



## **APLICATIVO MÓVEL “PEIQ” COMO FERRAMENTA NO ENSINO E DIMENSIONAMENTO DE HIDROCICLONES**

GISELE M. LIMA<sup>1</sup>, MARCELO B. SILVA<sup>2</sup>, KÁSSIA G. SANTOS<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica. \*e-mail: [kassia.santos@uftm.edu.br](mailto:kassia.santos@uftm.edu.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Química

**RESUMO** – A inclusão de novas tecnologias à educação, como os dispositivos móveis no ensino de engenharia química, tem se mostrado útil para melhorar o entendimento dos conceitos e facilitar a compreensão das operações unitárias. Na busca por alternativas, o presente trabalho desenvolveu um aplicativo móvel para projetar hidrociclones. Para definir o método e as equações utilizados no estudo, foram consultadas as literaturas mais empregadas no ensino de operações unitárias. A validação do aplicativo considerou 3 estudos de casos, obtendo um desvio médio de 1,43% entre os resultados simulados e apresentados enunciados. Assim, a inclusão desta tecnologia como ferramenta educacional possibilitará aos graduandos uma maior compreensão na construção de um sólido conhecimento individual, sendo uma ferramenta ágil para a execução do seu trabalho.

### **INTRODUÇÃO**

Na atualidade, os avanços tecnológicos que mais se destacam são os dispositivos móveis, como smartphones, tablets e telefones com acesso à internet, facilitando disseminar e compartilhar informações. Visando a formação de um engenheiro químico, os avanços tecnológicos têm facilitado a prática dos conceitos disciplinares, contribuindo na melhoria dessa formação profissional através de alternativas mais práticas para conhecer, projetar, desenvolver e avaliar equipamentos da indústria química (CREMASCO, 2012).

As operações unitárias, comuns nos processos industriais, envolvem a modelagem matemática e o uso de métodos iterativos de difícil compreensão por parte dos alunos. A utilização apenas de métodos convencionais de ensino, com necessidade de memorização de equações matemáticas, não gera o conhecimento adequado e nem desperta o interesse na sala de aula (SILVA *et al.*, 2018).

De modo a superar as dificuldades acadêmicas e possibilitar aos alunos e profissionais de engenharia química o acesso

rápido a uma ferramenta computacional, propôs-se neste trabalho o desenvolvimento de um aplicativo móvel para projetar um hidrociclone, um equipamento de separação sólido-fluido presente na indústria química.

Por definição, aplicativos móveis são todos os *softwares* criados com o propósito específico para utilização em *smartphones* e *tablets*, disponibilizados em repositórios oficiais de aplicativos em dado sistema operacional (SILVA; LIMA, 2016).

O processo básico para o desenvolvimento de um aplicativo móvel é representado na Figura 1. O processo inicia-se com a análise de viabilidade de uma ideia. Em seguida define-se a interface acessível ao usuário, a linguagem de programação que será adotada e as ferramentas necessárias para seu desenvolvimento. Por fim, testam-se as suas funcionalidades em diversos dispositivos e sistemas operacionais, verificando a compatibilidade antes de disponibilizar nas lojas das plataformas, onde passará ainda por novas validações e verificações específicas do repositório de aplicativos (EL-KASSAS *et al.*; 2017).

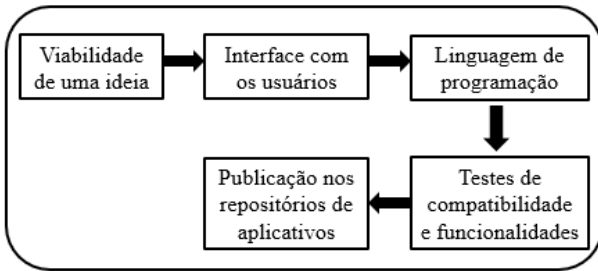


Figura 1 – Processo inicial de desenvolvimento de um aplicativo móvel.

Os processos de separação de sistemas particulados são apoiados nas diferenças de propriedades físicas dos materiais sólidos e fluidos envolvidos, como massa específica, tamanho ou formato das partículas, sob a ação de forças de campo centrífugo ou gravitacional, dentre outros (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2004; CREMASCO, 2012).

Nas indústrias químicas, dentre os equipamentos de separação sólido e fluido, tem-se os hidrociclones, em que atuam as forças centrífugas na separação de sólido e líquido (SVAROVSKY, 1981; CREMASCO, 2012). Eles são utilizados em diversas áreas das indústrias metalúrgica, têxtil, petroquímica, alimentícia e de bioengenharia.

Eles têm como função principal a separação de partículas por diferenças no tamanho das partículas, massa específica ou velocidade terminal de queda, que estão suspensas em líquido de baixa massa específica; remoção de sólidos suspensos no líquido; separação de líquidos imiscíveis de diferentes massas específicas e remoção de líquido para fornecer um produto mais concentrado (SILVA *et. al.*, 2018).

A separação do material particulado é possível devido a diferenças nas massas específicas com o líquido e da atuação da força centrífuga (PEÇANHA, 2014). Os hidrociclones são compostos por uma seção cilíndrica agregada a uma parte cônica. A alimentação do líquido com partículas suspensas ocorre tangencialmente através da entrada lateral na parte cilíndrica e como resultado dessa entrada, forma-se um forte movimento (SVAROVSKY, 1981). Devido a esse movimento, uma fração de líquido contendo finas partículas é retirada no topo do equipamento, também chamado de *overflow* e na outra saída, o *underflow*, localizado na parte

final cônica é retirada a fração mais densa de partículas e o líquido remanescente (SVAROVSKY, 1981).

