



# ANÁLISE DA CAPACIDADE OPERACIONAL E RAZÃO DE LÍQUIDO EM MINI-HIDROCICLONES MODULARES

M. V. PAIVA<sup>1</sup>, D. B. QUINTINO<sup>1</sup>, J. T. T. SILVA<sup>1</sup> e C. H. ATAÍDE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química  
E-mail para contato: davi\_quintino88@hotmail.com

**RESUMO** – O hidrociclone é aplicado em uma gama de indústrias que envolvem o processo de separação. Mesmo sendo de simples configuração, o equipamento possui escoamento interno altamente complexo, sendo significativamente influenciado por suas dimensões e condições operacionais. Nesse cenário, o presente trabalho teve por objetivo, analisar a capacidade de processamento e razão de líquido em mini-hidrociclones operando com água, mediante a variação da pressão de entrada e dos módulos de *underflow* e região cônica. Para isso, variou-se a pressão de 40,0 a 90,0 psi, o diâmetro de *underflow* de 4,0 a 6,0 mm e a angulação da região cônica de 6,0° a 10,0°. Foi observada uma variação de 1,706 a 2,754 m<sup>3</sup>/h na capacidade e de 3,99% a 23,37% na razão de líquido, para a faixa estudada.

## 1. INTRODUÇÃO

Hidrociclones ou ciclones hidráulicos, são ciclones desenvolvidos especialmente para líquidos em meados de 1940 que são amplamente utilizados para clarificação, classificação por tamanho de partícula, deslamagem, espessamento, desgaseificação de líquidos, flotação e separação de dois líquidos imiscíveis (Wills; Napier-Munn, 2006), com ampla aplicação na engenharia mineral. Trata-se de um equipamento com muitas vantagens tais como versatilidade, simplicidade na estrutura, tamanho, baixo consumo de energia e custo com manutenção se comparado a equipamentos com finalidades similares como centrífugas, filtros e membranas (Chu *et al.*, 2002). Além disso, as forças cisalhantes dentro do equipamento impedem a formação de aglomerados, um aspecto importante na classificação de sólidos. (Svarovsky, 2000).

O princípio básico de separação consiste na sedimentação centrífuga, ou seja, as partículas suspensas são sujeitas a uma aceleração centrífuga, que as separa do fluido. Diferentemente das centrífugas, os ciclones não apresentam partes móveis e o *vortex* necessário para separação é formado pelo próprio fluido (Svarovsky, 2000).

O corpo do equipamento é constituído basicamente por uma seção cilíndrica superior associado a um corpo cônico inferior (Delfos *et al.*, 2004). Mesmo sendo de simples configuração, o hidrociclone possui escoamento interno altamente complexo, sendo significativamente influenciado por suas dimensões (Bicalho, 2011). Sendo assim, o presente trabalho, teve por objetivo, avaliar as respostas razão de líquido (*RL*) e capacidade de processamento (*Q*) mediante variação das dimensões de angulação da região cônica e diâmetro de *underflow* em um hidrociclone operando somente com água.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os equipamentos da unidade experimental estão no Laboratório de Hidrociclonagem, na Unidade de Pesquisa da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU). A unidade consistia em um sistema de aquisição de dados, constituído por um computador e uma placa de aquisição de dados (NATIONAL INSTRUMENTS), um inversor de frequência (WEG, CFW700) utilizado no controle de rotação da bomba, um *display* de vazão mássica (METROVAL), um agitador mecânico (METAL CORTE, B80A4), uma bomba helicoidal de 3 CV, hidrociclones modulares, um tanque de aço inoxidável, manômetro digital indicador de pressão, um sensor de medição de vazão mássica do tipo Coriolis e um inversor de frequência acoplado ao sistema de agitação (WEG, CFW08).

