



Ministério da Educação – Brasil  
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM  
Minas Gerais – Brasil  
Revista Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas  
Reg.: 120.2.095 – 2011 – UFVJM  
ISSN: 2238-6424  
QUALIS/CAPES – LATINDEX  
Nº. 19 – Ano X – 05/2021  
<http://www.ufvjm.edu.br/vozes>

## **Eficiência de separação do hidrociclone para a mistura óleo de fritura-água**

### **Cristiano Agenor Oliveira de Araújo**

Doutor em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos  
Pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ  
Docente do Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal  
dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, Campus do Mucuri.  
<http://lattes.cnpq.br/8015054807690894>  
E-mail: [cristianoagenor@ufvjm.edu.br](mailto:cristianoagenor@ufvjm.edu.br)

### **Érika Moraes Pereira**

Graduanda em Engenharia de Produção pela Universidade Federal dos Vales do  
Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM/MG – Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/9737760865955494>  
E-mail: [erika.morais@ufvjm.edu.br](mailto:erika.morais@ufvjm.edu.br)

### **Stéfany Torres Amaral**

Graduanda em Engenharia de Produção pela Universidade Federal dos Vales do  
Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM/MG – Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/9717269303380165>  
E-mail: [stefany.torres@ufvjm.edu.br](mailto:stefany.torres@ufvjm.edu.br)

### **Hugo Henrique Azevedo Gonçalves**

Mestrando em Tecnologia, Ambiente e Sociedade pela Universidade Federal dos  
Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM/MG – Brasil  
Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal dos Vales do  
Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM/MG – Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/2064489528699774>  
E-mail: [hugo.goncalves@ufvjm.edu.br](mailto:hugo.goncalves@ufvjm.edu.br)

**Thiago Freire Alves Ferreira**

Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM/MG – Brasil

Graduado em Licenciatura em Matemática pela Faculdade de Filosofia e Letras de Diamantina – FAFIDIA/MG - Brasil

<http://lattes.cnpq.br/8544955868329327>

E-mail: [thiago.freire@ufvjm.edu.br](mailto:thiago.freire@ufvjm.edu.br)

**Resumo:** Os hidrociclones são equipamentos de grande importância e vem sendo muito utilizados na indústria petrolífera, no atual cenário onde há grande preocupação com o meio ambiente, o equipamento de separação de estrutura simples apresenta um ótimo desempenho na separação óleo-água. Sua utilização possui diversas vantagens, são equipamentos compactos com baixos custos operacionais e que operam em um período de separação de misturas relativamente pequeno. Este trabalho buscou analisar, por meio de experimentos, a eficiência de um hidrociclone, geometricamente modelado por simulação computacional, em separar uma mistura de 60% água e 40% de óleo de fritura, uma inovação no ramo de hidrociclones. Foram realizados experimentos com razões de fluido distintas, com o intuito de potencializar o desempenho do hidrociclone base, e testar a influência dessa variável sobre a eficiência de separação do equipamento.

**Palavras-chave:** Hidrociclone. Separação de água/óleo de fritura. Razão de fluido. Águas oleosas.

## **Introdução**

Em razão do crescente desenvolvimento das indústrias, a poluição de águas pelo descarte indevido do óleo residual de alguns processos produtivos, está se tornando um enorme problema. Além do derramamento de óleo cru no caso de atividades petrolíferas, os acidentes naturais ocasionados pela mistura de água e óleo, seja mineral ou vegetal, acontecem nas etapas de produção, transporte, refino e no uso de seus derivados.

Devido aos inúmeros malefícios causados à natureza por efeito da poluição provocada pelo óleo, as exigências ambientais acima do descarte desse efluente estão cada vez mais intensas. Com a intenção de resolver essa problemática, muitas indústrias têm procurado por métodos para separação de misturas de grande quantidade de óleo dispersa em água. Um dos equipamentos mais utilizados, por ser muito vantajoso em alguns aspectos, é o hidrociclone.

O primeiro hidrociclone foi patenteado em 1891 por Bretney (CHINÉ et al., 2000) e foi implementado na indústria de mineração para a separação de sólido/líquido e desde então é bastante utilizado nas indústrias químicas, metalúrgicas e petrolíferas, uma vez que sua aplicação nessas indústrias é extremamente necessária e se intensifica a cada ano por diversos motivos.

Na década de 1970, o equipamento foi utilizado na indústria petroquímica. O primeiro protótipo para a separação de águas oleosas foi implantado devido à grande exploração de petróleo em alto-mar, sendo essa substância a maior poluente dessas águas. Toneladas de petróleo são derramadas no mar devido a vazamentos, que podem ser causados tanto por navios petroleiros, quanto nas plataformas de extração e nos oleodutos de distribuição, ocasionando graves danos ao meio ambiente.

