de enxofre não tem por onde escapar senão pela parte superior, o que leva a uma eficiência reduzida. Pode-se notar também que o ponto 3, mesmo com os mesmos valores de D_u e D_o , obteve uma eficiência consideravelmente maior que o ponto 4. Como o ponto 4 possui um alto valor de H_c , a maior parte das partículas acabam percorrendo distâncias maiores e perdem parte da sua energia cinética, ficando sob a influência da força gravitacional. Desta forma, a concentração de partículas no *underflow* aumenta. O inverso pode ser dito para o ponto 3, pois, com um valor baixo de H_c , não há tanta perda de energia cinética e as componentes verticais conseguem carregar as partículas para mais perto do vortex finder. Consequentemente elas acabarão sendo carregadas pelo *overflow*.

Nota-se também que o ponto 11 possui alta eficiência. O motivo para isto é seu baixo valor de D_o , pois como quase não há uma abertura superior, a maioria das partículas são obrigadas a descer pela parte cilíndrica e sendo arrastadas pelo *underflow*.

Uma análise de regressão foi realizada para avaliar estatisticamente o modelo quadrático desenvolvido. A Tabela 3 mostra a análise de variância (ANOVA) para o modelo desenvolvido. O modelo quadrático gerado foi significativo no ajuste dos dados experimentais dentro do nível de confiança de 95%, com p-valor $<0,0001$ e R^2 de 0,9636.

Tabela 3 - Análise de variância para a eficiência no planejamento DCCR

Fator	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F-valor	p-valor
Du	10789,24	1	10789,24	71,80151	0,000376
Du ²	655,42	1	655,42	4,36176	0,091075
Do	3096,93	1	3096,93	20,60984	0,006170
Do ²	29,56	1	29,56	0,19672	0,675918
Hc	26,38	1	26,38	0,17554	0,692628
Hc ²	320,07	1	320,07	2,13006	0,204254
Du*Do	3099,99	1	3099,99	20,6302	0,006157
Du*Hc	45,03	1	45,03	0,29967	0,607627
Do*Hc	190,32	1	190,32	1,26656	0,311514
Erro puro	751,32	5	150,32		
Soma total	20640,52	14			
Soma dos quadrados					

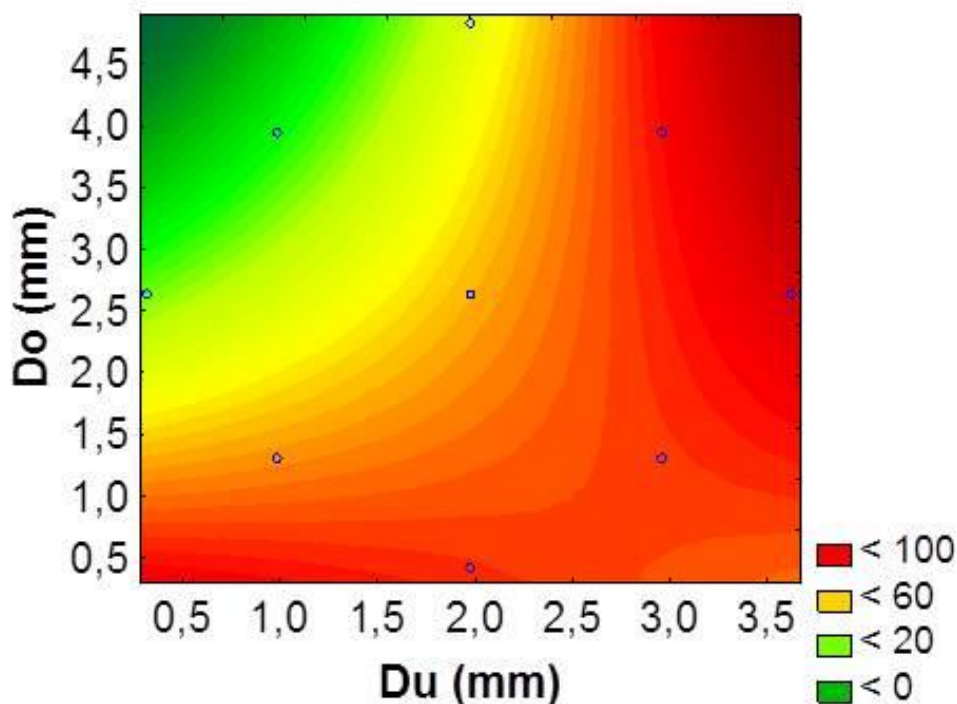
A significância dos termos lineares, quadráticos e de interações em relação à variável resposta (eficiência de separação) é indicada por seus p-valores, apresentados na Tabela 3. Apenas, o termo linear H_c não é estatisticamente significativo (com p-valores maiores que 0,05). Sendo assim, a Figura 1 mostra os efeitos interativos entre D_u e D_o na eficiência de separação de enxofre apresentado na superfície de resposta, enquanto H_c é fixada no nível “0”.