Os hidrociclones utilizados neste estudo, foram do tipo modular, que possibilitavam a variação de suas proporções. Neste estudo, além da variável operacional pressão de entrada ( $P$ ), duas variáveis geométricas foram alteradas, o diâmetro da corrente de *underflow* ( $D_u$ ) e a angulação da região cônica, representada pela variável ( $\theta$ ). As respostas analisadas foram capacidade de processamento ( $Q$ ) e a razão de líquido ( $RL$ ), mostradas nas Equações 1 e 2, respectivamente. Nas equações,  $W_a$  representa a taxa mássica da alimentação (kg/h),  $W_u$  a taxa mássica da corrente de *underflow* (kg/h), e  $\rho$  a densidade do fluido (kg/m<sup>3</sup>).

$$Q = \frac{W_a}{\rho} \quad (1)$$

$$RL = \frac{W_u}{W_a} \quad (2)$$

Cada uma das três variáveis foi estudada em três níveis e são apresentadas na Tabela 1. As principais razões geométricas do separador são apresentadas na Tabela 2, em que,  $D_c$  é o diâmetro da região cilíndrica,  $D_o$  o diâmetro de *overflow* e  $L_c$  a altura da módulo cilíndrico. A seção de entrada do separador era do tipo retangular, com 9,00 x 6,00mm.

Tabela 1 – Níveis das variáveis estudadas.

| Nível | $P$ (psi) | $D_u$ (mm) | $\theta$ (°) |
|-------|-----------|------------|--------------|
| -1    | 40,0      | 4,0        | 6,0          |
| 0     | 65,0      | 5,0        | 8,0          |
| 1     | 90,0      | 6,0        | 10,0         |

Tabela 2 – Principais razões geométricas do hidrociclone.

| Nível | $D_o/D_c$ | $D_u/D_c$ | $L_c/D_c$ |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| -1    | 0,33      | 0,13      | 1,06      |
| 0     | 0,33      | 0,17      | 1,06      |
| 1     | 0,33      | 0,20      | 1,06      |

## 2.1. Procedimento Experimental

Os experimentos foram realizados após o preenchimento do tanque de alimentação com água e montagem da respectiva configuração de hidrociclone. Dados de temperatura da água foram obtidos por um termômetro acoplado ao tanque de alimentação. Iniciava-se a coleta de amostras após o sistema atingir o estado estacionário. Para determinar as taxas mássicas das correntes de *overflow* e *underflow*, amostras em triplicata eram coletadas de forma cronometrada. A taxa de alimentação foi obtida por meio da aquisição de dados, coletados pelo sensor Coriolis instalado na corrente de alimentação do hidrociclone.

## 3. RESULTADOS

A Tabela 3, exibe o valor das variáveis e os resultados obtidos para capacidade de processamento e razão de líquido nos 27 experimentos. A resposta razão de líquido variou de 3,99 a 23,37%, com valor médio de 10,8%. Já a capacidade de processamento, alcançou valor médio de 2169 m<sup>3</sup>/h, variando de 1706,4 a 2754,3 m<sup>3</sup>/h.

Tabela 3 – Razão de líquido (*RL*) e capacidade operacional (*Q*) obtidos nos 27 experimentos.

| Exp.        | <i>P</i> (psi) | $\theta$ (°) | <i>Du</i> (mm) | <i>RL</i> (%) | <i>Q</i> (m <sup>3</sup> /h) |
|-------------|----------------|--------------|----------------|---------------|------------------------------|
| 1           | 40,0           | 6,0          | 4,0            | 6,78          | 1,712                        |
| 2           | 40,0           | 6,0          | 5,0            | 10,43         | 1,767                        |
| 3           | 40,0           | 6,0          | 6,0            | 17,09         | 1,920                        |
| 4           | 40,0           | 8,0          | 4,0            | 5,41          | 1,757                        |
| 5           | 40,0           | 8,0          | 5,0            | 9,87          | 1,808                        |
| 6           | 40,0           | 8,0          | 6,0            | 17,95         | 1,782                        |
| 7           | 40,0           | 10,0         | 4,0            | 4,84          | 1,740                        |
| 8           | 40,0           | 10,0         | 5,0            | 8,57          | 1,718                        |
| 9           | 40,0           | 10,0         | 6,0            | 14,71         | 1,706                        |
| 10          | 65,0           | 6,0          | 4,0            | 6,24          | 2,121                        |
| 11          | 65,0           | 6,0          | 5,0            | 9,46          | 2,199                        |
| 12          | 65,0           | 6,0          | 6,0            | 16,09         | 2,377                        |
| 13          | 65,0           | 8,0          | 4,0            | 4,82          | 2,170                        |
| Continua... |                |              |                |               |                              |