Considerando que nenhum equipamento de separação trabalha com eficiência real de 100%, por essa razão não é possível obter somente líquido no *overflow* ou somente partículas no *underflow* em equipamentos industriais reais (SVAROVSKY, 1981).

Antunes e Medronho (1992) apontam que as empresas produtoras de hidrociclone trabalham limitando a faixa de diâmetros desses equipamentos, portanto, é importante conhecer as proporções geométricas que podem influenciar em seu desempenho. A Figura 2 e Tabela 1 trazem as informações das proporções geométricas das duas principais famílias de hidrociclones: Bradley e Rietema.

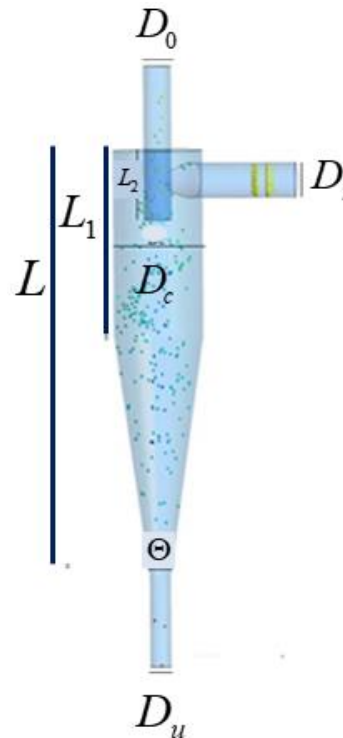


Figura 2 – Representação geométrica de hidrociclones.

Fonte: Adaptado de Barros e Alves (2014).

Na Figura 2,  $D_c$  é o diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone,  $D_i$  é o diâmetro de alimentação,  $D_0$  o diâmetro no *overflow*,  $D_u$  o diâmetro no *underflow*,  $L$  é a altura total do hidrociclone,  $L_1$  a altura da seção cilíndrica,  $L_2$  a altura do vórtex *finder* e  $\theta$  é o ângulo do tronco cônico.

Tabela 1 – Configuração de hidrociclones Rietema e Bradley.

PARÂMETRO	RIETEMA	BRADLEY
$\frac{D_i}{D_c}$	0,28	1/7
$\frac{D_0}{D_c}$	0,34	1/5
$\frac{L}{D_c}$	5	-
$\frac{L_1}{D_c}$	-	1/2
$\frac{L_2}{D_c}$	0,40	1/3
$\theta$	10°-20°	9°

Fonte: Massarani (2002).

Em uma análise mais detalhada do funcionamento dos hidrociclones, é possível verificar a implicação de dois recursos: a sedimentação em campo centrífugo e o efeito direcionado da coleta de sólidos.

Os hidrociclones trabalham dividindo a vazão de alimentação em duas correntes, *overflow* e *underflow*, originando o fenômeno conhecido como “efeito T” ou “efeito divisor de vazão”. O “efeito T”, independentemente de ocorrer ou não a separação centrífuga, parte dos particulados sempre serão coletados pelo simples fato de haver a divisão de correntes e estes estarem suspensos no líquido que os arrastam para a saída inferior, o *underflow*. Dessa forma, Peçanha (2014) afirma que foi estabelecido experimentalmente que a eficiência de coleta dos sólidos, considerando o “efeito T”, ocorre em razão da eficiência de coleta de líquido pelo hidrociclone, obtido através da razão de líquido ( $R_L$ ). Essa razão de líquidos dimensiona a eficiência de coleta de fluido em um hidrociclone. O valor de  $R_L$  para hidrociclones estão, em geral, em torno de 0,6 ou menos (PEÇANHA 2014).

Assim, a análise do desempenho do hidrociclone deve ser feita utilizando correlações experimentais envolvendo as variáveis de processo (massas específicas e viscosidade do fluido), variáveis de projeto (diâmetro da parte cilíndrica) e as condições operacionais, como vazão de alimentação, queda de pressão e diâmetro de corte (PEÇANHA, 2014).

## MÉTODOS

### Desenvolvimento do Aplicativo móvel

O aplicativo móvel “Projetando Equipamentos da Indústria Química (PEIQ)”, foi desenvolvido na Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba - MG. É uma ferramenta gratuita, para plataforma *Android*, disponível na versão português do Brasil e inglês dos Estados Unidos.

O *app* foi desenvolvido utilizando tecnologia híbrida, contemplando um conjunto de *frameworks open-source* como Ionic na versão 4.0.6, Apache Cordova 8.0.0, AngularJs 6.1.0 e Android Studio 3.1.3. O desenvolvimento do aplicativo ocorreu apenas no *front-end*, portanto sem armazenamento de informações em bancos de dados.

O PEIQ destina-se a docentes e discentes de cursos de Engenharia, principalmente de Engenharia Química, e profissionais que atuam na área de separação de particulados no campo centrífugo e no gravitacional. A utilização deste aplicativo requer um conhecimento prévio sobre os temas abordados. A Figura 3a apresenta o módulo “Página Inicial” trazendo informações como logomarca, nome do aplicativo e o esboço das telas destinadas aos diferentes equipamentos.

O aplicativo foi estruturado em módulos contemplando vários equipamentos de separação e um módulo de conversão de unidades. As unidades de medida empregadas nos cálculos internos do aplicativo se encontram no sistema CGS.

Para o desenvolvimento do “PEIQ”, adotou-se a base teórica dos métodos de dimensionamento dos equipamentos abordados descritos por Cremasco (2012), Massarani (2002), Peçanha (2014), Svarovsky (1981) e Castilho e Medronho (2000).

