



APLICATIVO MÓVEL “PEIQ” COMO FERRAMENTA NO ENSINO E DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE ELUTRIAÇÃO DE PARTICULADOS

KÁSSIA G. SANTOS^{1*}, GISELE M. LIMA¹

¹Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica. *e-mail: kassia.santos@uftm.edu.br

RESUMO – A inserção das tecnologias no ensino e aprendizagem tem ganhado destaque nas mais diversas áreas da educação. Neste contexto, o presente trabalho desenvolveu um aplicativo móvel para facilitar projetos de separação de particulados por meio de elutriação. O aplicativo contempla opções de ajuste dos parâmetros de modelos de distribuição granulométrica, dimensionamento de elutriadores em série e separação de sólidos de densidades diferentes por elutriação. A fim de validar o aplicativo, foram resolvidos 3 estudos de caso, propostos por Massarani. A ferramenta proposta é gratuita e pode ser utilizada por docentes, discentes e profissionais de vários cursos de engenharia.

INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos estão cada vez mais presentes na sociedade, seja para uso pessoal, entretenimento, ou para fins profissionais, científicos e educacionais.

O processo de ensino-aprendizagem na graduação de Engenharia Química precisa evoluir no processo de capacitação dos alunos e ampliar as possibilidades de desenvolvimento de novos conhecimentos. Neste sentido, a utilização de metodologias ativas de ensino (Mangucci *et al.*, 2020; Almeida e Santos, 2020; Santos *et al.*, 2020) e das tecnologias pode promover a exposição dos conteúdos de forma mais prática, a fim de conhecer, projetar, desenvolver e avaliar equipamentos da indústria química (Cremasco, 2005; Lima e Santos, 2019a; Almeida *et al.*, 2020).

Os dispositivos móveis, como smartphones e tablets com acesso à internet, são as tecnologias que mais se destacam, devido ao rápido acesso a funcionalidades dos dispositivos e à facilidade de disseminar e compartilhar informações. Assim, o sistema educacional tem buscado sua inserção para promover e potencializar o aprendizado de conteúdos disciplinares, contribuindo para a formação profissional (Silva *et al.*, 2020; Freitas e Santos, 2021).

A elutriação é uma operação de separação entre sólidos que ocorre na presença de um fluido e em campo gravitacional. Esse fluido tem o objetivo de realizar o arraste seletivo das partículas separando-as de acordo com as diferenças nas características físicas como tamanho das partículas, massa específica ou formato de um mesmo sólido ou entre dois sólidos (Peçanha, 2014).

O processo de elutriação começou a ser empregado industrialmente nas operações metalúrgicas, visto a necessidade de separar os minérios com valor agregado da parcela sem valor comercial, chamada de gangas (Peçanha, 2014). A realização deste tipo de separação objetiva recuperar partículas finas, para isso utiliza-se de um equipamento denominado elutriador.

Os elutriadores são constituídos por uma câmara vertical com dois dutos de alimentação. Próximo ao topo da coluna é alimentado o material alvo da separação que se junta ao fluido com fluxo ascendente presente no tubo próximo à base do equipamento (Massarani, 2002).

A separação das partículas nesses equipamentos ocorre devido à diferença entre a velocidade média do fluido e a velocidade terminal das partículas. De tal maneira que é possível se deparar com três situações durante

o processo (Peçanha, 2014): a) a velocidade média do fluido é maior que a velocidade terminal, então a velocidade das partículas é positiva e elas são elutriadas; b) as velocidades terminal e média do fluido são idênticas. Neste caso, as partículas permanecem paradas no equipamento e, c) a velocidade média do fluido é menor que a velocidade terminal das partículas, logo, as partículas ficam retidas.

Na prática, durante o processo de desenvolvimento de um projeto, avaliação ou realização de ajustes operacionais neste equipamento, almeja-se determinar o tamanho das partículas que ficam em estado estacionário no equipamento quando expostas a uma dada velocidade de elutriação. A partir dessas informações, sabe-se que partículas maiores serão retidas e as menores acompanham o fluido, portanto, são elutriadas (Peçanha, 2014).

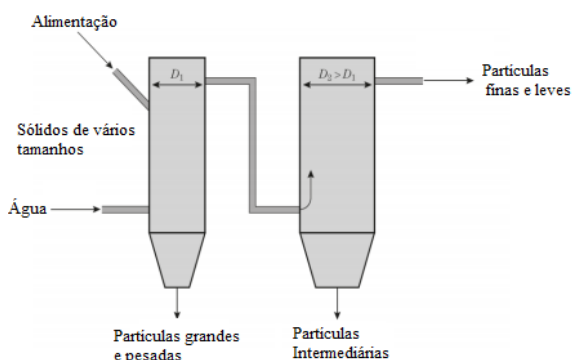


Figura 1 – Sistema de elutriadores em série.
Fonte: Peçanha (2014).

Para obter um melhor resultado na separação, os elutriadores também podem ser acoplados em série, como mostra a Figura 1. Neste caso, os equipamentos, normalmente possuem diâmetros diferentes, e as partículas são carregadas pelo fluido em um equipamento e alimentadas em uma nova coluna, refinando cada vez mais o processo de separação (Peçanha, 2014).

