

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS VARIÁVEIS DE PROJETO E OPERACIONAL NO DESEMPENHO DE UM HIDROCICLONE CONCENTRADOR

A. R. IGARASHI¹, G. L. D. PEREIRA¹, F. N. C. ALMEIDA¹, D. C. S. MAIA¹ e N. C. PEREIRA¹

¹Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: ra102612@uem.br

RESUMO – Hidrociclones são equipamentos que podem ser empregados com o intuito de classificar partículas ou de concentrar uma das correntes que saem do equipamento. A eficiência de separação de partículas e a recuperação de fluido pode ser melhorada modificando os parâmetros geométricos ou o fluxo característico. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo identificar os parâmetros geométricos de um hidrociclone que mais influenciam na recuperação de fluido através do seu *overflow*. Os hidrociclone foram projetados de acordo com um planejamento fatorial fracionário 2^{3-1}_{III} e simulados via CFD. No estudo foram avaliados a influência do diâmetro do *overflow* ou diâmetro do *vortex finder* (D_o), o diâmetro do *underflow* (D_u), a altura da região cilíndrica do hidrociclone (H_c), a altura do *vortex finder* (H_{vf}), a vazão de alimentação do hidrociclone (Q_f) e o ângulo de abertura da seção cônica (θ). Dos seis parâmetros apresentados, os fatores que mais influenciaram significativamente na recuperação de fluido foram D_u seguido de D_o . O diâmetro do *underflow* influenciou negativamente e o diâmetro do *overflow* influenciou positivamente na recuperação de solução.

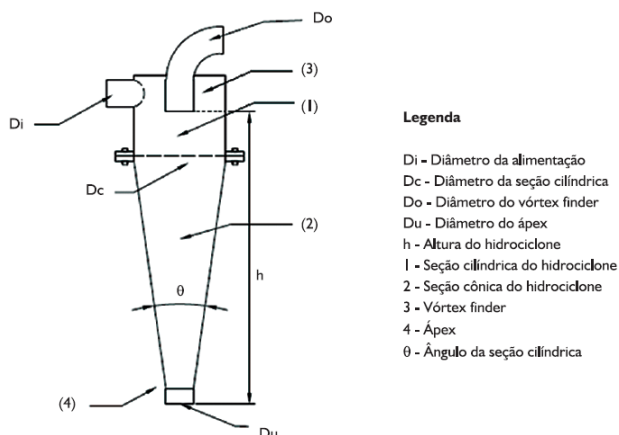
1. INTRODUÇÃO

Hidrociclones fazem parte de um grupo de dispositivos de classificação de sólidos e líquidos, compostos por uma construção simples, ausente de qualquer peça móvel. Tais estruturas realizam a separação de matéria dispersa em uma corrente de fluido, sendo amplamente utilizados por permitirem a obtenção de uma alta eficiência de separação, além de fornecerem vantagens, como estrutura simples, baixo custo e consumo de energia, grande capacidade de carga em pequeno volume, além de necessitarem de pouca manutenção e módulos de suporte Sripriya *et al.* (2007).

Em hidrociclones convencionais, compostos por uma estrutura cilíndrica e cônica, como apresentado na Figura 1, observa-se a presença de duas saídas, cada uma posicionada em um mesmo eixo, mas opostas uma a outra. A primeira se encontra na porção superior do ciclone, sendo caracterizada por um tubo interno, o *vortex finder*, que conecta o interior do cilindro com a porção externa, esta saída é também denominada *overflow*. Enquanto a segunda saída se encontra na porção inferior da estrutura, denominada também como *underflow*.



Figura 1 – Representação da estrutura de um hidrociclone.



Fonte: Silva *et al.* (2012).

Em seu funcionamento, o equipamento converte o movimento linear proveniente do fluido quando acaba de passar pela entrada do hidrociclone, em um movimento angular que varia continuamente, desse modo, ocorre a exposição das partículas dispersas no líquido à uma aceleração centrífuga, melhorando a taxa de sedimentação dos sólidos que se organizam dentro da estrutura do ciclone de acordo com sua diferença de tamanho, densidade e formato.