Os hidrociclones possuem duas aberturas por onde saem os fluidos já separados, a abertura superior é denominada overflow, enquanto a inferior recebe o nome de underflow. Chaves *et al.* (1996) afirma que nos hidrociclones existem dois fluxos verticais, que funcionam como mecanismos de separação de partículas. Primeiramente, a sedimentação no campo centrífugo ocorre através das forças gravitacional e centrífuga que fornecem um movimento circular para as partículas. As partículas mais pesadas sofrem uma maior ação dessas forças e tendem a permanecer encostadas na parede do equipamento, saindo assim pelo underflow. As partículas mais leves, em oposição, são simultaneamente empurradas, pela força de arraste, para o fluxo ascendente no meio do hidrociclone, que sai pelo overflow.

Apesar da grande necessidade de se separar águas oleosas no atual cenário, em que a preservação ambiental é uma prioridade, e a grande eficiência dos hidrociclones nesse processo, o estudo de Araújo (2015), o qual este trabalho teve embasamento, é um dos poucos encontrados na literatura que estudam hidrociclones que atuam separando misturas de água e óleo com altas concentrações de óleo.

No estudo de hidrociclones é fundamental que sejam realizados experimentos, e que deles decorram cálculos de razões de fluido e eficiências, afim de avaliar o desempenho do equipamento nas separações.

A razão de fluido ( $R_F$ ) é regida pelo quociente entre a vazão de água que sai pelo *overflow* ( $Q_{AO}$ ), e a vazão de água total nas entradas do hidrociclone ( $Q_A$ ).

$$R_F = \frac{Q_{AO}}{Q_A} \quad (1)$$

Já a razão de fluido total ( $R_{FT}$ ) é definida pela razão entre as vazões totais, na saída do *overflow* e nas entradas para alimentação, de forma que:

$$R_{FT} = \frac{Q_{AO} + Q_{OO}}{Q_A + Q_O} \quad (2)$$

sendo  $Q_{AO}$  e  $Q_{OO}$  as vazões de água e óleo, respectivamente, na saída do *overflow*. E  $Q_A$  e  $Q_O$  as vazões de água e óleo nas entradas para alimentação.

Para um hidrociclone óleo água, a eficiência total ( $E_T$ ) é calculada por meio da vazão de óleo no *overflow* ( $Q_{OO}$ ) e a vazão de óleo na entrada ( $Q_O$ ), assim:

$$E_T = \frac{Q_{OO}}{Q_O} \quad (3)$$

E a eficiência total reduzida ( $E_{T,r}$ ) que considera somente o processo de separação proporcionado pelo campo centrífugo, é definida por:

$$E_{T,r} = \frac{E_T - R_F}{1 - R_F} \quad (4)$$

## Materiais e Métodos

### 1. Hidrociclone base

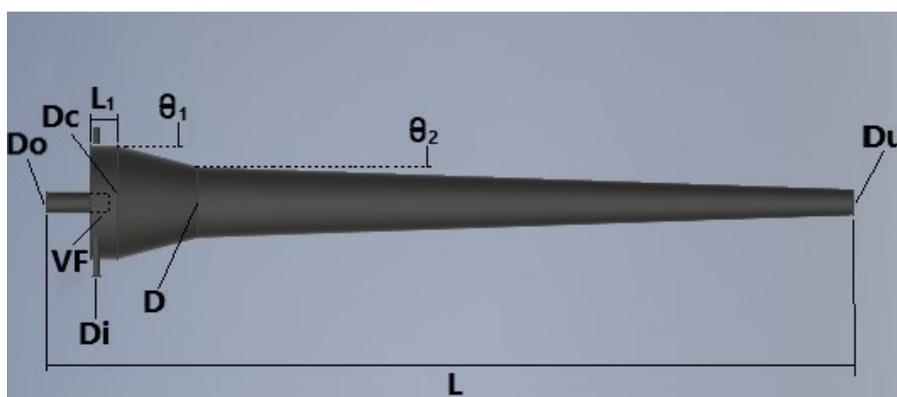
O hidrociclone de trabalho foi impresso em impressora 3D de acordo com a geometria estabelecida na simulação 8 do estudo de Araújo (2015). As dimensões do protótipo são mostradas na Tabela 1 e a localização das variáveis é identificada na Figura 1, onde apresenta-se um protótipo do hidrociclone base.

**Tabela 1:** Dimensões do hidrociclone base.

Variáveis	Do	Du	VF	L <sub>1</sub>	Θ <sub>1</sub>	Θ <sub>2</sub>	Di	Dc	D
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(grau)	(grau)	(mm)	(mm)	(mm)
Dimensão	20	25	40	25	7,5	1	7,5	70	40

Do = diâmetro do tubo de *overflow*; Du = diâmetro do *underflow*; Di = diâmetro da entrada (alimentação); Dc = Diâmetro da seção cilíndrica; D = Diâmetro situado entre as duas seções cônicas; VF = comprimento do *vortex finder*; L<sub>1</sub> = comprimento da seção cilíndrica; Θ<sub>1</sub> = ângulo da primeira seção cônica do hidrociclone; Θ<sub>2</sub> = ângulo da segunda seção cônica do hidrociclone.

**Figura 1:** Protótipo de um hidrociclone para separação óleo-água.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020.