| Exp. | <i>P</i> (psi) | $\theta$ (°) | <i>Du</i> (mm) | <i>RL</i> (%) | <i>Q</i> (m <sup>3</sup> /h) |
|------|----------------|--------------|----------------|---------------|------------------------------|
| 14   | 65,0           | 8,0          | 5,0            | 9,18          | 2,243                        |
| 15   | 65,0           | 8,0          | 6,0            | 23,37         | 2,207                        |
| 16   | 65,0           | 10,0         | 4,0            | 4,38          | 2,156                        |
| 17   | 65,0           | 10,0         | 5,0            | 8,11          | 2,136                        |
| 18   | 65,0           | 10,0         | 6,0            | 13,77         | 2,123                        |
| 19   | 90,0           | 6,0          | 4,0            | 5,86          | 2,480                        |
| 20   | 90,0           | 6,0          | 5,0            | 9,00          | 2,567                        |
| 21   | 90,0           | 6,0          | 6,0            | 15,51         | 2,754                        |
| 22   | 90,0           | 8,0          | 4,0            | 4,53          | 2,524                        |
| 23   | 90,0           | 8,0          | 5,0            | 17,02         | 2,589                        |
| 24   | 90,0           | 8,0          | 6,0            | 23,15         | 2,560                        |
| 25   | 90,0           | 10,0         | 4,0            | 3,99          | 2,493                        |
| 26   | 90,0           | 10,0         | 5,0            | 7,60          | 2,478                        |
| 27   | 90,0           | 10,0         | 6,0            | 13,77         | 2,461                        |

Os dados obtidos experimentalmente foram avaliados com o auxílio do software STATISTICA® que permitiu a obtenção de correlações empíricas para a razão de líquido e capacidade de processamento.

### 3.1. Razão de Líquido

O tratamento estatístico dos dados de razão de líquido permitiu a obtenção de uma correlação empírica das variáveis independentes selecionadas, mostrada na Equação 3. A equação apresenta apenas os parâmetros que influenciaram significativamente a resposta com 95% de confiança. Nesta equação,  $x_{Du}$  e  $x_{\theta}$  referem-se as variáveis codificadas para diâmetro de *underflow* e angulação da região cônica, respetivamente. O coeficiente de correlação quadrático ( $R^2$ ) obtido foi de 0,842.

$$RL = 10,796 + 6,031x_{Du} + 1,511x_{\theta}^2 \quad (3)$$



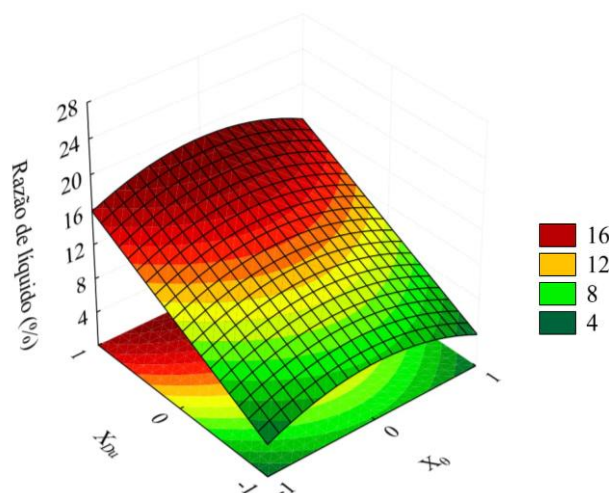
Pode-se observar que a resposta razão de líquido foi positivamente influenciada pelo diâmetro do *underflow* e pela angulação da região cônica, em função da diminuição das restrições aplicadas ao fluxo descendente dentro do hidrociclone.

