

Modelagem e simulação de elutriadores em série utilizando o Scilab

Modeling and simulation of serial elutriators using Scilab

Modelado y simulación de elutriadores en serie utilizando Scilab

Recebido: 09/08/2021 | Revisado: 14/08/2021 | Aceito: 16/08/2021 | Publicado: 18/08/2021

Amanda Branco e Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1697-3136>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: amandabrancoes@gmail.com

Ana Paula Brandão

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1021-450X>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: anapbrandao@live.com

Flávia Karlayne de Melo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9212-0111>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: flaviakarlayne@hotmail.com

Hudson Henrique Alves da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3342-4729>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: hudson03@hotmail.com

Italo Andalecio Gontijo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4684-3217>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: italoandalecio@gmail.com

Leonardo Paganelli Meneghelli

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1018-9199>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: leonardopmeneghelli@gmail.com

Matheus Henrique Batista Palmieri da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3740-3474>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: matheushbps@outlook.com

Pedro Henrique Silva Mauad

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9740-6909>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: phsmauad@hotmail.com

Davi Leonardo de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1995-9057>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: davi.souza@uftm.edu

Resumo

Em Operações Unitárias de Engenharia Química, entre os inúmeros equipamentos que podem ser utilizados na etapa de separação de sólidos indesejados daqueles que contém valor agregado, estão os elutriadores. O funcionamento destes equipamentos é baseado na diferença de tamanho e/ou densidade das partículas alimentadas no sistema, as quais ficam retidas no equipamento ou são carregadas pelo fluido de arraste, dependendo das características físicas do sistema particulado. Os elutriadores são usualmente operados em série e são amplamente utilizados na indústria de mineração. O presente estudo visa analisar o comportamento de um sistema de três elutriadores em série, cujas partículas alimentadas se diferem no tamanho e na densidade, utilizando o Scilab como principal ferramenta de análise. Ao estudar o comportamento do sistema frente à variação dos parâmetros alfa (α), velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) e vazão do sistema (Q), foi analisada a influência das alterações nas variáveis de massa retida no leito ($W(r_i)$) e constante de elutriação ($k(r_i)$).

Palavras-chave: Arraste; Elutriação; Simulação.

Abstract

In Chemical Engineering Unit Operations, among the countless pieces of equipment that can be used in the stage of separation of unwanted solids, those that contain added value are in the elutriators. The operation of these equipment is based on the difference in size and/or density of the particles fed into the system, which are retained in any equipment or are carried by the drag fluid, depending on the physical characteristics. Elutriators are usually operated in series and are widely used in the mining industry. This study aims to analyze the behavior of three elutriators in series, separate

the fed particles if they differ in size and density, using Scilab as the main tool. When studying the behavior of the system in face of the variation of the alpha (α), minimum fluidization velocity (U_{mf}) and system flow (Q) parameters, the influence of changes in the variables of mass retained in the bed (W (ri)) and elutriation constant (k (ri)) were analyzed.

Keywords: Drag; Elutriation; Simulation.

Resumen

En Operaciones Unitarias de Ingeniería Química, entre los innumerables equipos que se pueden utilizar en el paso de separar los sólidos no deseados de los que contienen valor agregado, se encuentran los elutriadores. El funcionamiento de estos equipos se basa en la diferencia de tamaño y / o densidad de las partículas que ingresan al sistema, las cuales son retenidas en el equipo o transportadas por el fluido de arrastre, dependiendo de las características físicas del sistema particulado. Los elutriadores generalmente se operan en serie y se usan ampliamente en la industria minera. El presente estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento de un sistema de tres elutriadores en serie, cuyas partículas alimentadas difieren en tamaño y densidad, utilizando Scilab como principal herramienta de análisis. Al estudiar el comportamiento del sistema frente a la variación de los parámetros alfa (α), velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) y flujo del sistema (Q), la influencia de los cambios en las variables de masa retenida en el lecho (W (ri)) se analizó y la constante de elutriación (k (ri)).

Palabras clave: Arrastrar; Elutriación; Simulación.

1. Introdução

A mineração no Brasil remonta aos tempos coloniais, quando o ouro era cobiçado e buscado no interior do país. O Brasil é reconhecido por ser um dos principais produtores de minérios do mundo, produzindo aproximadamente 70 substâncias minerais, segundo o DNPM. Os principais minérios explorados no país são o minério de ferro, ouro, nióbio e alumínio. No ano de 2015, segundo o DNPM, o Brasil foi o principal produtor de nióbio do mundo, destacando-se por representar cerca de 97,3% da produção mundial.