No processo de separação da mistura óleo-água utilizando o hidrociclone, fazia-se necessário a concentração de 60% de água na solução, possuindo uma densidade de 997 kg/m<sup>3</sup>. Já o óleo foi utilizado em uma concentração de 40%, e após a realização de medidas de densidade e viscosidade, chegou-se aos valores de 921 kg/m<sup>3</sup> para a densidade e de 56,46 cSt para viscosidade. A vazão de

operação do hidrociclone, foi aferida através de dois medidores de fluxo acoplados a uma placa Arduino. Válvulas foram necessárias para atingir as vazões adequadas de 8,4 L/min para o óleo e 12,6 L/min para a água, e regular a razão de fluido. Foram utilizadas bombas específicas para garantir que os líquidos adquirirem pressões adequadas para escoar pelo hidrociclone, sendo uma bomba centrífuga, utilizada na tubulação por onde se deslocava a água, e uma bomba de deslocamento positivo NEMO® da NETZSCH, utilizada na tubulação de óleo.

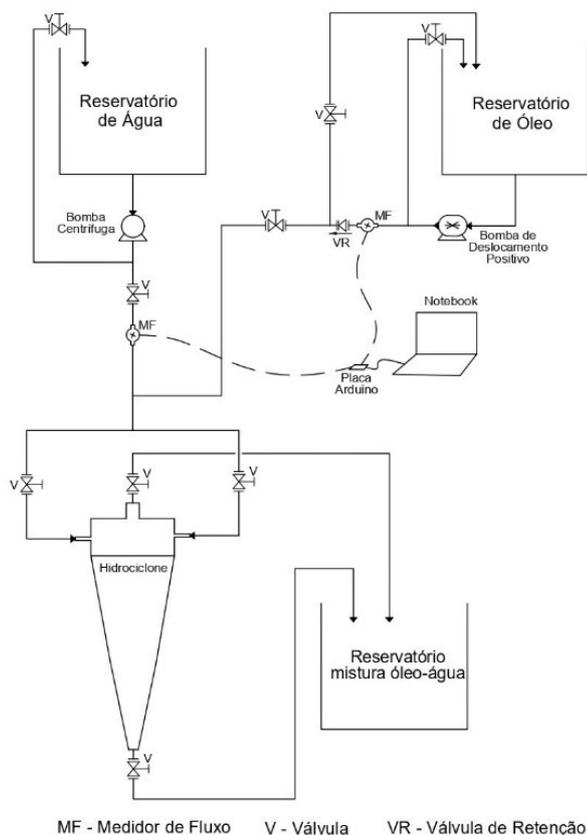
## **2. Aparato Experimental**

Em posse de todos os materiais o circuito foi montado, de forma que os primeiros testes puderam ser realizados.

O sistema em que foram realizados os experimentos era composto por dois reservatórios, um para armazenamento de água e outro para o óleo. Cada um dos líquidos escoava por mangueiras de 1 polegada e passavam pelas as bombas, seguindo para os medidores de fluxo Arduino, a fim de aferir a vazão e adequá-la a necessidade do hidrociclone. Após a união dos fluxos, a mistura óleo-água adentrava no hidrociclone através das tubulações conectadas nas entradas de alimentação do equipamento.

Como apresentado no esquema do aparato experimental (Figura 2) tubulações de retorno, posteriores a passagem pelas bombas, foram necessárias para garantir a vazão adequada ao experimento sem causar danos as bombas, que necessitam de uma maior quantidade de líquido para trabalharem. Há também um segundo retorno na tubulação do óleo, após o medidor de fluxo, este foi utilizado apenas para regulagem de vazão no momento inicial, evitando que o óleo se juntasse a água.

**Figura 2:** Esquema com o aparato experimental completo



Fonte: Próprio autor, 2020.

Estando todo o sistema montado e calibrado (Figura 3) segundo as variáveis operacionais requeridas, foi possível dar início aos experimentos. Após cada experimento, com o intuito de analisar o desempenho do hidrociclone, foram realizados os cálculos de razão de fluido, razão de fluido total, eficiência total e eficiência total reduzida, analisando todos os resultados e os motivos para possíveis discrepâncias entre valores, para que os defeitos pudessem ser corrigidos e o desempenho do hidrociclone ser melhorado. Para melhor avaliar o desempenho do equipamento, os experimentos foram realizados com três razões de fluido distintas, 32%, 36% e 51%.

**Figura 3:** Unidade experimental.



Fonte: Próprio autor, 2020.

## **Resultados e Discussão**

### **1. Experimento com razão de fluido 32%**

Os três primeiros experimentos (Experimento 1, 2 e 3) visando analisar a eficiência do hidrociclone base, foram realizados nas mesmas condições operacionais, com razão de fluido de aproximadamente 32%, isto é, 32% da mistura total deveria ser descarregada no *overflow*. A vazão total com que a mistura adentrou o hidrociclone foi em média de 21,03 L min<sup>-1</sup>, implicando em 10,52 L min<sup>-1</sup> em cada uma das entradas para alimentação. A Tabela 2 a seguir mostra os valores das vazões experimentais obtidas nos experimentos com razão de fluido total de 32%.