Pode-se perceber que, com a diminuição do diâmetro do *overflow* (D_o), há um aumento da eficiência de separação para partículas finas. Isto ocorre pois, como o diâmetro D_o é menor, evita-se que haja colisão entre a corrente de fluido já residente e aquele que acabou de entrar quando o espaço entre a parede interna do ciclone e a superfície externa do vortex



finder diminui, o que evita refluxo no sistema e o arraste de partículas para o *overflow*, tal como descrito por Wang *et al.* (2008) e Tang *et al.* (2015).

Figura 1 – Curvas de nível para a eficiência de separação



Em contrapartida, a diminuição no diâmetro inferior (D_u) leva a um efeito contrário, isto ocorre, pois em diâmetros muito pequenos há o acúmulo de sólidos na saída, o que faz com que um grande número de partículas comece a transbordar, levando a uma diminuição da eficiência de separação, enquanto que um aumento em D_u causa um aumento também da eficiência. Esta mesma tendência foi registrada nas simulações feitas por Ghodrati *et al.* (2013) e nos relatado por Ni *et al.* (2016). Percebe-se também que há partes destas curvas de nível que ultrapassam 100% de separação e outras que indicam uma separação negativa. Este estudo e as conclusões foram todas baseadas nas áreas onde a eficiência não fosse negativa e não ultrapassasse 100%.

4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a mudança que mais influencia a eficiência de separação de um hidrociclone é uma mudança em D_u , sendo proporcional ao seu aumento. Outra mudança que influenciou significativamente a eficiência de separação foi uma mudança em D_o . Estes dois parâmetros juntos foram responsáveis pela maior parte das modificações na eficiência, enquanto que H_c não influenciou a eficiência em mesmo grau. Para trabalhos futuros que almejam aumentar sua eficiência de separação de particulados com hidrociclones recomenda-se um estudo de variação conjunta dos diâmetros inferior e superior do aparato.

5. REFERÊNCIAS

- GHODRAT, M., KUANG, S.B., YU, A.B., VINCE, A., BARNETT, G.D. AND BARNETT, P.J. (2013). Computational study of the multiphase flow and performance of hydrocyclones: effects of cyclone size and spigot diameter. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 52: 16019–16031.
- MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em sistemas particulados*. Editora E-papers, 1997.
- MOTSAMAI O. S. (2010) Investigation of the Influence of Hydrocyclone Geometric and Flow Parameters on Its Performance Using CFD. *Advances in Mechanical Engineering*. 2.
- NI, L.; TIAN, J.; ZHAO, J. (2016) Experimental study of the effect of underflow pipe diameter on separation performance of a novel defoulant hydrocyclone with continuous underflow and reflux function. *Sep. Purif. Technol.*, 171: 270–279.
- PINTO, R. C. V.; MEDRONHO, R. A.; CASTILHO, L. R. (2008) Separation of CHO cells using hydrocyclones. *Cytotechnology*, 56: 57-67.
- SRIPRIYA, R.; KAULASKAR, M. D.; CHAKRABORTY, S.; MEIKAP, B. C. (1997) Studies on the performance of a hydrocyclone and modeling for flow characterization in presence and absence of air core. *Chemical Engineering Science*, 65, 21-26.
- TANG, B., XU, Y.X., SONG, X.F., SUN, Z. AND YU, J.G. (2015). Numerical study on the relationship between high sharpness and configurations of the vortex finder of a hydrocyclone by central composite design. *Chem. Eng. J.*, 278: 504–516.
- VERSTEEG, H.K., MALALASEKERA, W. “An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method”, Longman Scientific & Technical, Londres, 1995.
- VEGA-GARCIA, D.; BRITO-PARADA, P.R.; CILLIERS, J.J. (2018) Optimising small hydrocyclone design using 3D printing and CFD simulations. *Chemical Engineering Journal*. 350.
- VIEIRA, L. G. M.; SILVA, D. O.; BARROZO, M. A. S. (2013) Study of the Performance of a Novel Hydrocyclone Built in the Configurations of the Classical Families, *Separation Science and Technology*, 48:17, 2700-2706.
- WANG, B.; AND YU, A. B. Numerical study of the gas-liquidsolid flow in hydrocyclones with different configuration of vortex finder. *Chem. Eng. J.*, 135: 33–42, 2008.
- WEI, W.; JIU-YANG, Y.; XIAO-TAO, Z.; XIA, L.; & WEI, L. A New Method for Predicting the Hydrocyclone Efficiency with the Light Dispersed Phase. *Energy Procedia*. 105. 4428-4435, 2017.