Os usuários precisam atentar as unidades de medidas adotadas em cada módulo. Caso essas informações não estejam nas unidades de medidas exigidas pelo aplicativo, o usuário tem a opção de recorrer ao módulo de “Conversão de Unidades” disponibilizada no próprio aplicativo, que permite a conversão de unidades de comprimento, área, massa, temperatura, velocidade, massa específica, viscosidade, vazão, pressão e potência.



Figura 3: Módulo Inicial e o *layout* dos equipamentos.

Os módulos destinados aos equipamentos de separação foram padronizados contendo sempre os botões “Calcular”, “Informações”, “Limpar” e “PDF”. O *app* só aceita números. Caso o usuário entre com valores muito fora das faixas usuais, ou em unidades erradas, o *app* mostrará que há erro e não foi possível calcular os resultados. Assim, sempre que quiser simular outra condição ou corrigir alguma informação, o usuário deve limpar os dados e reiniciar a simulação.

O “Calcular” é responsável por apresentar os resultados da aplicação dos métodos de cálculos. O botão “Informações” disponibiliza aos usuários o conceito principal do equipamento, aplicação dele na indústria, as equações abordadas no aplicativo, além do caminho para realização dos cálculos. No botão “PDF” é gerado um arquivo em formato de arquivo *.pdf*, com todas as informações prestadas pelo usuário e os resultados pertinentes aos cálculos, permitindo a impressão e o compartilhamento das informações.

Após aplicar os métodos de equacionamento e desenvolver o aplicativo, o processo de validação foi realizado, comparando valores do aplicativo com atividades apresentadas por autores de livros didáticos da disciplina de operações unitárias. No caso dos hidrociclones, foram simulados 3 estudos de caso, propostos por Medronho (2012).

## Equacionamento do Módulo Hidrociclone

Na aba principal do Módulo Hidrociclone (Figura 3b) é possível escolher a geometria do hidrociclone, entre as geometrias Bradley ou Rietema.

Neste módulo, o usuário precisa fornecer ao aplicativo informações de concentração volumétrica de alimentação ( $C_v$ ), diâmetros da parte cilíndrica ( $D_c$ ) e do *underflow* ( $D_u$ ), vazão do processo ( $Q_A$ ), pressão ( $P$ ), viscosidade do fluido ( $\mu$ ), massas específicas do fluido ( $\rho$ ) e das partículas ( $\rho_s$ ). O aplicativo exibe opções de determinação de diâmetro de corte ( $d^*$ ) resultando em campos complementares do qual GGS ou RRB ou os parâmetros dos modelos. Essas opções estão apresentadas na Figura 4.

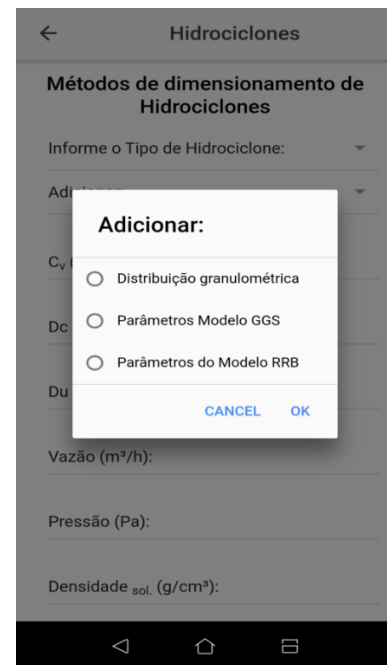


Figura 4 – Condições iniciais para o módulo hidrociclone.

O processo de ajuste por distribuição granulométrica utiliza as Equações linearizadas 1 e 2, obtendo os parâmetros  $n$  e  $k$  dos modelos de distribuição granulométrica e seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ).

Ao escolher a Opção 2, “Distribuição granulométrica”, é solicitado ao usuário a tabela de distribuição granulométrica. De acordo com Cremasco (2012), independentemente do modelo de distribuição granulométrica, ele pode ser escrito na forma de função  $X_i = X(D_{pi})$ . As Equações 1 e 2

representam respectivamente, os modelos de distribuição granulométrica RRB e GGS, enquanto as Equações 3 e 4 mostram sua forma linearizada, respectivamente.

$$X_i = 1 - \exp\left[-\left(\frac{D_p}{k}\right)^n\right] \quad (1)$$

$$X_i = \left(\frac{D_p}{k}\right)^n \quad (2)$$

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-X_i}\right)\right] = n \ln[D_{pi}] - n \ln[k] \quad (3)$$

$$\log[X_i] = n \log[D_{pi}] - n \log[k] \quad (4)$$

Conhecendo a forma linearizada dos modelos e aplicando o método de mínimos quadrados e eliminação de Gauss, é possível obter os parâmetros do modelo e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Com essas informações, o aplicativo verifica o melhor ajuste analisando os respectivos coeficientes de determinação.

Essa escolha do modelo é determinante na definição dos parâmetros empregados nos cálculos de projeto do equipamento (CREMASCO, 2012).

### Proposta apresentada por Massarani (2002)

Após a concessão das informações solicitadas no aplicativo para o método descrito por Massarani (2002), o dimensionamento de hidrociclone iniciou-se com a determinação da vazão de projeto individual ( $Q$ ), determinando a velocidade de projeto ( $u_c$ ) conforme a Equação 5, uma vez que o número de Euler ( $\beta$ ) de cada família é conhecido e a queda de pressão de operação ( $-\Delta p$ ) deve ser especificada pelo usuário. Em seguida, a Equação 6 permite obter a vazão.

$$\beta = \frac{(-\Delta p)}{\frac{\rho u_c^2}{2}} \quad (5)$$

$$Q = \frac{\pi u_c D_c^2}{4} \quad (6)$$

Estabelecido a vazão de projeto, o diâmetro de corte ( $d^*$ ) pode ser calculado, conforme a Equação 7.

$$\frac{d^*}{D_c} = K \left[ \frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} f(R_L) g(C_v) \quad (7)$$

em que  $K$  é um parâmetro específico de cada família de hidrociclones,  $f(R_L)$  é o fator corretivo da Razão de Líquido ( $R_L$ ), aplicado ao dimensionamento do e  $g(C_v)$  é uma função da concentração volumétrica de sólidos na alimentação (Massarani, 2002). Esses fatores de correção podem ser calculados através das Equações 8, 9 e 10.

$$g(C_v) = \frac{1}{\sqrt{4,8(1-C_v)^2 - 3,8(1-C_v)}} \quad (8)$$

$$f(R_L) = 1 + AR_L \quad (9)$$

$$R_L = B \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^C \quad (10)$$

em que A, B, C são parâmetros específicos de cada família de hidrociclones, conforme mostra a Tabela 2.