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 o desenvolvimento de um aplicativo móvel para projetos de equipamentos de separação sólido-fluido (Lima e Santos, 2019 b). O aplicativo foi nomeado como “Projetando Equipamentos da Indústria Química (PEIQ)”. Esta ferramenta auxilia não

só os alunos durante a aprendizagem, mas também aos profissionais da área que tem uma ferramenta coadjuvante para avaliação deste equipamento.

Neste trabalho será apresentado o módulo de projeto de elutriadores e sua validação por meio da simulação de exercícios do livro de Massarani (2022), um dos mais empregados na disciplina de Operações Unitárias.

MÉTODOS

Desenvolvimento do Aplicativo móvel

O aplicativo móvel “Projetando Equipamentos da Indústria Química (PEIQ)”, foi desenvolvido na Universidade Federal do Triângulo Mineiro. 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 Figura 2a apresenta o módulo “Página Inicial” trazendo informações como logomarca, nome do aplicativo e o esboço das telas destinadas aos equipamentos.

O aplicativo foi estruturado em módulos contemplando vários equipamentos de separação. É importante ressaltar que as unidades de medida empregadas nos cálculos internos do aplicativo se encontram no sistema CGS. Apenas algumas unidades são pedidas nas unidades de MKS e são transformadas internamente. O app também contém um módulo de transformação de unidades.

Os módulos destinados aos equipamentos de separação foram padronizados contendo sempre os botões “Calcular”, “Informações”, “Limpar” e “PDF”. Sempre que quiser simular ou corrigir alguma informação, o usuário deve limpar os dados e reiniciar a simulação.



Figura 2: Módulo Inicial e o *layout* dos equipamentos.

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 os valores do aplicativo com atividades apresentadas por diversos autores de livros didáticos da disciplina de operações unitárias.

Equacionamento do Módulo Elutriador

Na aba principal do Módulo Elutriador (Figura 2b) é possível escolher a opção de projetar elutriadores em série ou um único elutriador. Quanto ao tamanho das partículas alimentadas no equipamento, o usuário pode inserir a distribuição de tamanho na forma de dados discretos ou através do modelo que melhor representa o tamanho das partículas, sendo disponíveis os modelos GGS, RRB e Sigmoide.

No elutriador, a menor partícula que é retida no equipamento é aquela que apresenta uma velocidade terminal igual a velocidade de fluido, a qual denominamos o diâmetro de corte (d^*) do elutriador. Todas as partículas maiores que d^* serão coletas e as menores serão arrastadas para o topo.

O aplicativo permite explorar três tipos de cenários que serão exemplificados nos estudos de caso apresentados neste trabalho.

As duas primeiras opções do menu do elutriador (Figura 2b) são para simulações de elutriadores em série (“Elutriadores em série” e “Faixa Granulométrica”), em que se realiza separação por faixas de tamanho. As demais opções (“Distribuição Granulométrica”, “Modelo GGS”, “Modelo RRB”, “Modelo Sigmoide”) são empregadas para separação de sólidos com densidades diferentes.

A fim de exemplificar e validar o desempenho do aplicativo, serão estudados 1 exemplo de cada cenário.

Tipo 1: Deseja-se encontrar as faixas de tamanho de partícula coletadas em cada elutriador. Neste caso deve-se habilitar a opção “Elutriadores em série”.

Para os problemas do Tipo 1 são conhecidos, além das propriedades dos sólidos e do fluido, dados da vazão de operação do fluido (Q_A) e do diâmetro das colunas (D_c).

Assim, a velocidade do fluido de arraste em cada coluna pode ser obtida pela Equação 1.

$$u = \frac{4Q_A}{\pi D_c^2} \quad (1)$$

Apesar da maioria dos elutriadores operarem em baixas vazões, o que configuraria a dinâmica das partículas no regime de Stokes, opta-se pelo cálculo de d^* pela sequência de correlações de Coelho e Massarani (1996). Assim, calcula-se Re_p/C_D pela Equação 2, o Número de Reynolds da partícula (Re_p) pela Equação 3 e posteriormente o d^* pela definição de Re_p , Equação 4.

$$\frac{C_D}{Re_p} = \frac{4}{3} \frac{\mu g (\rho_s - \rho)}{\rho^2 u^3} \quad (2)$$

$$Re_p = \left[\left(\frac{24 Re_p}{K_1 C_D} \right)^{(n/2)} + \left(\frac{K_2 Re_p}{C_D} \right)^n \right]^{(1/n)} \quad (3)$$

$$d^* = \frac{Re_p \mu}{\rho v_t} \quad (4)$$

em que C_D é o coeficiente de arraste, μ é a viscosidade do fluido, g é a aceleração da gravidade e ρ_s e ρ são as massas específicas das partículas e do fluido, respectivamente.

Os coeficientes K_1 e K_2 são empregados para partículas irregulares, definidos pelas Equações 5 e 6, respectivamente. O expoente n é 0,88 para partículas esféricas e 1,3 para partículas não esféricas (Massarani, 2002).

$$K_1 = 0,843 \log \frac{\phi}{0,065} \quad (5)$$

$$K_2 = 5,31 - 4,88\phi \quad (6)$$

em que ϕ é a esfericidade.