**Tabela 2:** Vazões obtidas a partir dos experimentos em triplicata com Razão de Fluido 32%.

Experimento	1	2	3	Média ± Desvio
$Q_t$ (L min <sup>-1</sup> )	21,04	20,54	21,52	21,03 ± 0,49
$Q_{ovf}$ (L min <sup>-1</sup> )	6,64	6,88	7,21	6,91 ± 0,29
$Q_{und}$ (L min <sup>-1</sup> )	14,40	13,67	14,31	14,13 ± 0,40

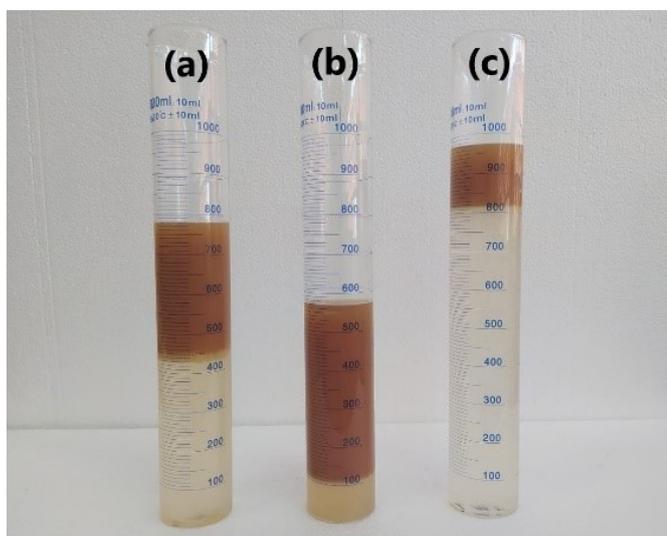
$Q_t$  = Vazão Volumétrica Total;  $Q_{ovf}$  = Vazão Volumétrica *overflow*;  $Q_{und}$  = Vazão Volumétrica *underflow*;

Fonte: Próprio autor, 2020.

Da corrente total de 21,03 L min<sup>-1</sup> da mistura, foi possível observar que 6,91 L min<sup>-1</sup> migraram para a corrente do *overflow*, corroborando a razão de fluido média para os três experimentos, em torno de 32,84% como será visto na Tabela 4. Os outros 67,14% do total da mistura da corrente de entrada seguiram para a corrente de *underflow*.

Para os Experimentos 1, 2 e 3 foram colhidas três amostras de cada uma das correntes de entrada, *overflow* e *underflow*, em provetas, para que pudessem ser mensuradas as quantidades de óleo e água, contida em cada uma das correntes. É importante ressaltar que as amostras foram colhidas em um mesmo intervalo de tempo. No sentido de ilustrar, temos na Figura 4 uma única amostra, de cada uma das três correntes do equipamento (entrada, *overflow* e *underflow*), apenas para o Experimento 1.

**Figura 4:** Amostras da mistura óleo-água recolhidas na entrada (a), *overflow* (b) e *underflow* (c) com Razão de Fluido 32% para o Experimento 1.



Fonte: Próprio autor, 2020.

Por meio da figura 4(a) percebe-se uma proximidade ao esperado de 40% óleo e 60% água na corrente de entrada. Observa-se que há uma grande quantidade de óleo no overflow, Figura 4(b), e uma pequena parcela de óleo na amostra underflow, figura 4(c), mostrando que o hidrociclone é indicado para a mistura em questão. A Tabela 3, a seguir, traz as concentrações calculadas a partir do volume para cada uma das amostras colhidas durante o Experimento 1.

**Tabela 3:** Concentração de óleo nas correntes de entrada, *overflow* e *underflow* com Razão de Fluido 32%, para o Experimento 1.

Correntes	Entrada	Overflow	Underflow
Amostra 1	37,29%	80,70%	16,67%
Amostra 2	40%	81,82%	16,41%
Amostra 3	37,21%	81,48%	16,95%
Média±Desvio	38,17% ±1,59	81,33% ± 0,57	16,68% ± 0,27

Fonte: Próprio autor, 2020.

A Tabela 4 mostra as médias e os desvios para os valores de razão de fluido e eficiência do hidrociclone.

**Tabela 4:** Razão de fluido e eficiências calculadas para os Experimentos 1, 2 e 3 com Razão de Fluido 32%.

Experimento	1	2	3	Média ±Desvio
R <sub>FT</sub> (%)	31,57	33,46	33,50	32,84 ± 1,11
R <sub>F</sub> (%)	9,37	9,78	9,81	9,65 ± 0,25
ET (%)	69,23	65,34	61,89	65,49 ± 3,67
ET' (%)	66,05	61,58	57,74	61,79 ± 4,16

R<sub>FT</sub> = Razão de Fluido Total; R<sub>F</sub> = Razão de Fluido; ET= Eficiência Total; ET'=Eficiência Total Reduzida;

Fonte: Próprio autor, 2020.

Os valores de razão de fluido total (R<sub>FT</sub>) oscilam para cada um dos três experimentos e produzem um valor médio de 32,84%, indicando que esse é o percentual da mistura óleo-água da corrente de entrada que segue para o *overflow*. O valor médio de razão de fluido (R<sub>F</sub>) foi de apenas 9,65%, correspondente ao

percentual de água da corrente da entrada que migrou para a corrente de *overflow*. É importante lembrar que, quanto menor for esse valor, mais eficiente é o hidrociclone, pois, na prática, não é desejável que água migre para a corrente em que se deve concentrar o óleo.