Assim, a análise de um hidrociclone consiste em definir a configuração do equipamento, a partir do diâmetro de corte ( $d^*$ ) e com isso obter as dimensões geométricas detalhadas na Tabela 2. Estabelecido o  $d^*$ , determina-se a eficiência do processo e a concentração do produto final retirado na corrente *underflow* (PEÇANHA, 2014).

Tabela 2 – Parâmetros da configuração de hidrociclones Bradley e Rietema.

Parâmetro	Hidrociclone	
	Bradley	Rietema
$\beta$	7500	1200
$K$	0,016	0,039
$A$	1,73	1,73
$B$	55,3	145
$C$	4,75	2,63

Outra característica do projeto de hidrociclone contemplado neste trabalho, foi a verificação da necessidade de atuação dos equipamentos em paralelo. Nessa análise, aplicou-se a Equação 11, em que o número de hidrociclones da bateria em paralelo ( $N_H$ ) é a razão entre a vazão total de alimentação do processo ( $Q_A$ ) foi informada pelo usuário, e a vazão individual de cada hidrociclone ( $Q$ ), obtida através da Equação 6.

$$N_H = \frac{(Q_A)}{Q} \quad (11)$$

De acordo com Peçanha (2014), o desempenho dos hidrociclones pode ser validado através da eficiência global de coleta ( $E_G$ ), desde que sejam conhecidas a vazão, a concentração de sólidos em suspensão e as distribuições granulométricas ou os modelos de distribuição granulométrica. Essa eficiência pode ser calculada pela Equação 12, em que  $I$  é a eficiência Global reduzida ou seja, a eficiência de coleta devido exclusivamente ao campo centrífugo (Equação 13) e  $\eta$  é a eficiência individual de coleta (Equação 14).

$$E_G = (1 - R_L)I + R_L \quad (12)$$

$$I = \int_0^1 \eta dX \quad (13)$$

$$\eta = \frac{e^{\left(\frac{5D_p}{d^*}\right)^2 - 1}}{1 + e^{\left(\frac{5D_p}{d^*}\right)^2 + 146}} \quad (14)$$

Massarani (2002) afirma que Equação 13, quando as partículas da alimentação seguem uma distribuição de tamanho de acordo com o modelo RRB, pode ser substituída pela Equação 15, considerando  $k$  e  $n$  os parâmetros do modelo RRB.

$$I = \frac{1,13n}{0,138 + n} \left(\frac{k}{d^*}\right) \left(1,44 - 0,279n + \left(\frac{k}{d^*}\right)\right) \quad (15)$$

Se houver um caso em que a Equação 15 não se aplica, é possível obter  $I$  conforme o conceito de integração, calculando a área sob a curva de distribuição numericamente. A Equação 16 apresenta o cálculo da concentração volumétrica dos sólidos no *underflow* ( $C_{vu}$ ), obtida combinando as Equações 12 e 16.

$$C_{vu} = \frac{E_G C_V}{R_L - R_L C_V + E_G C_V} \quad (16)$$

### Proposta de Medronho (1984) e Antunes e Medronho (1992)

Segundo Peçanha (2014), nos hidrociclones atuam dois efeitos simultâneos, o que dificulta a análise de desempenho do equipamento. Castilho e Medronho (2000)

sugeriram avaliar os hidrociclones baseando-se em estudos experimentais, onde são contemplados três grupos de interesse, os números adimensionais de Stokes ( $Stk^*$ ), Euler ( $Eu$ ) e Reynolds ( $Re$ ) para a definição da configuração geométrica dos hidrociclones.

As correlações foram desenvolvidas por Medronho (1984) para a geometria Rietema e para os hidrociclones Bradley foram incrementadas por Antunes e Medronho (1992). A primeira etapa de dimensionamento de hidrociclones consiste em definir a vazão ( $Q$ ) usando a Equação 17 para a família Bradley ou a Equação 18 para a família Rietema (PEÇANHA, 2014; CASTILHO, MEDRONHO, 2000).

$$D_C = \frac{3,5 \rho_f^{0,31} Q^{0,54}}{\mu^{0,085} \Delta p^{0,23}} \quad (17)$$

$$D_C = \frac{4,0 \rho_f^{0,27} Q^{0,51}}{\mu^{0,028} \Delta p^{0,24}} \quad (18)$$

A partir do conhecimento da vazão ( $Q$ ), e se conhecido a vazão de alimentação total do processo ( $Q_A$ ), define-se o número de hidrociclones que devem ser agrupados em paralelo para o melhor desempenho do sistema. Para essa finalidade, emprega-se novamente a Equação 11.