Tipo 2: A partir de uma faixa de tamanho de coleta desejada, encontrar a velocidade terminal das partículas de corte de cada elutriador. Assim, o usuário poderá definir a combinação de vazão e de diâmetro de coluna para dimensionar o sistema de elutriadores em série. Para este caso deve-se habilitar a opção “Faixa Granulométrica” (Figura 2b).

Neste cenário, a determinação da velocidade terminal de um processo necessitou do usuário a informação das faixas granulométricas. Neste caso, os cálculos também foram replicados para cada faixa.

Uma vez conhecido o diâmetro das partículas, aplicou a Equação 7 em cada faixa para obter a relação ($C_D Re_p^2$). Posteriormente obteve-se o número de Reynolds (Re) através da correlação de Coelho e Massarani (1996), Equação 8. A velocidade de arraste das partículas, ou velocidade de elutriação (v_t) foi então obtida pela definição do Re_p , de acordo com a Equação 9.

$$C_D Re_p^2 = \frac{4(\rho_s - \rho)\rho g d^*{}^3}{3\mu^2} \quad (7)$$

$$Re_p = \left[\left(\frac{24}{K_1 C_D Re_p^2} \right)^n + \left(\frac{C_D Re_p^2}{K_2} \right)^{\frac{n}{2}} \right]^{-\frac{1}{n}} \quad (8)$$

$$v_t = \frac{Re_p \mu}{\rho d^*} \quad (9)$$

O expoente n da Equação 8 é 0,95 para partículas esféricas e 1,2 para partículas não esféricas (Massarani, 2002).

Tipo 3: Está relacionado à separação de materiais de propriedades diferentes em um único elutriador de tamanho conhecido, a fim de obter as concentrações sólidos nas correntes de topo e de fundo.

Este tipo de cenário pode ser resolvido habilitando a função “Distribuição Granulométrica”, caso o usuário tenha os dados discretos da distribuição de tamanho da mistura dos dois sólidos. Caso seja conhecidos os modelos de distribuição de tamanho, pode-se habilitar as outras funções de acordo com o tipo do modelo fornecido, como mostra a Figura 2b.

As Equações 10 a 12 apresentam a fração mássica acumulativa (X) em função do diâmetro de partícula (D_p), de acordo com os modelos GGS, RRB e Sigmoide, respectivamente.

$$X = \left(\frac{D_p}{k} \right)^m \quad (10)$$

$$X = 1 - e^{-\left(\frac{D_p}{D'} \right)^n} \quad (11)$$

$$X = \left[1 + \left(\frac{D_{50}}{D_p} \right)^p \right]^{-1} \quad (12)$$

Neste cenário, o tamanho das partículas é conhecido, mas deseja-se escolher a velocidade de fluido de elutriação na qual uma das correntes saia pura com o sólido desejado.

Se a distribuição de tamanho for similar, as partículas mais densas (material 1 ou A) têm propensão a serem coletadas no equipamento, enquanto as menos densas (material 2 ou B) irão compor a corrente de topo.

Para que a corrente de topo saia limpa, ou concentrada no componente menos denso, é necessário garantir que a menor partícula do material denso seja coletada no elutriador. Assim, o aplicativo irá selecionar a menor partícula do material denso (A) como sendo o d_A^* , a fim de obter qual sua velocidade terminal. Para isso, calcula-se $C_D Re_p^2$ pela Equação 7, o Número de Reynolds da partícula A pela Equação 8 e a velocidade terminal da partícula A (v_{tA}) pela Equação 9. Desta forma, sabe-se que a velocidade de fluido de arraste deve ser igual a v_{tA} . Fixada a velocidade do fluido de arraste, pode-se então encontrar qual é o diâmetro de corte da partícula B, menos densa, que possui velocidade terminal $v_{tB} = v_{tA} = u$.

Para encontrar o d_B^* , estima-se C_D/Re_p por meio da Equação 2, o Re_p pela Equação 3 e por fim d_B^* pela Equação 4.

Conhecendo-se a distribuição de tamanho inicial de ambos os sólidos e também a proporção de massa entre os sólidos A e B , é possível encontrar o percentual em massa de cada sólido que foi coletado no equipamento, em relação ao alimentado, ou seja, a eficiência de coleta global de cada sólido (η).

Assim as frações mássicas de composições de topo (y_A e y_B) e fundo (x_A e x_B) podem ser calculadas, de acordo as Equações 13 a 16.

$$y_A = \frac{prop_A(1-\eta_A)}{prop_A(1-\eta_A) + prop_B(1-\eta_B)} \quad (13)$$

$$y_B = \frac{prop_B(1-\eta_B)}{prop_A(1-\eta_A) + prop_B(1-\eta_B)} \quad (14)$$

$$x_A = \frac{prop_A(\eta_A)}{prop_A(\eta_A) + prop_B(\eta_B)} \quad (15)$$

$$x_B = \frac{prop_B(\eta_B)}{prop_A(\eta_A) + prop_B(\eta_B)} \quad (16)$$

sendo que $prop_A$ e $prop_B$ são relativas à proporção dos componentes A e B na mistura alimentada. Por exemplo, se a alimentação é composta na proporção de 4 partes de A para 1 parte de B , temos que $prop_A=4$ e $prop_B=1$.