No processo de mineração o solo é explorado e diversas operações são empregadas para a obtenção do minério de interesse, entre elas estão a britagem, peneiramento, moagem, sedimentação, elutriação, hidrociclonagem, filtração etc.

A atuação profissional de um Engenheiro Químico está intimamente ligada ao desenvolvimento de Operações Unitárias, as unidades interdependentes que compõe os mais diversos processos industriais. Dentro das operações fluidodinâmicas que envolvem sistemas particulados, destacam-se a filtração, a sedimentação, a fluidização, leitos (fixos, fluidizados ou de jorro) e a elutriação (Cremasco, 2015).

A elutriação consiste em operações de separação baseadas na diferença entre a velocidade média do fluido e a velocidade terminal da partícula (Cremasco, 2014). Sendo assim, as partículas com diferentes diâmetros e massas específicas apresentam distribuições de velocidades distintas, o que é utilizado como fator determinante na separação das frações de sólidos (Silva, 2016).

Um elutriador consiste em uma coluna de diâmetro conhecido, onde a amostra de partículas é alimentada perto do topo. O fluido (na maioria das vezes a água) é alimentado com uma vazão volumétrica (Q) perto da base da coluna (Cremasco, 2014).

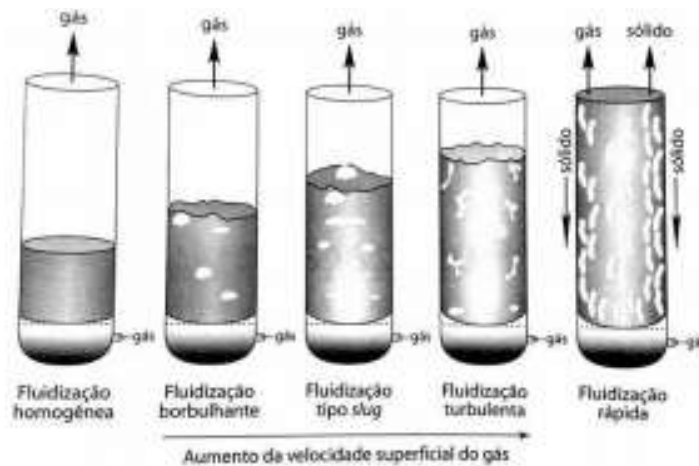
Existem duas maneiras para que a elutriação ocorra. Se o material for homogêneo, a separação ocorrerá devido a diferença de diâmetro entre as partículas; já se a mistura for heterogênea, a separação se dará pelas diferenças da velocidade terminal das partículas e das densidades (Foust, et al., 2011).

É possível que a elutriação aconteça com a utilização de um fluido gasoso (ar, na maioria das vezes) ao invés de líquido, técnica amplamente utilizada para determinar o tamanho de partículas de poeiras contaminantes. A grande vantagem deste tipo de elutriação é efetuar a medida instantânea das partículas separadas (Gomide, 1980).

Para entender o funcionamento de uma operação de elutriação é necessário avaliar os regimes fluidodinâmicos durante a fluidização, que dependem das características físicas da fase particulada (distribuição granulométrica, tamanho médio das partículas, forma e massa específica) e da fase fluida (viscosidade dinâmica e massa específica), assim como das condições operacionais da coluna (temperatura e vazão do fluido, compactação da fase particulada, altura e diâmetro) (Klinger, et al., 2017).

Os regimes podem ser identificados como fluidização homogênea, fluidização borbulhante, fluidização do tipo slug, fluidização turbulenta e fluidização rápida (Cremasco, 2014). O autor reitera que a partir da fluidização turbulenta, um pequeno acréscimo na velocidade superficial do fluido acarreta na elutriação, ou seja, o arraste da fase particulada. A Figura 1 ilustra os regimes de fluidização.

Figura 1. Ilustração de regimes de fluidização.



Fonte: Cremasco (2014).