A eficiência total média foi de 65,49% enquanto a média da eficiência reduzida ficou em 61,79% para essa triplicata. O equipamento possui uma boa qualidade de separação, no entanto, pode ser melhorada com o aumento da razão de fluido. É de suma importância que este aumento seja avaliado, uma vez que quanto maior a razão de fluido, mais água escoará junto com o óleo para a corrente do *overflow*.

## 2. Experimento com razão de fluido 36%

A partir de um leve fechamento na válvula ao final do *underflow*, aumentou-se o volume de fluido direcionado a saída *overflow*, de forma que a vazão volumétrica desta corrente subiu para em média  $7,92 \text{ L min}^{-1}$ , implicando em uma razão de fluido próxima aos 36% para os Experimentos 4, 5 e 6, uma vez que a vazão total de operação foi de  $21,99 \text{ L min}^{-1}$ . As vazões de cada corrente para estes três experimentos estão detalhadas na Tabela abaixo.

**Tabela 5:** Vazões obtidas a partir dos experimentos em triplicata com Razão de Fluido 36%.

Experimento	4	5	6	Média ± Desvio
$Q_t \text{ (L min}^{-1}\text{)}$	22,68	21,57	21,71	$21,99 \pm 0,6$
$Q_{ovf} \text{ (L min}^{-1}\text{)}$	8,00	7,72	8,03	$7,92 \pm 0,17$
$Q_{und} \text{ (L min}^{-1}\text{)}$	14,67	13,85	13,67	$14,06 \pm 0,53$

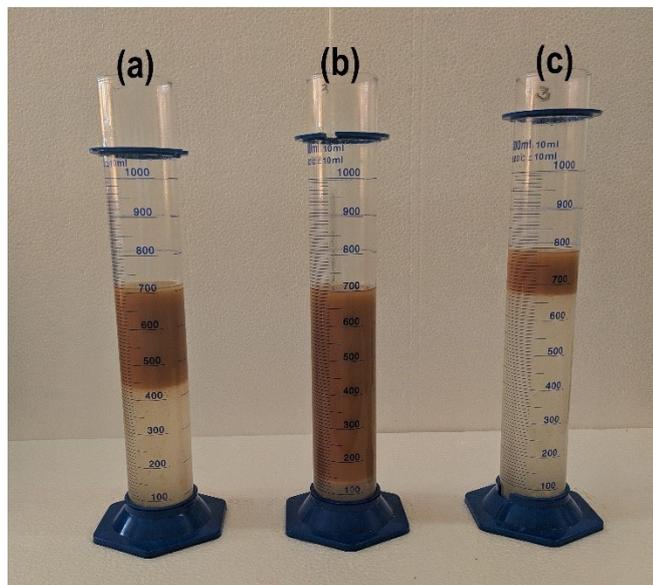
$Q_t$  = Vazão Volumétrica Total;  $Q_{ovf}$  = Vazão Volumétrica *overflow*;

$Q_{und}$  = Vazão Volumétrica *underflow*;

Fonte: Próprio autor, 2020.

A premissa de recolher amostras em triplicata para cada uma das correntes de fluido repetiu-se para os Experimentos 4, 5 e 6. A Figura 5, mostra uma das três amostras relativas ao Experimento 6.

**Figura 5:** Amostras da mistura óleo-água recolhidas na entrada (a), *overflow* (b) e *underflow* (c) com Razão de Fluido 36%.



Fonte: Próprio autor, 2020.

Em análise a Figura 5 é possível observar que as amostras não diferem muito das recolhidas para os Experimentos 1, 2 e 3, na razão de fluido de 32%. A grande parcela de óleo na amostra da Figura 5(a), *overflow*, e a baixa quantidade na corrente *underflow*, Figura 5(b), juntamente com os resultados de concentração volumétrica que serão apresentados na Tabela 6, reafirmam o bom desempenho de separação do equipamento.

**Tabela 6:** Concentração de óleo nas correntes de entrada, *overflow* e *underflow* com Razão de Fluido 36%, para o Experimento 6.

Correntes	Entrada	Overflow	Underflow
Amostra 1	47,63%	81,58%	16,36%
Amostra 2	49,35%	81,70%	17,42%
Amostra 3	49,67%	82,12%	16,78%
Média ± Desvio	48,88% ± 0,90	81,80% ± 0,28	16,85% ± 0,53

Fonte: Próprio autor, 2020.

A Tabela 6, com concentrações obtidas a partir do volume de cada amostra do sexto experimento, mostra que a concentração de óleo na corrente de entrada foi 48,88%, mais alta do que a planejada, de 40%, contudo, percebe-se pela

concentração de óleo nas demais correntes que tal fator não prejudicou a performance do hidrociclone. A média de 81,80% de óleo no *overflow*, e de 16,85% no *underflow* indicam abundância de óleo na primeira, e de água na segunda corrente, resultado condizente com o esperado.