Validação do Módulo Elutriador

A fim de validar o aplicativo, foram propostos 3 estudos de caso para o Módulo Elutriador. Esses casos são exercícios propostos por Massarani (2022), comumente ensinados em salas de aulas na disciplina de Operações Unitárias, ministrada em diversos cursos de formação superior, como Engenharias de Alimento, Produção, Ambiental, principalmente Engenharia Química.

Caso 1: Elutriadores em série: Na primeira situação deste módulo foi realizado um processo de elutriação de 25 g de um pó presente na água a 30°C e vazão operacional de 37 cm³.min⁻¹. A elutriação foi realizada em um sistema com 4 colunas em série. A Tabela 1 apresenta os diâmetros das colunas e a massa de pó coletada na base de cada equipamento.

A partir destes dados, pede-se para encontrar qual a faixa de tamanho de partícula retida em cada elutriador. A massa específica do sólido foi 1,8 g.cm⁻³ e a viscosidade do fluido de 1,005 cP (Massarani, 2002).

Para este caso, foi habilitado no app a opção “Elutriadores em série” (Figura 2b).

Tabela 1– Diâmetro das colunas de elutriação e massa de sólidos coletada (Caso 1).

| Elutriador | Dc (m) | Massa recolhida (g) |
|------------|--------|---------------------|
| 1 | 0,03 | 4,62 |
| 2 | 0,04 | 6,75 |
| 3 | 0,06 | 7,75 |
| 4 | 0,12 | 4,42 |

Fonte: Massarani (2002).

Caso 2: Definição da velocidade de fluido de arraste: Determinar as respectivas velocidades de elutriação para separar pó de diamante nas faixas 0-1 µm, 1-2 µm, 2-3 µm. A densidade do diamante é 3,5 g.cm⁻³ e a esfericidade das partículas 0,7. O fluido de arraste é água a 20°C ($\rho=0,99$ g.cm⁻³; $\mu=1,002$ cP). Para este caso, foi habilitado no app a opção “Faixa Granulométrica” (Figura 2b).

Caso 3: Separação de sólidos de densidades diferentes: Realizar a separação de uma mistura de galena e calcário alimentada em razão mássica de 1 para 4 em um elutriador. O processo foi feito com água à velocidade de elutriação de 0,05 cm s⁻¹. Considerar que os dois materiais possuem distribuição granulométrica apresentada na Tabela 2. As massas específicas da galena e do calcário e suas esfericidades foram respectivamente de 7,5 e 2,7 g.cm⁻³; 0,8 e 0,7. Assim, pede-se no exercício para calcular a percentagem de galena e calcário no material arrastado e no produto de fundo. A fim de aumentar a eficiência de coleta, foram realizadas simulações com diferentes valores de u entre 0,001 e 5 cm.s⁻¹.

Foi habilitado no app a opção “Distribuição Granulométrica” (Figura 2b), já que foram fornecidos dados discretos da distribuição de tamanho das partículas.

Tabela 1 – Distribuição granulométrica da galena e do calcário (Caso 2).

| D _p (µm) | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 |
|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| X (%) | 15 | 28 | 43 | 54 | 64 | 72 | 78 | 88 |

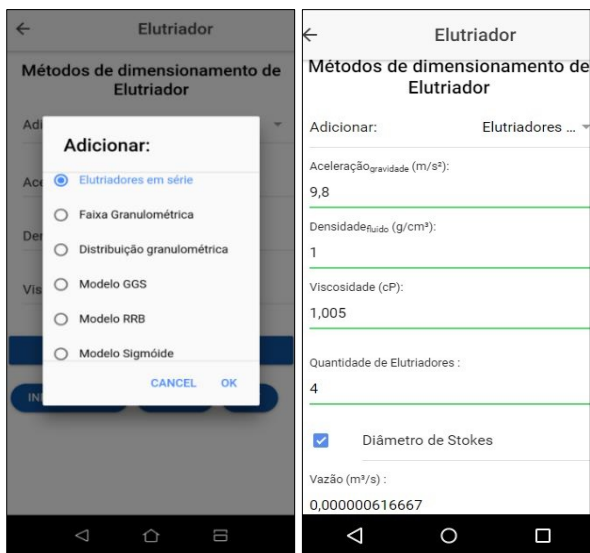
Fonte: Massarani (2002).

RESULTADOS

Caso 1: Elutriadores em série: Cálculo da faixa de tamanho dos sólidos coletados

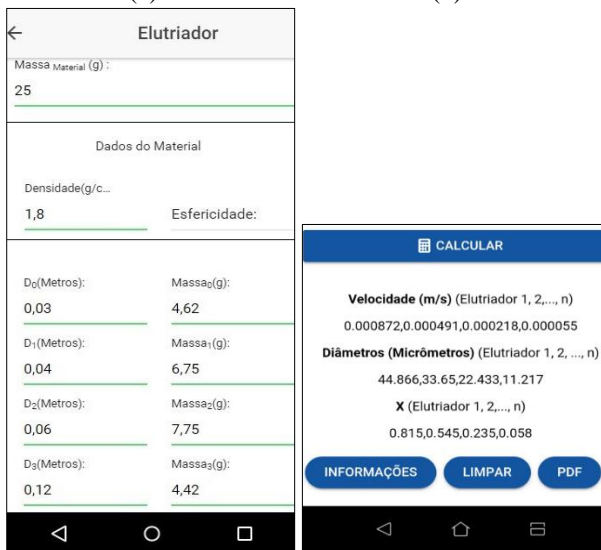
No Caso 1 foi simulado um problema no qual deseja-se conhecer a faixa de tamanho de sólidos que foram coletados em um sistema de 4 elutriadores em série.