Além disso, nota-se ausência do efeito de pressão sobre a razão de líquido. Quando o *underflow* está aberto a atmosfera, a razão de líquido aumenta gradualmente com o aumento da pressão e da entrada de ar, até que a amplitude da variação seja cada vez menor e eventualmente, a razão de líquido torne-se estável (Ma *et al.*, 2013). Assim, pode-se concluir que a menor pressão utilizada no planejamento foi muito elevada.

Tendo em vista que, o presente estudo trata-se de uma avaliação preliminar da unidade experimental para posteriores testes de concentração de sólidos, nota-se que a menor razão de líquido e consequentemente, correntes de *underflow* mais concentradas ocorrem para o menor diâmetro de *underflow* e ângulo de cone.

Para melhor ilustrar o efeito das variáveis estudadas, é apresentada a seguir, a superfície de resposta. Na Figura 2 é possível observar o efeito das variáveis diâmetro de *underflow* ( $x_{Du}$ ) e angulação da região cônica ( $x_{\theta}$ ) sobre a razão de líquido, enquanto a variável pressão foi considerada em seu nível central.

Figura 2 – Superfície de resposta da razão de líquido em função de  $x_{Du}$  e  $x_{\theta}$ .



### 3.2. Capacidade de processamento

O tratamento estatístico dos dados de capacidade do hidrociclone permitiu a obtenção de uma correlação empírica das variáveis independentes selecionadas, mostrada na Equação 4. A equação apresenta apenas os parâmetros que influenciaram significativamente a resposta com 95% de confiança. Nesta equação,  $x_{Du}$ ,  $x_{\theta}$  e  $x_P$  referem-se as variáveis codificadas para diâmetro de *underflow*, angulação da região cônica e pressão de alimentação, respectivamente. O coeficiente de correlação quadrático ( $R^2$ ) obtido foi de 0,991.

$$Q = 2,168 + 0,388x_P + 0,018x_P^2 - 0,049x_{\theta} + 0,041x_{Du} - 0,069x_{\theta}x_{Du} \quad (4)$$

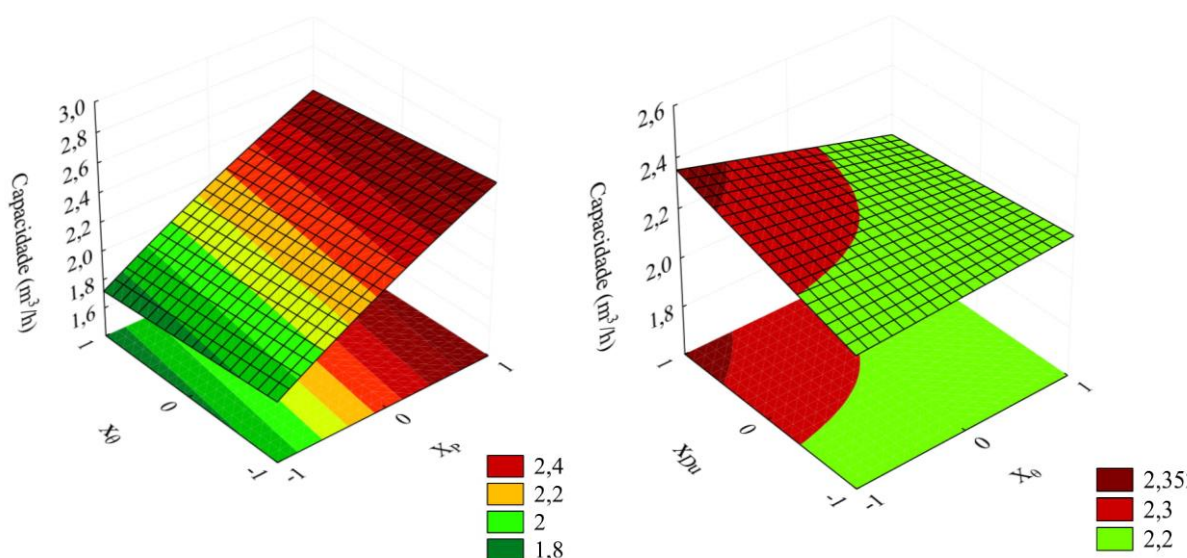
Observa-se que o diâmetro de *underflow* apresentou efeito positivo sobre a capacidade, pois acarretou na diminuição das restrições ao fluxo no hidrociclone. Além disso, observa-se efeito inversamente proporcional do ângulo de cone sobre a capacidade, ou seja, um aumento no ângulo de cone levou a diminuição da capacidade do hidrociclone. Isso ocorre, pois ao manter-se todas as outras variáveis geométricas em um valor fixo, um aumento em  $\theta$  implica na diminuição do comprimento total e consequentemente, do volume do hidrociclone.