Valores médios para a razão de fluido e eficiência do Experimento 6, além das médias para os outros dois experimentos na mesma razão de fluido de 36%, são apresentados na tabela a seguir.

**Tabela 7:** Razão de fluido e eficiências calculadas para os Experimentos 4, 5 e 6 com Razão de Fluido 36%.

Experimento	4	5	6	Média
R <sub>FT</sub> (%)	35,30	35,81	37,01	36,04 ± 0,88
R <sub>F</sub> (%)	10,00	12,07	11,40	11,15 ± 1,06
ET (%)	66,25	68,65	74,04	69,65 ± 3,99
ET' (%)	62,50	64,35	70,70	65,85 ± 4,30

R<sub>FT</sub> = Razão de Fluido Total; R<sub>F</sub> = Razão de Fluido; ET = Eficiência Total; ET' = Eficiência Total Reduzida;

Fonte: Próprio autor, 2020.

Pela Tabela 7 identifica-se um aumento na eficiência média do equipamento se comparado aos experimentos anteriores. Com a razão de fluido total média em 36,04% o hidrociclone apresentou a eficiência total de 69,65% e em média 65,85% para a eficiência total reduzida.

Ainda que a eficiência média tenha se elevado, não é correto afirmar que o desempenho do hidrociclone é melhor nesta condição de operação, isso porque o aumento da eficiência deve-se ao aumento total da mistura que é descarregada no *overflow*. A problemática está no fato de que ao aumentar o volume de fluido nessa corrente, levando a razão de fluido total (R<sub>FT</sub>) aos 36,04%, a razão de fluido (R<sub>F</sub>) também se elevou, isto é, nesta condição de operação, 11,15% da água que adentrou o hidrociclone seguiu para o *overflow*. O aumento de água nesta corrente não é desejável, visto que o ideal é que nela esteja concentrado apenas óleo.

### 3. Experimento com razão de fluido 51%

Os últimos experimentos foram realizados com a razão de fluido em 51%. Os Experimentos 7, 8 e 9 apresentaram uma vazão média de  $21,12 \text{ L min}^{-1}$ . Este total se dividiu em correntes de  $10,87 \text{ L min}^{-1}$  para o *overflow* e  $10,25 \text{ L min}^{-1}$  para o *underflow*. Os valores de vazão para os Experimentos 7, 8 e 9 em particular são apresentados na Tabela a seguir.

**Tabela 8:** Vazões obtidas a partir dos experimentos em triplicata com Razão de Fluido 51%.

Experimento	7	8	9	Média
$Q_t \text{ (L min}^{-1}\text{)}$	21,84	20,99	20,52	$21,12 \pm 0,67$
$Q_{ovf} \text{ (L min}^{-1}\text{)}$	11,38	10,97	10,26	$10,87 \pm 0,57$
$Q_{und} \text{ (L min}^{-1}\text{)}$	10,46	10,02	10,25	$10,25 \pm 0,22$

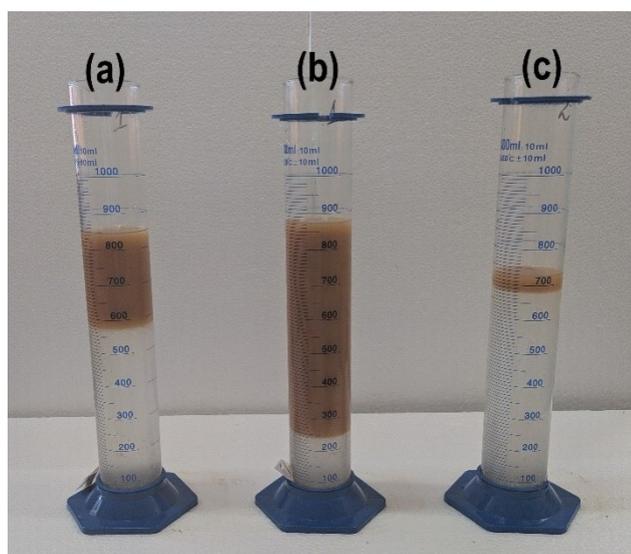
$Q_t$  = Vazão Volumétrica Total;  $Q_{ovf}$  = Vazão Volumétrica *overflow*;

$Q_{und}$  = Vazão Volumétrica *underflow*;

Fonte: Próprio autor, 2020.

Tomando como base o Experimento 7, a figura a seguir apresenta apenas uma das amostras para as correntes de entrada, *overflow* e *underflow*, que novamente foram recolhidas em triplicata, no decorrer de cada um dos experimentos.

**Figura 6:** Amostras da mistura óleo-água recolhidas na entrada (a), overflow (b) e underflow (c) com Razão de Fluido 51%.



Fonte: Próprio autor, 2020.

A amostra do *underflow*, Figura 6(c), chama a atenção por apresentar uma parcela muito fina de óleo. Tal resultado se mostra muito satisfatório, contudo, é de suma importância verificar também qual foi a influência das alterações operacionais na corrente *overflow*.