É importante destacar que os elutriadores são comumente utilizados na separação de rejeitos minerais. Estudos mostraram que é possível realizar a separação entre pirita (FeS_2) e carvão (e outros minerais) por elutriação com água, dada a diferença de densidade entre os particulados (Englert & Rubio, 2011). Essa operação é de extrema importância, visto que minimiza as chances de acontecerem sérios danos ambientais após o descarte dos rejeitos do beneficiamento de carvão mineral, como a drenagem ácida de minas.

Keleoneker, 2011, que também objetivou em suas pesquisas separar a pirita (FeS_2) do carvão por elutriação, salientou que a pirita é a principal matéria prima para a elaboração de reagentes e enxofre, dado os teores suficientemente elevados do componente no rejeito mineral. Sendo assim, propôs a reutilização econômica do rejeito piritoso para gerar produtos comercializáveis, além de minimizar o impacto ambiental.

Silva, 2016, estudou e comprovou a possibilidade de separação de uma mistura composta por água e frações de argila, silte e areia por elutriação, após o descarte de sedimentos retirados de processos de dragagem no Porto do Rio Grande, de dezembro de 2013 a janeiro de 2014. O autor ainda analisou por métodos computacionais (fluidodinâmica computacional - CFD) os parâmetros operacionais do equipamento, objetivando uma alta eficiência de separação.

Um estudo relativo à simulação da separação de dióxido de titânio (TiO_2) foi feito com a intenção da avaliação da aplicabilidade da elutriação por meio de sistemas gasosos (Trabzuni, 2009), base da modelagem dos elutriadores utilizada no presente caso.

2. Metodologia

Inicialmente, foi projetada uma série de três elutriadores, cada qual com 50 cm de altura, cujo objetivo era separar uma mistura de três partículas de densidades distintas. A separação das partículas em cada elutriador seguiu a ordem de densidade: no primeiro elutriador, ficaram retidas as partículas mais densas ($7,4 \text{ g cm}^{-3}$); no segundo, as partículas de densidade intermediária ($5,5 \text{ g cm}^{-3}$), e no terceiro, por fim, as partículas menos densas ($2,2 \text{ g cm}^{-3}$).

Os cálculos utilizados para o projeto dos diâmetros dos elutriadores são descritos a seguir. A equação 1 representa o

cálculo do primeiro parâmetro da esfericidade (K1).

$$K_1 = 0,843 \log_{10} \left(\frac{\varphi}{0,065} \right)$$

$$K_1 = 0,843 \log_{10} \left(\frac{\varphi}{0,065} \right) K_1 = 0,843 \log_{10} \left(\frac{\varphi}{0,065} \right) \quad (1)$$

Em que φ é a esfericidade. A equação 2 é referente ao cálculo do segundo parâmetro da esfericidade (K2).

$$K_2 = 5,31 - 4,88\varphi$$

$$K_2 = 5,31 - 4,88\varphi K_2 = 5,31 - 4,88\varphi \quad (2)$$

A equação 3 descreve o cálculo do parâmetro do número de Reynolds ($CdRe^2$).

$$Cd = \frac{4}{3} \frac{\rho(\rho_{s1}-\rho)g d_p^2}{\mu^2} CdRe^2 = \frac{4}{3} \frac{\rho(\rho_{s1}-\rho)g d_p^3}{\mu^2} CdRe^2 = \frac{4}{3} \frac{\rho(\rho_{s1}-\rho)g d_p^3}{\mu^2} \quad (3)$$

Em que ρ é a densidade do fluido, ρ_{s1} é a densidade do sólido, g é a gravidade, d_p é o diâmetro da partícula e μ é a viscosidade do fluido.

A equação 4 representa o cálculo do número de Reynolds (Re).

$$Re = \left[\left(\frac{K_1 CdRe^2}{24} \right)^{-1,2} + \left(\frac{CdRe^2}{K_2} \right)^{-0,6} \right]^{-\frac{1}{1,2}} \quad (4)$$

A equação 5 é referente ao cálculo da velocidade terminal da partícula (v_t), determinante para o cálculo do diâmetro de cada um dos elutriadores.

$$v_t = \frac{Re \mu}{d_p \rho} \quad (5)$$

O cálculo do diâmetro dos três elutriadores pôde ser feito, por fim, por meio da equação 6

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{d_p \rho}} \quad (6)$$

Sendo que D é o diâmetro determinado do elutriador e Q é a vazão do fluido nos elutriadores, fixada em $1250 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$. Esses valores de diâmetros serão determinantes, pois serão utilizados na aplicação do modelo de elutriação.