O procedimento seguinte visou a determinação do  $d^*$ . Para certa geometria, os equipamentos contêm as mesmas proporções geométricas entre o número de Stokes e o número de Euler ( $Stk^* Eu$ ) e são aproximadamente constantes e podem ser determinados pela Equação 19 (SVAROVSKY, 1981).

$$Stk^* Eu = \frac{\pi d^{*2} (-\Delta p) D_C (\rho)}{\mu \rho Q} \quad (19)$$

De modo a obter a relação ( $Stk^* Eu$ ) são empregadas as Equações 20 a 23, cujos parâmetros  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $n_1$  a  $n_6$  são definidos na Tabela 3 (CASTILHO e MEDRONHO, 2000).

$$Stk^* Eu = k_1 \left[ \ln \frac{1}{R_L} \right]^{n_1} e^{(n_2 c_v)} \quad (20)$$

$$Eu = k_2 Re^{n_3} e^{(n_4 c_v)} \quad (21)$$

$$R_L = k_3 \left[ \frac{D_u}{D_C} \right]^{n_5} Eu^{n_6} \quad (22)$$

$$Re = \frac{4\rho Q}{\pi\mu D_C} \quad (23)$$

Tabela 3 – Parâmetros equacionais para configuração Bradley e Rietema.

Parâmetros	Bradley	Rietema
$k_1$	0,055	0,0474
$k_2$	258,0	371,5
$k_3$	1,21.10 <sup>6</sup>	1218
$n_1$	0,66	0,74
$n_2$	12,0	9,0
$n_3$	0,37	0,12
$n_4$	0,0	-2,12
$n_5$	2,63	-1,12
$n_6$	4,75	-0,30

Fonte: Adaptado de Castilho e Medronho (2000)

Assim, conhecendo o  $d^*$ , as dimensões do hidrociclone são obtidas, respeitando as proporções divulgadas na Tabela 2.

Outra análise é a concentração do produto que sai na corrente *underflow* ( $c_{vu}$ ). Sua determinação ocorreu por intermédio da análise de eficiência global de coleta ( $E_G$ ). Para obter a eficiência global, primeiramente definiu-se a eficiência individual de coleta ( $E_i$ ) integrando a função da Grade eficiência ( $G'(X)$ ), conforme a Equação 24, em que  $X$  corresponde ao modelo de distribuição granulométrica RRB ou GGS. Nesse caso, empregou-se unicamente o conceito de integral. Assim sendo, a eficiência global de coleta determinada de acordo com a Equação 25.

$$E_i = \int_0^1 G'(X) dX \quad (24)$$

$$E_G = \frac{E_i - R_L}{1 - R_L} \quad (25)$$

## Validação do Módulo Hidrociclone

A fim de exemplificar e validar o desempenho do aplicativo, foram propostos 3 estudos de caso para o Módulo Hidrociclone. Esses casos são exercícios propostos por Massarani (2002), comumente ensinados em salas de aulas na disciplina de Operações Unitárias, ministrada em diversos cursos de formação superior, como Engenharias de Alimento, de Produção, Ambiental e principalmente Engenharia Química.

Caso 1: Hidrociclone Bradley a partir da análise granulométrica: Neste caso, desejou-se definir uma bateria de hidrociclones do tipo Bradley, no qual o diâmetro cilíndrico  $D_C=6$  cm e o diâmetro no *underflow*  $D_u=0,8$  cm. Alimentou-se a suspensão na vazão de  $50 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  com pressão de 50 psi, sendo uma solução aquosa com 1% de carbonato de cálcio. Considerou-se para tal, as propriedades do fluido, massa específica de  $1 \text{ g cm}^{-3}$  e viscosidade de 1 cp, com os dados da análise granulométrica da Tabela 4.

Tabela 4-Distribuição granulométrica (Caso1).

$D_p$ ( $\mu\text{m}$ )	5	10	15	20	30	40
X (%)	12	29	46	60	80	92

Fonte: Adaptado de Medronho (2012).

Caso 2: Hidrociclone Rietema a partir da análise granulométrica: De modo semelhante ao caso anterior, o estudo envolveu a averiguação do uso de hidrociclones Rietema, em um processo industrial para separação de partículas com massa específica de  $2,4 \text{ g cm}^{-3}$  e concentração volumétrica ( $C_{vu}$ ) de 9%. O equipamento utilizado para o estudo possuía dimensões de 1 cm e 0,27 cm para os diâmetros da parte cilíndrica e do *underflow*, respectivamente, enquanto o fluido no processo apresentou massa específica de  $1 \text{ g cm}^{-3}$  e viscosidade de 1 cp. Sua operação ocorreu a uma pressão de 30 psi e vazão de  $12,96 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ . Para este processo, contemplou-se a distribuição granulométrica organizada na Tabela 5.

Tabela 5-Distribuição granulométrica (Caso 2).

$D_p$ ( $\mu\text{m}$ )	2	4	6	8	10	14	20
X (%)	35,5	59,0	72,0	80,5	86,0	92,0	96,0

Fonte: Medronho (2012).



Caso 3: Hidrociclone Rietema a partir dos parâmetros do modelo RRB: O desenvolvimento deste caso baseou-se no estudo anterior, utilizando os parâmetros ajustados para o modelo RRB, mencionado no caso 8, bem como a replicação das variáveis de modo a averiguar consistência nos resultados entre as duas funcionalidades do aplicativo.

## RESULTADOS

### Caso 1: Hidrociclone Bradley a partir da análise granulométrica

Para analisar este caso, o usuário primeiramente selecionou a configuração do hidrociclone Bradley e em seguida, escolheu-se a opção 1, distribuição granulométrica para inclusão de dados como visto na Figura 4.

Após esse momento, o usuário ainda informou as demais variáveis, como pressão, concentração volumétrica na alimentação, vazão e as propriedades físicas, além é claro da distribuição granulométrica.