Analisando quantitativamente, a Tabela 9 apresenta as concentrações, calculadas a partir do volume, para as três amostras referentes ao Experimento 7.

**Tabela 9:** Concentração de óleo nas correntes de entrada, *overflow* e *underflow* com Razão de Fluido 51%.

Correntes	Entrada	Overflow	Underflow
Amostra 1	43,26%	72,57%	7,64%
Amostra 2	41,29%	71,34%	7,53%
Amostra 3	43,05%	71,34%	7,63%
Média	42,53% ± 1,08	71,75% ± 0,71	7,60% ± 0,06

Fonte: Próprio autor, 2020.

A Tabela 9 confirma a percepção de queda na quantidade de óleo da corrente *underflow*, apresentando uma média de apenas 7,6% de óleo. Contudo, a concentração de óleo na corrente *overflow* também caiu, chegando aos 71,75%. As quedas podem ser explicadas pelo aumento da razão de fluido total.

Os resultados médios para razões de fluido e eficiência dos três últimos experimentos são tratados na Tabela a seguir.

**Tabela 10:** Razão de fluido e eficiências calculadas para os Experimentos 7, 8 e 9 com Razão de Fluido 51%.

Experimento	7	8	9	Média
R <sub>FT</sub> (%)	52,10	52,28	50,02	51,46 ± 1,26
R <sub>F</sub> (%)	24,95	26,33	18,57	23,28 ± 4,14
ET (%)	91,12	94,32	87,80	91,08 ± 3,26
ET' (%)	88,17	92,29	85,01	88,49 ± 3,65

R<sub>FT</sub> = Razão de Fluido Total; R<sub>F</sub> = Razão de Fluido; ET = Eficiência Total; ET' = Eficiência Total Reduzida;

Fonte: Próprio autor, 2020.

Com o aumento da razão de fluido total para em média 51,46% e a permanência da vazão de operação e concentração de óleo próximas ao que era planejado, a eficiência aumentou significativamente, atingindo o valor médio de 91,08% para a eficiência total. Em concordância, a eficiência total reduzida também se elevou para em média 88,49% para a triplicata. Entretanto, como citado anteriormente, não é interessante que a quantidade de água na corrente *overflow* se eleve ainda mais. Para os Experimentos 7, 8 e 9, a porcentagem de água que migrou para o *overflow* foi de 23,28%.

#### 4. Comparações entre experimentos com razões de fluido distintas

Todos os experimentos realizados buscaram manter a constância das condições operacionais de entrada, como vazão total próxima aos 21 L min<sup>-1</sup> e concentração de óleo em torno de 40%. Apesar de algumas oscilações, os valores para essas variáveis não divergiram muito do que era previsto, chegando a uma média de 21,38 L min<sup>-1</sup> para a vazão de entrada e 47% de concentração de óleo. A variável intencionalmente modificada foi a razão de fluido total, que por consequência acarretou alterações em outras variáveis. A Tabela 11 traz os valores médios obtidos para cada conjunto de três experimentos, nas razões de fluido aproximadas de 32%, 36% e 51%.

**Tabela 11:** Parâmetros calculados a partir das médias experimentais com Razão de Fluido 32%, 36% e 51%.

Exp.	Q <sub>t</sub> (l/min)	C <sub>v</sub> (alim)	C <sub>v</sub> (ovf)	C <sub>v</sub> (und)	R <sub>FT</sub>	R <sub>F</sub>	ET	ET'
RF 32%	21,03	0,47	0,83	0,22	0,33	0,10	0,65	0,62
RF 36%	21,99	0,51	0,82	0,2	0,36	0,11	0,70	0,66
RF 51%	21,12	0,43	0,73	0,077	0,51	0,23	0,91	0,88

Qt = Vazão Volumétrica Total; Q = Vazão Volumétrica; Cv = Concentração Volumétrica; alim = alimentação; ovf = *overflow*; und = *underflow*; R<sub>FT</sub> = Razão de Fluido Total; R<sub>F</sub> = Razão de Fluido; ET = Eficiência Total; ET' = Eficiência Total Reduzida;

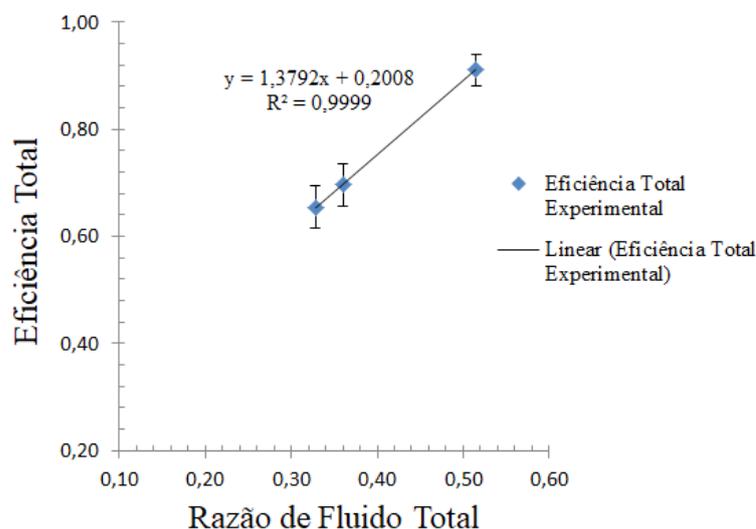
Fonte: Próprio autor, 2020.