A simulação foi realizada utilizando a opção “Elutriadores em série”, como mostra a Figura 3a. Os dados de entrada, como vazão de fluido e propriedades do fluido e das partículas foram inseridos no aplicativo, juntamente com a massa de sólidos total alimentada e coletada em cada compartimento, como mostra a Figura 3b,c. A inserção dos dados leva menos de 2 minutos.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 3:2 Recepção de informações (a,b,c) e resultado (d) obtido para elutriadores em série (Caso 1).

Após acionar a tecla “Calcular”, o aplicativo fornece os resultados de velocidade do fluido (m s^{-1}) em cada um dos 4 elutriadores, o diâmetro da menor partícula (μm) coletada em cada elutriador. Como o elutriador está separando os sólidos por faixas de tamanho, o aplicativo também fornece a distribuição de tamanho, através da fração mássica acumulativa (X), como mostra a Figura 3d.

A Tabela 3 apresenta os cálculos manuais de velocidade de fluido, diâmetro de corte, fração mássica retida e fração mássica acumulativa (X) do exemplo proposto. Pode-se observar que o aplicativo calculou corretamente todas as variáveis analisadas.

Tabela 3 – Informações e resultados para a elutriação em série de um pó (Caso 1).

| Elutriador | D_c (m) | M (g) | u (cm/s) | D_p (μm) | Δx | X |
|------------|--------------|------------|---------------|----------------------------|------------|-------|
| 1 | 0,03 | 4,62 | 0,0872 | 44,9 | 0,185 | 0,815 |
| 2 | 0,04 | 6,75 | 0,0491 | 33,7 | 0,270 | 0,545 |
| 3 | 0,06 | 7,75 | 0,0218 | 22,4 | 0,310 | 0,235 |
| 4 | 0,12 | 4,42 | 0,0545 | 11,2 | 0,177 | 0,058 |
| topo | - | 1,45 | - | <11,2 | 0,058 | 0 |

Fonte: Adaptado de Massarani (2002)

Caso 2: Elutriadores em série: Cálculo da velocidade de elutriação dos sólidos

Neste problema, pede-se para calcular a velocidade do fluido de arraste na coluna de elutriação, para que a faixa de tamanho de partículas de diamante seja: 2-3, 1-2 e 0-1 μm .

Para esta simulação, utilizou-se a opção “Faixa Granulométrica”. A Figura 4a mostra os dados do problema que foram inseridos no aplicativo. Ao informar a faixa de tamanho de sólidos, é importante colocar primeiro o menor tamanho da faixa e em seguida o maior.

Após acionar a tecla “Calcular”, obtêm-se os valores dos cálculos intermediários, como o valor de $C_D Re_p^2$, Re_p e a velocidade terminal v_t , que é igual a velocidade do fluido de elutriação (u) (Figura 4b). A Tabela 4 compara as velocidades obtidas pelo app e reportadas por Massarani (2002) como solução.

Tabela 4: Comparação dos resultados do app e reportados por Massarani (2002) para o Caso 2.

| Elutriador | D_p (μm) | u (cm.h^{-1}) Massarani (2002) | u (cm.h^{-1}) App | Desvio (%) |
|------------|----------------------------|--|-----------------------------------|---------------|
| 1 | 2-3 | 3,84 | 3,99 | 3,91 |
| 2 | 1-2 | 1,71 | 1,78 | 4,09 |
| 3 | 0-1 | 0,43 | 0,45 | 4,65 |

(a)

(b)

Figura 4: Dados inseridos (a) e resultados de v_t em cada coluna (b) no estudo de Caso 2.

Observa-se na Tabela 4 que o desvio entre o valor de v_t reportado como solução e o valor calculado pelo aplicativo é baixo e está entre 3,9 e 4,7%. Esses desvios podem ser relativos a pequenas diferenças entre as propriedades do fluido utilizadas pelo autor, uma vez que o livro não menciona o valor utilizado, além do arredondamento nos cálculos intermediários.

Este tipo de exemplo é utilizado no dimensionamento de novos elutriadores, pois de posse da velocidade do fluido de arraste em cada coluna, é possível selecionar uma vazão de fluido e o diâmetro da coluna para que as faixas de tamanho desejadas sejam obtidas no experimento.

Caso 3: Separação de galena e calcário

Outro problema comum nos processos de separação é a concentração de uma corrente com mistura de sólidos. Neste exemplo, deseja-se coletar a galena, que é mais densa (material A), para obter um produto de fundo mais concentrado em galena e um produto de topo mais concentrado em calcário (material B). A distribuição de tamanho dos sólidos é similar e conhecida. A proporção entre galena e calcário é de 1:4.

Por ser o material mais denso, a galena é coletada como produto de fundo do elutriado, e o calcário como produto de topo.

