



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

G. L. D. PEREIRA<sup>1</sup>, A. R. IGARASHI, F. N. C. ALMEIDA, D.C. S. MAIA, N. C. PEREIRA

Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Química  
ra107321@uem.br<sup>1</sup>

**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  $\mu\text{m}$ ), 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  $\text{H}_2\text{S}$  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 ( $D_u$ ,  $D_o$ ,  $D_i$ ,  $H_c$ ,  $H_{vf}$ ,  $\theta$ ,  $Q$ ) 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 [ $\theta$ ( $^\circ$ )] | 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 Statística 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

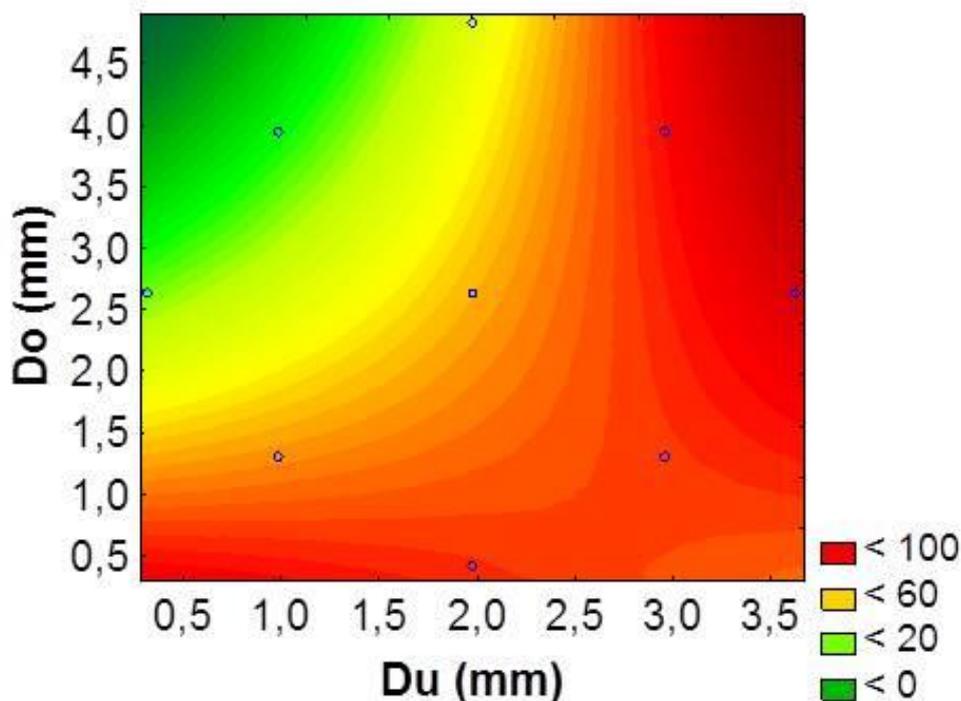
| Fator              | Soma dos quadrados | Graus de liberdade | Quadrados médios | F-valor  | p-valor  |
|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|----------|----------|
| Du                 | 10789,24           | 1                  | 10789,24         | 71,80151 | 0,000376 |
| Du <sup>2</sup>    | 655,42             | 1                  | 655,42           | 4,36176  | 0,091075 |
| Do                 | 3096,93            | 1                  | 3096,93          | 20,60984 | 0,006170 |
| Do <sup>2</sup>    | 29,56              | 1                  | 29,56            | 0,19672  | 0,675918 |
| Hc                 | 26,38              | 1                  | 26,38            | 0,17554  | 0,692628 |
| Hc <sup>2</sup>    | 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.