Analisando a Tabela 11 percebe-se que as concentrações de óleo nas correntes *overflow* e *underflow* decresceram à medida que se aumentou a razão de

fluido. Tal ocorrência relaciona-se ao fato de que se o volume de mistura direcionado ao *underflow* é menor, a quantidade de óleo certamente irá decrescer, contudo, decresce também a concentração do componente no *overflow*. Ao elevar a quantidade de mistura que migra para o *overflow*, mesmo que o hidrociclone apresente bom desempenho de separação, aumentará o volume de água a escoar junto ao óleo para essa corrente. Essa ocorrência está ligada a limitação da saída *underflow*, forçando parte da água a escoar pela corrente contrária.

Com atenção a eficiência total, é perceptível pela Tabela 11, e pelo que foi discutido nos tópicos anteriores, que a medida com que a razão de fluido aumenta, a eficiência também se eleva.

**Figura 7:** Eficiência Total versus Razão de Fluido Total.



Fonte: Próprio autor, 2020.

A Figura 7 confirma a existência de uma relação de linearidade entre as variáveis Eficiência Total (ET) e Razão de Fluido Total (RFT), que obedece a equação 8.

$$ET = 1,3792 R_{FT} + 0,2008 \text{ sendo } R^2 = 0,9999$$

(5)

Essa relação é explicada pelo fato de que ao aumentar a razão de fluido, mais líquido irá escoar pelo overflow, logo, a eficiência total, que é dependente desta variável, irá crescer. Contudo, somente a eficiência total não pode

definir o desempenho do hidrociclone, visto que no volume da mistura que escoou pelo overflow há uma parcela de água. Em vista a eficiência total reduzida (ET'), esta apresenta um valor mais condizente com o real desempenho do hidrociclone, pois, subtrai da eficiência total a fração de água que vai para o overflow, representada pela razão de fluido (RF).

## **Conclusão**

A partir da análise de amostras recolhidas para os experimentos em diferentes razões de fluido, verificou-se que o volume de óleo na corrente de entrada correspondeu ao que foi proposto para o experimento, concentração de 40% de óleo e 60% de água na mistura. Observou-se nas amostras recolhidas no *overflow*, que uma grande quantidade de óleo foi recuperada, mostrando que o hidrociclone base é indicado para a separação da mistura óleo de fritura-água.

O total de nove experimentos realizados acima da mistura, numa alta concentração de óleo, gerou uma base ampla de dados experimentais. Com o aumento da razão de fluido total nos testes, e a permanência da vazão de operação e concentração de óleo próximas ao que era planejado, a eficiência total do equipamento aumentou significativamente.

Com a análise das amostras, colhidas durante os experimentos, e a confirmação por meio de cálculos de eficiência e de concentração volumétrica de óleo nas saídas do equipamento, confirmou-se a aptidão do hidrociclone base em trabalhar com óleo de fritura, tendo apresentado uma eficiência total de  $91,08 \pm 3,26$  %, para a razão de fluido total de 51%.

Os experimentos também destacaram a existência da relação linear entre razão de fluido e eficiência total. Sendo a razão de fluido expressamente ligada ao diâmetro das saídas *overflow* e *underflow*, enquanto a eficiência total é regida pela razão entre a vazão na corrente *overflow* e a vazão nas entradas. Tal relação precisa ser profundamente avaliada ao utilizar o equipamento na prática, estabelecendo os valores para as variáveis que proporcionem as condições mais adequadas para que o hidrociclone trabalhe no seu melhor desempenho no processo em questão.

O equipamento mostrou-se como uma alternativa muito atraente, de baixo custo e estrutura simplificada, para substituir separadores comumente utilizados. As vantagens na utilização do hidrociclone óleo-água ainda vão além do aspecto industrial, colaborando também com o meio ambiente, ao proporcionar a separação do óleo para descarte correto ou reutilização.

## Referências

ARAÚJO, C. A. O de. Hidrociclones para a separação de misturas de alto teor de óleo disperso em água. 2015. 98 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CHAVES, A.P. et al. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. 1. ed. vol. 1. São Paulo: Signus, 1996.

CHINÉ, B.; CONCHA, F. Flow patterns in conical and cylindrical hydrocyclones. Chemical Engineering Journal, Chile, v. 80, n. 1-3, p. 267-273, dec. 2000.

Processo de Avaliação por Pares: (*Blind Review*)

Publicado na Revista Vozes dos Vales - [www.ufvjm.edu.br/vozes](http://www.ufvjm.edu.br/vozes) em: 05/2021

Revista Científica Vozes dos Vales - UFVJM - Minas Gerais - Brasil

[www.ufvjm.edu.br/vozes](http://www.ufvjm.edu.br/vozes)

UFVJM: 120.2.095-2011 - QUALIS/CAPES - LATINDEX: 22524 - ISSN: 2238-6424