Como o exemplo forneceu uma tabela com a distribuição dos sólidos (Tabela 2), foi utilizada a opção “Distribuição Granulométrica”.

A Figura 5 mostra a inserção dos dados referentes ao Caso 3, enquanto a Figura 6 apresenta os resultados obtidos.

| D_i (Micrômetro): | X_i (%) |
|---------------------|-----------|
| 30 | 28 |
| 40 | 43 |
| 50 | 54 |
| 60 | 64 |
| 70 | 72 |
| 80 | 78 |
| 100 | 88 |

Figura 5: Inserção das condições experimentais e propriedades de fluido e partículas referentes a separação da galena e calcário (Caso 3).

| Elutriador | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Parâmetros dos modelos | | |
| RRB | GGs | Sigmóide |
| D': 60.305 | K: 96.694 | D': 44.793 |
| n: 1.588 | m: 1.102 | p: 2.265 |
| R ² : 0.997 | R ² : 0.964 | R ² : 0.994 |
| K e D' são informados em Micrometros | | |
| Informações iniciais | | |
| Material 1 | Material 2 | |
| CD/Re: 680.16 | CD/Re: 177.888 | |
| K ₁ : 0.919 | K ₁ : 0.87 | |
| K ₂ : 1.406 | K ₂ : 1.894 | |
| Re: 0.196 | Re: 0.397 | |
| D _{micrometros} : 39.27 | D _{micrometros} : 79.307 | |

| Elutriador | |
|---|---------------------|
| Modelo de distribuição granulométrica RRB | |
| % Arrastado: 39.715 | % Arrastado: 78.665 |
| % Topo: 11.207 | % Topo: 88.793 |
| % Fundo: 41.397 | % Fundo: 58.603 |
| Modelo de distribuição granulométrica GGS | |
| % Arrastado: 37.035 | % Arrastado: 80.372 |
| % Topo: 10.33 | % Topo: 89.67 |
| % Fundo: 44.505 | % Fundo: 55.495 |
| Modelo de distribuição granulométrica Sigmóide | |
| % Arrastado: 42.604 | % Arrastado: 78.482 |
| % Topo: 11.95 | % Topo: 88.05 |
| % Fundo: 40.006 | % Fundo: 59.994 |

Figura 6: Resultados obtidos na simulação: Ajuste dos parâmetros dos Modelos RRB, GGS e Sigmóide; cálculos intermediários de C_D/Re_p , K_1 , K_2 , Re_p e d^* para a galena (material 1) e calcário (material 2) e composições de topo de fundo.

Um dos primeiros passos que o aplicativo faz é ajustar os parâmetros dos Modelos de distribuição granulométrica RRB, GGS e Sigmóide. Observa-se na Figura 6 que apesar de todos os modelos apresentarem um bom ajuste, o Modelo RRB apresentou o maior coeficiente de correlação quadrático ($R^2=0,997$). No entanto, o livro propõe utilizar o Modelo Sigmóide, que também apresentou bom ajuste ($R^2=0,994$).

A Tabela 5 traz a comparação dos resultados reportados pelo livro de Massarani (2022) e os obtidos pelo *app*, considerando a utilização do Modelo Sigmóide.

Tabela 5: Resultados apresentado por Massarani (2002) e pelo aplicativo para o Caso (A-Galena e B- Calcário).

| | Massarani | | Aplicativo | | Desvio (%) | |
|-------------------------|-----------|-------|------------|--------|------------|-------|
| | A | B | A | B | A | B |
| C_D/Re_p | 680,0 | 178,0 | 680,16 | 177,89 | 0,02 | 0,06 |
| Re_p | 0,196 | 0,395 | 0,196 | 0,397 | 0,00 | 0,51 |
| d^* (μm) | 39,20 | 79,00 | 39,27 | 79,31 | 0,18 | 0,39 |
| η (%) | 57,00 | 24,00 | 57,40 | 21,52 | 0,70 | 10,33 |
| (1- η) (%) | 43,00 | 76,00 | 42,60 | 78,48 | 0,93 | 3,26 |
| % topo | 12,40 | 87,60 | 11,95 | 88,05 | 3,63 | 0,51 |
| % fundo | 37,30 | 62,70 | 40,01 | 59,99 | 7,27 | 4,32 |

Analisando os resultados da Figura 6 e Tabela 5, verificou-se que o aplicativo forneceu

resultados similares com os reportados por Massarani (2002). Os desvios foram menores de 1% para os cálculos de C_D/Re_p , K_1 , K_2 , Re_p e d^* de ambos os materiais.

Os maiores desvios foram obtidos para a eficiência de coleta do calcário (η), cerca de 10%, o que impactou também na composição do produto de fundo, com erros de 7% na quantidade de galena coletada.

Os desvios são considerados baixos, sendo também provenientes da pequena diferença encontrada entre os parâmetros ajustados para o Modelo Sigmóide. Enquanto o livro reportou $D_{50}=44,6 \mu\text{m}$ e $p=2,27$, o aplicativo encontrou um valor muito próximo ($D_{50}=44,793 \mu\text{m}$ e $p=2,265$). Assim, a pequena diferença na quantidade de casas decimais pode ter ocasionado os desvios encontrados na eficiência de coleta e nas composições de fundo e topo.