Para a situação do módulo de hidrociclone o usuário tem opção de calcular conforme método apresentado por Massarani (2002) ou Medronho (2012). Neste cenário, ao escolher o primeiro método mencionado, resultou em valores menores que o aguardado pela atividade, totalizando 16 hidrociclones em paralelo, com diâmetro de corte equivalente  $4,17 \mu\text{m}$  para um sistema operando a 89,5 % de eficiência e concentração no duto *underflow* de  $0,0317 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ . Estes resultados estão disponíveis na Figura 5.

Ao optar pelo método de Medronho (2012), foi encontrado um sistema com 18 hidrociclones para remoção de partículas de  $4,46 \mu\text{m}$  e eficiência de 91,60 %. A concentração encontrada no duto *underflow* foi de  $0,0414 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ . Esses resultados estão disponíveis na Figura 6. Observou-se nas Figuras 5 e 6, que o modelo de distribuição de tamanho que melhor representou os dados experimentais foi o RRB ( $R^2=0,9998$ ), em que cerca de 63,3% das partículas da amostra são menores que  $21,17 \mu\text{m}$ .

O método de Medronho (2012) foi o que alcançou valor mais próximo aos resultados apresentados pelo autor, uma vez que se esperava uma configuração de 18 hidrociclones agrupados paralelamente com eficiência global

92% e concentração do *underflow* de  $0,042 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ . Além disso, ao comparar os dois métodos, vemos que o método de Medronho predisse um valor maior de  $d^*$ .

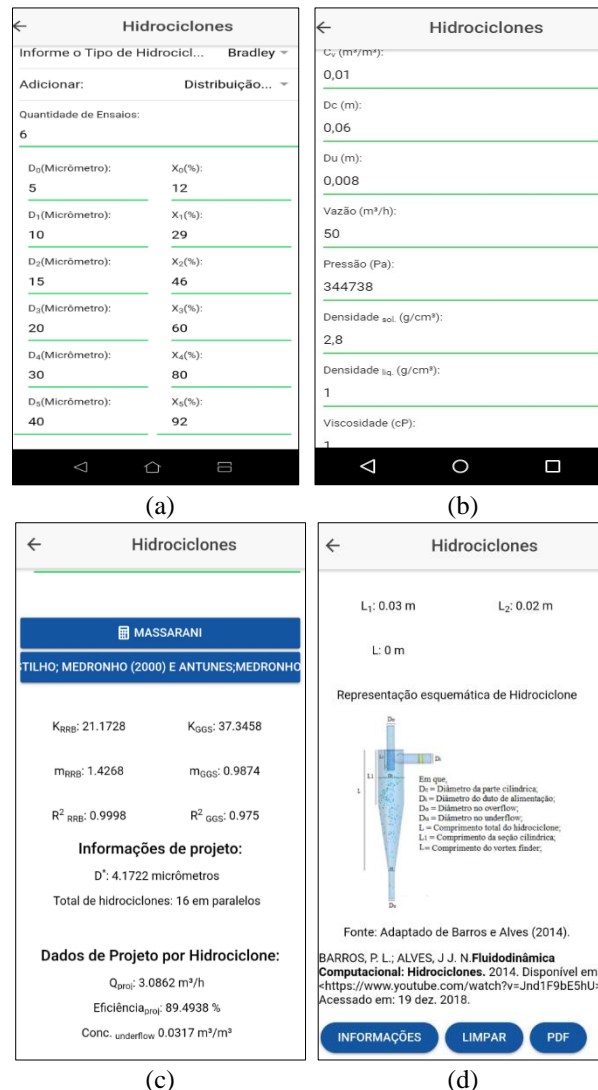


Figura 5: Resultados do Caso 1 de acordo com o método de Massarani (2002).

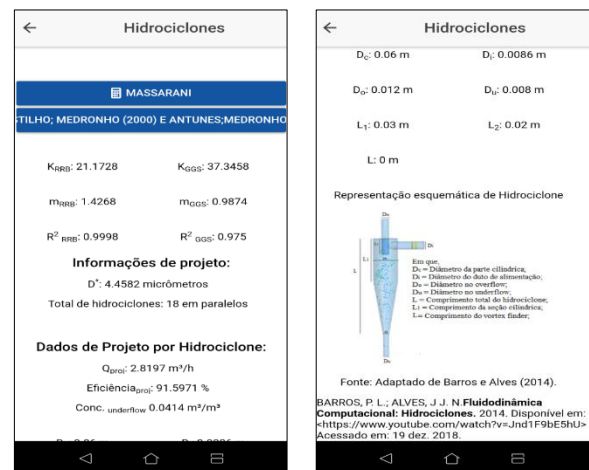


Figura 6 – Resultados de acordo com o método de Medronho (1984).



Isto foi justificado por Peçanha (2014), que afirmou que o processo de retiradas das partículas nesses equipamentos envolve dois mecanismos, uma corrente passante e outra fluida, o que dificulta a análise do equipamento com os conceitos apresentados por Massarani (2002), envolvendo tempo de queda e tempo de residência. Por essa razão, as equações que consideram os dados experimentais, portanto, as correlações de dados, melhor caracterizam o desempenho dos hidrociclones, como é demonstrado por Medronho (2012).

### Caso 2: Hidrociclone Rietema a partir da análise granulométrica

Apoiado às condições operacionais deste estudo, o usuário do PEIQ precisou configurar o aplicativo para trabalhar com hidrociclone Rietema, além de definir a quantidade de amostras da distribuição granulométrica e seus valores. Considerou neste caso apenas o método de Castilho e Medronho (2000) para hidrociclones Rietema. O resultado do dimensionamento da bateria de hidrociclones Rietema se encontra na Figura 7.