Em posse dos diâmetros dos três elutriadores, foi possível avaliar a influência dos parâmetros alfa (α), velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) e vazão (Q) utilizados no modelo elaborado por Trabzuni, 2009.

A equação 7 mostra a taxa de alimentação das partículas no sistema.

$$F_0(ri) = F_0 P_0(ri) \quad (7)$$

Em que $F_0(r_i)$ é o fluxo da corrente da alimentação sólida por intervalo, F_0 é o fluxo de alimentação de sólidos e $P_0(r_i)$ é a fração em massa de cada intervalo de tamanho de partícula no fluxo de alimentação.

A equação 8 mostra o cálculo da massa de cada intervalo de partículas retido no leito.

$$W(r_i) = \frac{F_0(r_i) - W(r_{i+1}) * \frac{Rate}{\Delta r_i}}{k(r_i) - \frac{Rate}{\Delta r_i} - 3 * \frac{Rate}{r_i}} \quad (8)$$

Dado que $W(r_i)$ é a massa de cada intervalo de partículas retido no leito, $W(r_{i+1})$ é a massa de intervalo de partículas retida no ponto $i+1$ do leito, $Rate$ é a taxa da reação e r_i é o tamanho do intervalo r_i . Na elutriação proposta para o atual sistema, foram desconsiderados os termos de reação química, uma vez que o objetivo principal foi apenas alcançar a separação das partículas.

O cálculo da massa da fração de cada intervalo de partículas no leito ($P_b(r_i)$) é definido pela equação 9.

$$P_b(r_i) = \frac{W(r_i)}{W} \quad (9)$$

em que W é a massa total de sólidos no leito, definida pela equação 10.

$$W = \sum W(r_i) \quad (10)$$

A equação do fluxo de corrente de elutriação por intervalo ($F_2(r_i)$) é definida segundo a equação 11.

$$F_2(r_i) = W(r_i)k(r_i) \quad (11)$$

em que $k(r_i)$ é definida como a constante da taxa de elutriação de sólidos.

A equação 12 representa o cálculo da fração em peso de cada partícula no intervalo de corrente de elutriação ($P_2(r_i)$).

$$P_2(r_i) = \frac{F_2(r_i)}{F_2} \quad (12)$$

em que F_2 é o fluxo de elutriação de sólidos. A equação 13 representa o cálculo da constante da taxa de elutriação ($k(r_i)$).

$$k(r_i) = \rho_s v_t (1 - \varepsilon_i) \quad (13)$$

sendo ε_i o vazio da borda livre, cujo cálculo é definido pela equação 14.

$$\varepsilon_i = \left\{ 1 + \frac{\lambda(U_0 - U_{mf})^2}{2gD} \right\}^{-\alpha} \quad (14)$$

em que U_0 é a velocidade superficial do fluido utilizado, U_{mf} é a velocidade mínima de fluidização e α é o expoente dependente do tamanho do intervalo de tamanho de partículas. Por fim, o cálculo de λ é feito segundo a equação 15.

$$\frac{\lambda \rho_s}{d_p^2} \left(\frac{\mu}{\rho} \right) = 12,3 Re^{-2,5} D \quad (15)$$

Foi considerado um sistema de elutriação composto por três elutriadores de diâmetros diferentes e pré-definidos, e uma solução com três partículas de densidades conhecidas, cada qual com distribuições granulométricas distintas. A velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), a vazão do sistema (Q) e o parâmetro alfa (α) foram variados individualmente cinco vezes, para que assim pudessem ser avaliados os comportamentos da massa das partículas retidas no leito (W_{ri}) e da constante de elutriação ($k(ri)$). A massa inicial para cada uma das porções de partícula foi considerada como 20g.

As simulações foram feitas utilizando as equações de 7 a 16, de modo a serem separadas em 3 casos: para o primeiro caso, foram mantidos a vazão Q e o parâmetro α constantes, alterando os valores de U_{mf} ; para o segundo caso, foram mantidos a vazão Q e U_{mf} constantes, com variações sendo feitas nos valores de α ; para o terceiro caso, por fim, foram mantidos os parâmetros α e o fator multiplicativo da velocidade mínima de fluidização constantes, com variações em Q .