Os hidrociclones podem ser empregados com o intuito de classificar partículas ou de concentrar uma das correntes que saem do equipamento. Para um hidrociclone com relações geométricas específicas (D_u/D_c , D_o/D_c , H_{vf}/D_c , H_c/D_c e θ), mudanças aleatórias destes parâmetros podem melhorar, manter ou piorar o desempenho do dispositivo base (Kyriakidis *et al.*, 2018). Por este motivo, o estudo destes acessórios torna-se essencial e necessário para a caracterização adequada de qualquer novo hidrociclone. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo identificar a influência dos parâmetros geométricos diâmetro inferior (D_u), diâmetro superior (D_o), altura do *vortex finder* (H_{vf}), altura da seção cilíndrica (H_c), vazão de entrada (Q_f) e o ângulo de abertura (θ) de um hidrociclone na recuperação de fluido através do seu *overflow*. Os projetos de hidrociclones foram construídos baseados em um planejamento fatorial fracionário, e simulados via CFD.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Sistema de partículas e solução

O material particulado utilizado para a simulação foi o enxofre elementar, com densidade $1,960 \text{ g/cm}^3$ (Maia, 2015) e diâmetro médio de $1,093 \pm 0,004 \text{ }\mu\text{m}$ (método DLS). A solução utilizada foi de FeEDTA, com densidade igual a $1,156 \text{ g/cm}^3$ (Maia, 2015). A viscosidade da suspensão foi considerada igual a $1,0 \text{ cP}$, pelo fato da concentração de material partícula ser de $0,3 \text{ \%}$ em base mássica.

2.2. Planejamento experimental

Com o objetivo de identificar quais os fatores que tem influência significativa na recuperação de fluido, os hidrociclones foram projetados de acordo com um planejamento

fatorial fracionado 2_{III}^{3-1} , com resolução do tipo III. Nesse tipo de resolução, os efeitos principais não são relacionados com nenhum outro efeito principal, assumindo-se que as interações de ordem 2 ou superiores são desprezíveis com base no princípio da dispersão de efeitos.

Foram projetados 8 hidrociclones, variando os seguintes fatores: diâmetro do *overflow* (1,32 – 3,95 mm), diâmetro do *underflow* (0,99 – 2,96 mm), a altura da parte cilíndrica (14,02 – 42,06 mm), a altura do *vortex finder* (2,17 – 6,51), vazão de alimentação (244 – 732 mL/min) e ângulo do cone (4,5 – 13,5). Os valores dos níveis, baixo (-1) e alto (+1), foram obtidos variando em $\pm 50\%$ a partir do dimensionamento da geometria pertencente à família Bradley, determinado em estudos preliminares. O software Design-Expert (V. 7.0.0) foi utilizado para a implementação e avaliação do design 2_{III}^{3-1} . As médias foram comparadas por ANOVA-fatorial. O nível de significância foi estabelecido em $\alpha = 0,05$.

2.4 Simulação e recuperação de solução

Para avaliar a recuperação de solução, 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 sistema foi resolvido usando o modelo de estresse Reynolds com um solver baseado em pressão e o método semi-implícito para pressão-ligado, algoritmo de equações (SIMPLES) para o par pressão-velocidade Vega-Garcia *et al.* (2018).

O gradiente usado na resolução foi o baseado nos últimos quadrados, juntamente com as equações de segunda ordem de pressão e momento linear. Neste sistema de equações também se utilizou as equações do modelo viscoso *k-omega* configuradas para o método *power rule*.

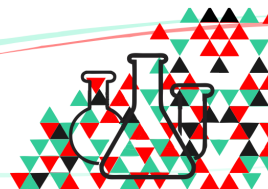
O desempenho dos hidrociclones na simulação foi avaliado com base na recuperação de solução, que é dado como a razão existente entre a vazão de suspensão que sai no *overflow* (Q_o) e a vazão alimentada (Q_f) no sistema (Equação 1). Quando o objetivo do hidrociclone é o espessamento, ou seja, a separação do líquido da fase sólida a variável resposta recuperação de solução deve ser avaliada.

$$R = \frac{Q_o}{Q_f} \quad (1)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados obtidos por meio das simulações para a realização do planejamento fatorial para a recuperação de solução estão expostos na Tabela 1. A recuperação de solução no *overflow* variou de 11,08% a 99,00%. Este grande intervalo entre as respostas estudadas indica que os fatores estudados e seus respectivos níveis foram escolhidos com sucesso.

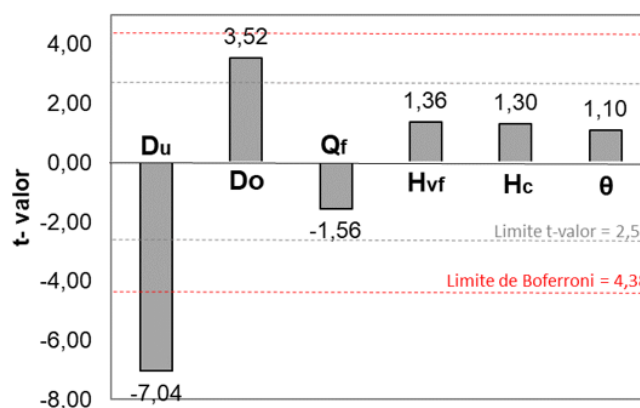
Tabela 1 - Valores obtidos para o planejamento fatorial.