Hidrociclones	
$K_{RRB}$ : 4.7628	$K_{GGS}$ : 16.1155
$m_{RRB}$ : 0.866	$m_{GGS}$ : 0.4279
$R^2_{RRB}$ : 0.9939	$R^2_{GGS}$ : 0.9146
<b>Informações de projeto:</b>	
D*: 4.5987 micrômetros	
Total de hidrociclones: 74 em paralelos	
<b>Dados de Projeto por Hidrociclone:</b>	
Q <sub>proj</sub> : 0.1748 m <sup>3</sup> /h	
Eficiência <sub>proj</sub> : 58.9392 %	
Conc. underflow 0.155 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	
D <sub>c</sub> : 0.01 m	D <sub>i</sub> : 0.0028 m
D <sub>o</sub> : 0.0034 m	D <sub>u</sub> : 0.0027 m
L <sub>1</sub> : 0 m	L <sub>2</sub> : 0.004 m

Figura 7 – Resultados do Caso 2, hidrociclone Rietema obtido pelo método de Antunes e Medronho (1992).

Observa-se que o aplicativo sugeriu a necessidade de uma bateria de hidrociclones Rietema composta por 74 hidrociclones, atingindo assim, uma eficiência global de coleta aproximada de 58,94%. Estes resultados foram bem condizentes ao apresentado por Medronho (2012). Conforme o autor, a melhor solução seria a adição de 74 hidrociclones alinhados em paralelo, para conseguir uma eficiência de 59% no processo.

Além das informações coerentes com Medronho (2012), o aplicativo ainda trouxe os parâmetros de modelo RRB, obtendo-se bom ajuste de dados para este modelo ( $R^2= 0,9939$ ), além do diâmetro de corte equivalente a 4,60  $\mu\text{m}$ .

Como houve boa coerência nos resultados aguardados, tanto para a configuração Rietema (caso 2), quanto para a Bradley (caso 1), considerou que o método aplicando a análise granulométrica funcionou de forma eficiente no aplicativo.

### Caso 3: Hidrociclone Rietema a partir dos parâmetros do modelo RRB

Neste estudo de caso, as informações foram mantidas como no Caso 2, mas ao invés de inserir os dados experimentais de distribuição de tamanho, o usuário informou diretamente os parâmetros do Modelo RRB, como mostra a Figura 8. Posteriormente, foram inseridas as demais condições operacionais resumidas na Tabela 6.

O resultado disponibilizado no PEIQ e as dimensões sugeridas para os hidrociclones estão na Figura 8. Notou-se resultado idêntico ao caso anterior (eficiência global de coleta de 59% com organização de 74 hidrociclones Rietema). Assim, ficou registrado que o usuário pode fornecer os parâmetros dos modelos diretamente ou ajustar tais parâmetros.

Com a apresentação dos estudos de casos (Tabela 6), verificou-se baixo percentual de erro comprovando boa coerência do aplicativo quanto às funcionalidades propostas neste módulo.



Figura 8 – Inserção dos dados de simulação (a, b, c) e resultado do Caso 3 (d).

Tabela 6 – Resumo dos estudos de casos apresentados no módulo “Hidrociclone”.

Informações dos enunciados			Resultados		Desvio (%)	
			Esperados	PEIQ		
Caso 1	Dc = 6 cm	1% CaCO <sub>3</sub>	Medronho (2012)	18 hidrociclones	18 hidrociclones	0,00
	Du = 0,8 cm	P = 50 psi		Bradley	Bradley (Medronho)	0,43
	Q <sub>A</sub> = 50 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	μ = 1 cP		E <sub>G</sub> = 92%	E <sub>G</sub> = 91,6%	0,43
	ρ = 1,00 g cm <sup>-3</sup>	ρ <sub>s</sub> = 2,8 g cm <sup>-3</sup>		C <sub>vu</sub> = 0,42 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	C <sub>vu</sub> = 0,414 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	1,43
Caso 2	Dc = 1 cm	C = 9%	Medronho (2012)	74 hidrociclones	74 hidrociclones	0,00
	Du = 0,27 cm	P = 30 psi		Rietema	Rietema	0,10
	Q <sub>A</sub> = 12,96 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	μ = 1 cP		E <sub>G</sub> = 59%	E <sub>G</sub> = 58,94%	0,10
	ρ = 1,00 g cm <sup>-3</sup>	ρ <sub>s</sub> = 2,4 g cm <sup>-3</sup>				
Caso 3	Dc = 1 cm	C = 9%	Medronho (2012)	74 hidrociclones	74 hidrociclones	0,00
	Du = 0,27 cm	P = 30 psi		Rietema	Rietema	0,10
	Q <sub>A</sub> = 12,96 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	μ = 1 cP		E <sub>G</sub> = 59%	E <sub>G</sub> = 59%	0,10
	ρ = 1,00 g cm <sup>-3</sup>	ρ <sub>s</sub> = 2,4 g cm <sup>-3</sup>				
	D <sub>RRB</sub> = 4,7628 μm	n <sub>RRB</sub> = 0,866				

## CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados neste trabalho, considerou-se que o aplicativo atendeu aos objetivos de usabilidade, uma vez que ele foi desenvolvido com aparência limpa, simples e intuitiva.

A estrutura do aplicativo possibilita aos usuários condições de obter o dimensionamento dos hidrociclones, auxiliando na aprendizagem e avaliação destes equipamentos. É uma tecnologia de desenvolvimento rápido, fácil de compreender e que atende a diferentes plataformas. Além disso, há a possibilidade de utilização em qualquer momento e lugar.

O aplicativo disponibilizou diversas opções de entrada de dados, variáveis e

funcionalidades, apresentando aos usuários uma gama de possibilidades de trabalhar dentro dos módulos. A opção de imprimir ou compartilhar seus resultados em arquivo PDF facilita a discussão entre os alunos, professores e profissionais da área.