Observa-se também na Figura 6 e na Tabela 5, que houve a concentração da galena na corrente de fundo, uma vez que havia 20% de galena na alimentação e a corrente de fundo apresentou 40% de galena, ou seja, dobou a quantidade de galena na mistura. No entanto, cerca de 42,6% da massa alimentada de galena está sendo perdida, por estar misturada com o calcário no produto de topo.

Como o uso do app é simples e rápido, ele permitiu a avaliação do efeito da velocidade de arraste na separação dos sólidos.

A Figura 8 exemplifica o efeito da velocidade de elutriação sobre a eficiência global de coleta da galena e do calcário. O aumento da velocidade de arraste ocasiona a diminuição contínua da coleta das partículas, mas de forma mais acentuada para o calcário.

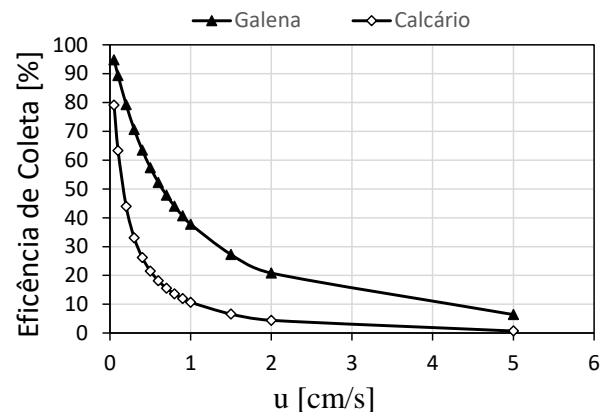


Figura 7: Eficiência de coleta dos sólidos em função da velocidade do fluido de arraste.

Quanto à composição das correntes de topo e fundo, observa-se na Figura 8 que baixas velocidades de fluido tendem a arrastar pouca quantidade de galena e calcário. No entanto, como o calcário é mais facilmente arrastado por ser menos denso, ocorre uma concentração da galena na corrente de fundo, que vai ficando cada vez mais pronunciada com o aumento da velocidade de arraste.

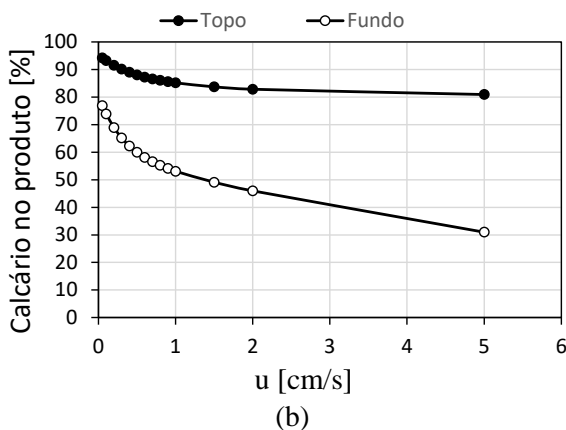
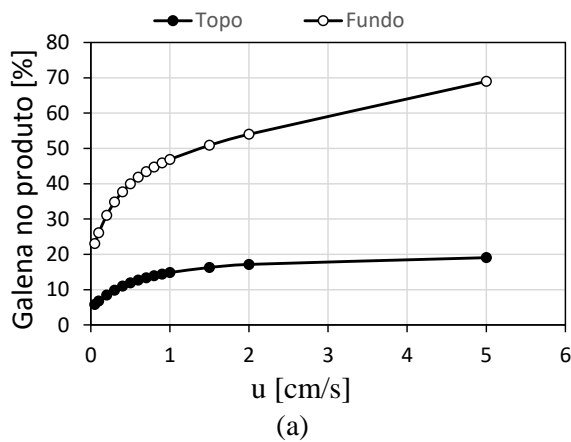


Figura 8: Quantidade de galena (a) e calcário (b) nos produtos de topo e fundo, em função da velocidade de elutriação.

Assim, enquanto o teor de galena aumenta com velocidade do fluido, a recuperação da galena na corrente de fundo é cada vez menor.

Na prática é preciso avaliar as necessidades do processo, ou seja, qual a taxa mássica de galena e qual a concentração mínima do mineral para entrar na próxima etapa de processo, e assim selecionar a velocidade de elutriação mais adequada.

Como exemplo, considere uma alimentação de cerca de 1000 kg.h^{-1} da mistura de sólidos no equipamento. A alimentação é então composta por 200 kg de galena e 800 kg de calcário.

Caso a próxima etapa do processo exija um teor de galena de pelo menos 40%, será preciso operar numa velocidade de fluido de $0,5 \text{ cm.s}^{-1}$. Significa que o teor de galena no elutriador dobrou em relação à alimentação.

Assim, a corrente de fundo do processo será de cerca de 287 kg.h^{-1} de uma mistura de galena e calcário, sendo a taxa de galena de $114,8 \text{ kg.h}^{-1}$. Assim, estima-se uma perda de $85,2 \text{ kg.h}^{-1}$ de galena, que sai na corrente de topo, ou seja, há a perda de 42,6% da galena.

Exemplos como este podem ajudar alunos a compreender que existem diversas condições operacionais possíveis, mas sempre há um custo grande quando se deseja correntes puras ou muito concentradas, tanto pelo aumento das perdas quanto pelos custos de se operar com maior vazão de fluido.