| Projeto | D _u (mm) | D _o (mm) | Q _f (mL/min) | θ (°) | H _{vf} (mm) | H _c (mm) | Recuperação (%) |
|---------|------------------------|------------------------|----------------------------|----------|-------------------------|------------------------|--------------------|
| 1 | 0.985 | 1.315 | 244 | 13.5 | 6.51 | 42.06 | 92,15 |
| 2 | 2.955 | 1.315 | 244 | 4.5 | 2.17 | 42.06 | 12,46 |
| 3 | 0.985 | 3.945 | 244 | 4.5 | 6.51 | 14.02 | 99,00 |
| 4 | 2.955 | 3.945 | 244 | 13.5 | 2.17 | 14.02 | 47,96 |
| 5 | 0.985 | 1.315 | 732 | 13.5 | 2.17 | 14.02 | 58,27 |
| 6 | 2.955 | 1.315 | 732 | 4.5 | 6.51 | 14.02 | 11,08 |
| 7 | 0.985 | 3.945 | 732 | 4.5 | 2.17 | 42.06 | 97,26 |
| 8 | 2.955 | 3.945 | 732 | 13.5 | 6.51 | 42.06 | 46,81 |

A Figura 2 ilustra a contribuição dos efeitos principais na variável resposta. Os efeitos que se encontram acima do limite de Bonferroni, para um nível de significância de 5%, são, certamente, significativos e os que se encontram abaixo do limite do t-valor certamente são não significativos. Desta forma, as variáveis de projeto D_u e D_o mostraram-se as que mais influenciaram no processo de recuperação de solução do hidrociclone.

Figura 2 – Efeitos estimados de parâmetros na recuperação de fluido de um hidrociclone, usando um delineamento fracionado 2^{3-1}_{III} .



Observa-se na Figura 2, que o diâmetro do *underflow* (D_u) mostrou-se ser a variável que mais pesou negativamente na recuperação. O que está em conformidade com Kyriakidis *et al.* (2018), que divulgam que a diminuição no valor do diâmetro de saída inferior aumenta a restrição de fluxo para a saída inferior, ao mesmo tempo em que aumenta a velocidade axial de fluido para cima, sendo uma maior quantidade de fluido descarregada pela saída superior.

O diâmetro do overflow (D_o) foi o fator que mais afetou positivamente a recuperação, estando de acordo com o proposto por Ahmed *et al.* (2007), segundo os quais o aumento no diâmetro do *vortex finder* aumenta o diâmetro da coluna de ar, o que resulta num acréscimo do volume de fluido destinado à saída superior.

Apesar das demais variáveis não terem apresentado efeito significativo na variável resposta (recuperação), o efeito de suas variáveis apresenta-se de acordo com a literatura. A vazão de entrada (Q_v) relaciona-se diretamente com a recuperação. Segundo Jiang *et al.* (2018), tem-se que, com o aumento da vazão de fluido na entrada, há o consequente aumento na velocidade axial do vórtice interno no ciclone, o que resulta em uma maior vazão de fluido sendo descarregada através da saída superior da estrutura, levando a uma maior recuperação de solução.

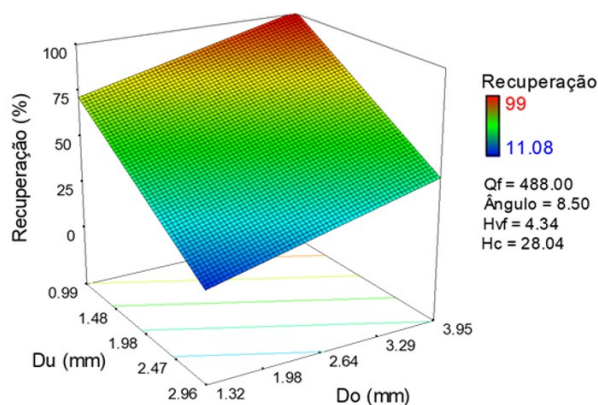
O ângulo de abertura do cone (θ) interfere positivamente na recuperação, o que está de acordo com o que fora proposto por Wang *et al.* (2006), segundo os quais, um aumento no valor do ângulo, acarreta em um volume de diminuto se encaminhando para a saída inferior e uma menor razão de fluxo de fluido. Tal efeito é observado pois há a um crescimento do diâmetro da coluna de ar no interior do ciclone.