Em relação à parte técnica, o aplicativo demonstrou boa coerência com os resultados dos estudos apresentados nos livros didáticos do curso de Operações Unitárias.

Foi possível abordar diversos tipos de problemas que são comuns na separação sólido-fluido usando hidrociclones. Assim, sua versatilidade permite trabalhar diversas aplicações em sala de aula e verificar o efeito das variáveis de processo sobre a eficiência de coletar de forma simples e rápida.

## NOMENCLATURA

- A, B, C – Parâmetros relacionados à família do hidrociclone [-]
- $C_V$  – Concentração volumétrica de sólidos na alimentação [ $L^3L^{-3}$ ]
- $C_{vu}$  – Concentração volumétrica de sólidos no underflow [ $L^3L^{-3}$ ]
- $d^*$  – Diâmetro de corte das partículas [L]
- $D_C$  – Diâmetro da parte cilíndrica [L]
- $D_i$  – Diâmetro da secção de entrada [L]
- $D_o$  – Diâmetro do overflow [L]
- $D_p$  – Diâmetro de partícula [L]
- $D_u$  – Diâmetro do underflow [L]
- $E_G$  – Eficiência global de coleta [-]
- $Eu$  – Número de Euler
- $G'(X)$  – Função de grade de eficiência [-]
- $I$  – Eficiência Global reduzida [-]
- $k$  – Parâmetro do modelo GGS [L]
- $k_1 a k_3$  – Parâmetro da família do hidrociclone [-]
- $K$  – Parâmetro da família do hidrociclone [-]
- $L$  – Comprimento total do hidrociclone [L]
- $L_1$  – Altura da secção cilíndrica [L]
- $L_2$  – Altura do *vortex finder* [L]
- $m$  – Parâmetro do modelo GGS [-]
- $N_H$  – Número de hidrociclones [-]
- $n_1 a n_6$  – Parâmetro da família do hidrociclone [-]
- $Q$  – Vazão de alimentação individual do hidrociclone [ $L^3T^{-1}$ ]
- $Q_A$  – Vazão de alimentação total do processo [ $L^3T^{-1}$ ]
- $Re$  – Número de Reynolds [-]
- $R_L$  – Razão de líquido [-]
- $Stk^*$  – Número de Stokes [-]
- $u_c$  – Velocidade de projeto na secção cilíndrica [ $LT^{-1}$ ]
- $X, Xi$  – Fração mássica acumulativa [-]

### Símbolos

- $\beta$  – Número de Euler, constante para cada família de hidrociclone [-]
- $\theta$  – Ângulo da parte cônica do hidrociclone [grau]
- $\mu$  – Viscosidade do fluido [ $ML^{-1}T^{-1}$ ]
- $\rho$  – Massa específica do fluido [ $ML^{-3}$ ]
- $\rho_s$  – Massa específica do sólido [ $ML^{-3}$ ]
- $\eta, E_i$  – Eficiência individual de coleta de partículas
- $\Delta p$  – Queda de pressão [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]

## REFERÊNCIAS

- ANTUNES, M.; MEDRONHO, R. A. (1992), Bradley Hydrocyclones: Design and Performance Analysis. In: L. Svarovsky, Hydrocyclones: Analyses and Application. England: Springer Science + Business Media, v. 12, cap. 1, p. 3-13.
- BARROS, P. L.; ALVES, J. J. N. (2014). Fluidodinâmica Computacional: Hidrociclones, Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Jnd1F9bE5hU>> Acessado em 19 dez. 2018.
- CASTILHO, L. R.; MEDRONHO, R. A. (2000). A Simple Procedure for Design and Performance Prediction of Bradley and Rietema Hidrociclone, Rev. Mineral Engineering, v. 13, n. 2, p. 183-191.
- CREMASCO, M. A. (2012), Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidodinâmicos, São Paulo, Ed. Edgard Blucher Ltda, 423 p.
- EL-KASSAS, W. S.; ABDULLAH, B. A.; YOUSEF, A. H.; WAHBA, A. M. (2017). Taxonomy of Cross-Platform Mobile Application Development Approaches, Ain Shams Engineering Journal, vol. 8, p. 163-190.
- MASSARANI, G. (2002), Fluidodinâmica em Sistemas Particulados, 2ª ed., Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais.
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. (2004), Unit Operations of Chemical Engineering, 7th ed., McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1140 p.
- MEDRONHO, R. A. (2012), Lista de Exercícios de Operações Unitárias I. Rio de Janeiro, Notas de aulas da disciplina de Operações Unitárias, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. <https://sites.google.com/a/poli.ufrj.br/quimica/operacoesunitarias1>. Acessado em 30 jun. 2018.
- PEÇANHA, R. P. (2014), Sistemas Particulados: Operações Unitárias Envolvendo Partículas e Fluidos. 1 ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 399 p.
- SILVA, S.; SOUSA, M. R. P.; AUM, Y. K. P. G.; BRAGA, N. P. (2018), Análise de Métodos para Solução de Problemas de Engenharia de Processos por Estudantes de Operações Unitárias, Brazilian Journal of Development, vol. 4, n. 5, p. 2616-2627.

- SILVA, V. P.; LIMA, D. H. D. (2016),  
Desenvolvimento de Aplicativos Híbridos:  
Benefícios e Problemas Encontrados na  
Utilização dessas Tecnologias, Encontro de  
Pesquisa e Extensão, 3, Patrocínio: IFTM,  
Anais, p. 398-404.
- SVAROVSKY, L. (1981), Solid-Liquid  
Separation, 2<sup>th</sup> ed., London, Ed.  
Butterworths, 556 p.