Já a pressão, é a variável de maior efeito sobre a capacidade. O incremento de pressão levou ao aumento na vazão de alimentação, e consequentemente, ao aumento simultâneo das vazões de *overflow* e *underflow*. Tal comportamento já era esperado, tendo em vista que a pressão de alimentação consiste na força motriz responsável pelo escoamento dentro do hidrociclone. Na Equação 4 também é possível observar um efeito de interação entre as variáveis angulação da região cônica e diâmetro de *underflow*.

Geralmente, procura-se trabalhar com elevadas capacidades de processamento, por acarretar em uma maior quantidade de polpa processada por unidade de tempo. Contudo, nota-se que existe uma divergência entre os fatores que minimizam a razão de líquido e maximizam a capacidade, sendo necessário balanceá-los em função da separação a ser realizada.

Para melhor ilustrar o efeito das variáveis estudadas, é apresentada a seguir, a superfície de resposta. Na Figura 3 é possível observar o efeito das variáveis diâmetro de *underflow* ( $D_u$ ), angulação da região cônica ( $\theta$ ) e pressão sobre a capacidade de processamento do equipamento.

Figura 3 – Superfícies de resposta para capacidade em função de  $x_{Du}$ ,  $x_\theta$  e  $x_P$ .



## 4. CONCLUSÃO

A capacidade de processamento foi positivamente influenciada pela diminuição da angulação da região cônica e aumento das variáveis diâmetro de *underflow* e pressão. A





pressão foi considerada o parâmetro de maior influência sobre a capacidade de processamento do hidrociclone.

A razão de líquido foi positivamente influenciada pelo pelo diâmetro de *underflow* enquanto a variável angulação da região cônica apresentou efeito quadrático positivo. O diâmetro de *underflow* mostrou-se como a variável de maior influência, em vista da redução das restrições aplicadas ao fluxo descendente. Além disso, a razão de líquido variou de 3,99 a 23,37% na faixa estudada.

## 5. REFERÊNCIAS

- BICALHO, I. C. Concentração de leveduras de fermentação alcoólica em hidrociclones, PPGEQ/UFU, Uberlândia – MG (Dissertação de Mestrado), 169, 2011.
- CHU, L.-Y.; CHEN, W.-M.; LEE, X.-Z. Enhancement of hydrocyclone performance by controlling the inside turbulence structure. *Chem. Eng. Science*, v. 57, n. 1, p. 207-212, 2002.
- DELFO, R., MURPHY, S., STANBRIDGE, D., OLUJIC, Z., JANSENS, P. J. A design tool for optimizing axial liquid-liquid hydrocyclones. *Minerals Eng.*, vol. 17, p. 721-731, 2004.
- MA, L., QIAN, P., WANG, H., SHEN, Q. FU, P. Separation fogs from air by the cyclone: underflow leakage and sealed. International conference on industrial engineering and management science, p. 627-634, 2013.
- SVAROVSKY, L. *Solid-Liquid Separation*, Butterworth Heinemann, Woburn, Estados Unidos da América, 4 ed., 2000.
- WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. Mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. *Elsevier Science & Technology Books*, 2006.