A altura do *vortex finder* (H_{vf}) favorece a recuperação de fluido, assim como relatado por Tang *et al.* (2015), no qual, segundo estes, com o crescimento no valor da altura do *vortex finder* a velocidade axial se dirigindo em direção à saída superior aumentava, resultando em uma maior quantidade de fluido seguindo este movimento forçado.

A altura da seção cilíndrica (H_c) interfere de forma direta na recuperação de solução, assim como proposto por Wang *et al.* (2006), onde fora afirmado que, com o acréscimo da altura da seção cilíndrica tem-se uma diminuição na queda de pressão, fazendo com que haja uma menor razão entre a quantidade de fluido liberada pela saída inferior com a descarregada pela saída superior.

Após cada resposta ser analisada individualmente, um modelo linear simples foi proposto, empregando apenas as variáveis significativas (D_u e D_o). A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para avaliar a adequação do modelo, apresentando R^2 igual a 92,60% e p-valor (0,0015) menor que 0,05, indicando que o modelo é significativo. O gráfico da superfície de resposta (Figura 3) foi desenhado variando as duas variáveis nos limites das condições estudadas, mantendo as demais constantes.

Figura 3 - Perfil de superfície para recuperação de fluido no *overflow* em função do diâmetro do *underflow* e *overflow*



A Figura 3 ilustra os efeitos de D_u e D_o na recuperação de solução no hidrociclone. O gráfico mostra que em baixo nível de D_u e em alto nível de D_o é possível obter a máxima recuperação de solução (100%). No entanto, tecnicamente esta condição não é favorável para o processo de separação empregando um hidrociclone. Uma vez que, quando se tem uma recuperação de 100%, significa que toda a solução que entrou, saiu pelo *overflow*, impedindo que ocorra uma separação do sólido-fluido. Sendo assim, é necessária uma avaliação da variável resposta eficiência de separação em conjunto com a variável recuperação, para que seja possível determinar uma região ótima para o dimensionamento do hidrociclone.

5. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, teve-se que fatores que mais afetaram a variável resposta estudada foram D_u , que influenciou na recuperação de forma negativa, e D_o que a impactou de forma positiva. Enquanto que as demais variáveis, como H_{fv} , embora tenham influenciado na recuperação, fizeram de forma bem menos acentuada. O hidrociclone 3 fora aquele que apresentou o melhor valor de recuperação. Sugere-se em trabalhos futuros otimizar o dimensionamento do hidrociclone avaliando as variáveis repostas recuperação de solução e eficiência de separação simultaneamente.

4. REFERÊNCIA

- AHMED, M. M.; IBRAHIM, G. A.; FARGHALY, M. G. Performance of three-product hydrocyclone Part II: Distribution of water recovery in the three product hydrocyclone. *Journal of Eng. Sci.*, Vol 35, p. 815-828, 2007.
- JIANG, J.; YING, R.; FENG, J.; WANG, W. Computational and Experimental Study of the Effect of Operating Parameters on Classification Performance of Compound Hydrocyclone. *Math. Probl. in Eng.*, p.1-16, 2018.
- KYRIADIKIS, Y. N.; SILVA, D. O.; BARROZO, M. A. S.; VIEIRA, L. G. M. Effect of variables related to the separation performance of a hydrocyclone with unprecedented geometric relationships. *Powd. Technol.*, Vol 338, p. 645-653, 2018.
- MAIA, D. C. S. Desenvolvimento de um processo de purificação de biogás para uso energético. Tese, PEQ, Universidade Estadual de Maringá, Brasil, 2015.
- SILVA, A. C.; SILVA, E. S.; MATOS, J. Modelo Empírico para Cálculo do Diâmetro de Corte Corrigido de Hidrociclones. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, Vol. 9, p. 302-308, 2012.
- SRIPRIYA, R.; KAULASKAR, M. D.; CHAKRABORTY, S.; MEIKAP, B. C. Studies on the performance of a hydrocyclone and modeling for flow characterization in presence and absence of air core. *Chem. Eng. Sci.*, Vol 62, p. 6391-6402, 2007.
- TANG, B.; XU, Y.; SONG, X.; SUN, Z.; YU, J. Numerical study on the relationship between high sharpness and configurations of the vortex finder of a hydrocyclone by central composite design. *Chem. Eng. Journal.*, Vol 278, p. 504-516, 2015.
- VEGA-GARCIA, D.; BRITO-PARADA, P. R.; CILLIERS, J. J. Optimising small hydrocyclone design using 3D printing and CFD simulations. *Chem. Eng. Journal.*, Vol 350, p. 653-659, 2018.
- WANG, B.; YU, A.B. Numerial study of particle-fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions. *Mine. Eng.*, Vol 19, p. 1022-1033, 2006.