CONCLUSÃO

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

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 e sólido-sólido, seja em um único equipamento ou colunas de elutriação em série. 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.

O PEIQ está disponível na versão português do Brasil e em inglês, tem potencial de atingir um bom público com sistema operacional Android pelo mundo, tanto na área de ensino de engenharia quanto em aplicações industriais.

NOMENCLATURA

| | |
|------------------|---|
| A | – Partícula mais densa [–] |
| B | – Partícula menos densa [–] |
| C_D | – Coeficiente de arraste [–] |
| d^* | – Diâmetro de corte das partículas [L] |
| D' | – Parâmetro do modelo RRB [L] |
| D_{50} | – Parâmetro do modelo Sigmoide [L] |
| D_c | – Diâmetro da coluna de elutriação [L] |
| D_p | – Diâmetro de partícula [L] |
| g | – Aceleração da gravidade [LT ⁻²] |
| k | – Parâmetro do modelo GGS [L] |
| K_1, K_2 | – Parâmetros em função da esfericidade |
| m | – Parâmetro do modelo GGS [–] |
| M | – Massa coletada no elutriador [M] |
| n | – Parâmetro do modelo RRB [–] |
| p | – Parâmetro do modelo Sigmoide [–] |
| $prop_A$ | – Proporção da partícula mais densa (A) |
| $prop_B$ | – e menos densa (B) na mistura [–] |
| Q_A | – Vazão de alimentação do fluido [L ³ T ⁻¹] |
| Re_p | – Número de Reynolds da partícula |
| u | – Velocidade do fluido [LT ⁻¹] |
| v_t | – Velocidade terminal da partícula d^* [LT ⁻¹] |
| v_{tA}, v_{tB} | – Velocidade terminal da partícula mais densa e menos densa [LT ⁻¹] |

Símbolos

| | |
|----------|---|
| ϕ | – Esfericidade das partículas |
| μ | – Viscosidade do fluido [ML ⁻¹ T ⁻¹] |
| ρ | – Massa específica do fluido [ML ⁻³] |
| ρ_s | – Massa específica do sólido [ML ⁻³] |
| η | – Eficiência global de coleta de partículas |

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, N. P. & SANTOS, K. G. (2020). Chemical Engineering Laboratory teaching using Project-based learning approach: gas adsorption using banana peel. *Research, Society and Development*, Vol. 9, n. 3, e184932716.
- ALMEIDA, N. P., CANHADAS, M. C., ALBERTINI, M. R. M. C., SANTOS, K. G. & VIEIRA NETO, J. L. (2020). Solid–fluid separation in the gravitational field: Courseware generation using computational fluid dynamics simulation. *Computer Applications in Engineering Education*, cae.22327, p. 1-14.
- LIMA, G. M. e SANTOS, K. G. (2019a). Desenvolvimento de um aplicativo móvel para projeto de separação sólido-gás empregando ciclones. *Anais do XXXIX ENEMP 2019 - Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, Vol. 2, 116076, Belém, PA, Brasil.
- LIMA, G.M. e SANTOS, K.G. (2019b). O uso de um aplicativo móvel para celular no ensino do projeto de câmaras de separação gravitacional, *Anais do XXXIX ENEMP 2019 - Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, Vol. 2, 116484, Belém, PA, Brasil.
- COELHO, R.M.L. e MASSARANI, G. (1996), *Fluidodinâmica de Partículas: Ainda sobre Correlações em Base aos Dados Experimentais de Pettyjohn e Christiansen*, Relatório LSP/COPPE 1/96.
- CREMASCO, M. A. (2005), *Vale a pena estudar Engenharia Química*. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2005. 206 p.
- MANGUCCI, C. B., STOPPE, A. C. R., MORAIS, A. A., MELO, Y. A., MEROLA, G. N., SANTOS, K. G. (2020). Construction of a dust chamber didactic kit and computational fluid dynamics assessment: an active learning practice. *Research, Society and Development*, Vol. 9, n 11, e41691110069.
- FREITAS, P.V.S. e SANTOS, K.G. (2021) Bibliometric analysis on use of apps and technologies in teaching separation processes at Chemical Engineering Research, Society and Development, Vol. 10, n. 11, e39101119155.
- MASSARANI, G. (2002), *Fluidodinâmica em sistemas particulados*. 2 ed. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais.
- PEÇANHA, R. P. (2014), *Sistemas particulados: Operações unitárias envolvendo partículas e fluidos*. 1 e. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 424 p.
- SANTOS, K. G., SILVA, A. A. L., TOIGO, S., LIMA, L. J., OLIVEIRA, J., MINARÉ, M. M., MARTINS, P. R. G., DANTAS, S. C.; SILVÉRIO, B. C. (2021). Online blended approach (PBL) applied to learning separation process in chemical engineering. *Research, Society and Development*, Vol. 10, n. 1, e30110111408.
- SILVA, L. D., LIMA G. M. SILVÉRIO, B.C. & DOS SANTOS, K. G. (2020). Desenvolvimento de um Software educativo para projeto da separação sólido-líquido em centrifugas tubulares. *Revista Iberoamericana De Tecnología En Educación Y Educación En Tecnología*, Vol. 25, e9.