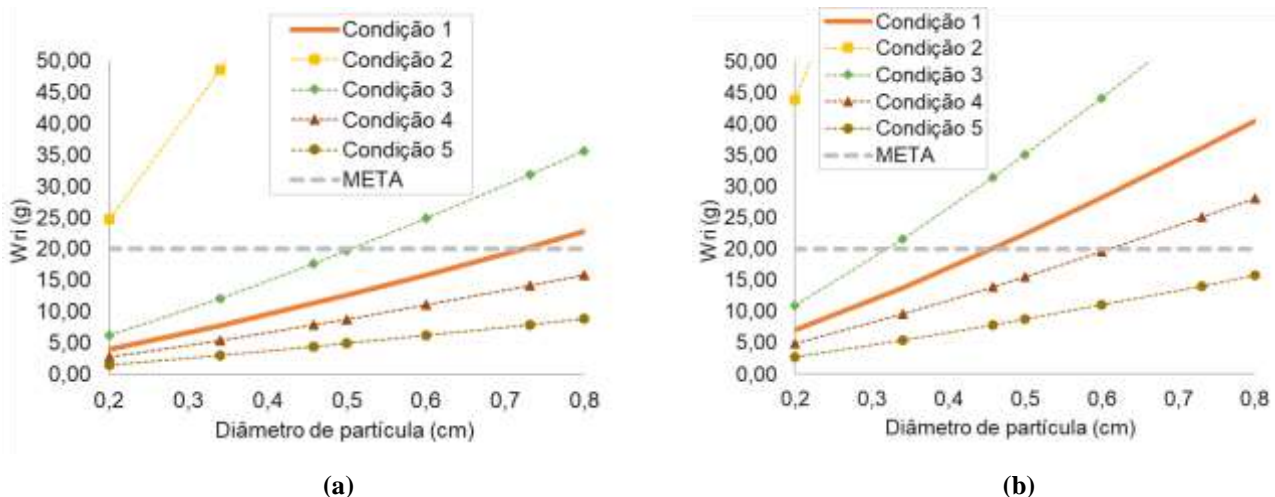
3. Resultados e Discussão

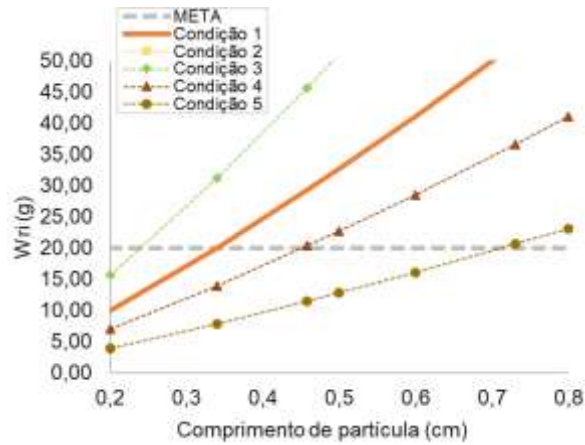
Os diâmetros encontrados para os elutriadores a partir das equações de 1 até 6 foram de 3,93 cm para o primeiro elutriador; 5,63 cm para o segundo elutriador e 7,43 cm para o terceiro elutriador.

Caso 1

Os resultados obtidos para análise da quantidade de massa retida no leito no estudo da variação da velocidade mínima de fluidização, mantendo Q e α constantes (correspondente às condições 1 a 5), são apresentados na Figura 2 a seguir.

Figura 2. Resultados para a variação de massa retida no leito quando variada a velocidade mínima de fluidização para (a) primeiro elutriador; (b) segundo elutriador; (c) terceiro elutriador.



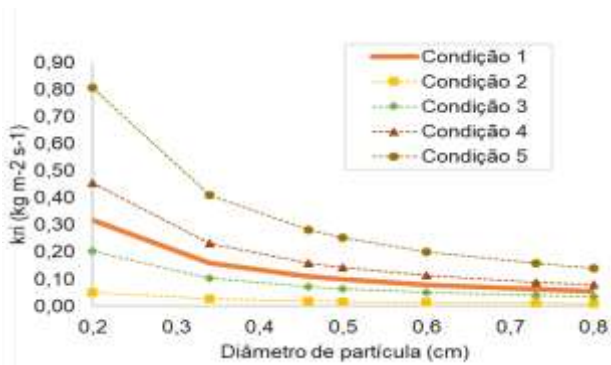


(c)

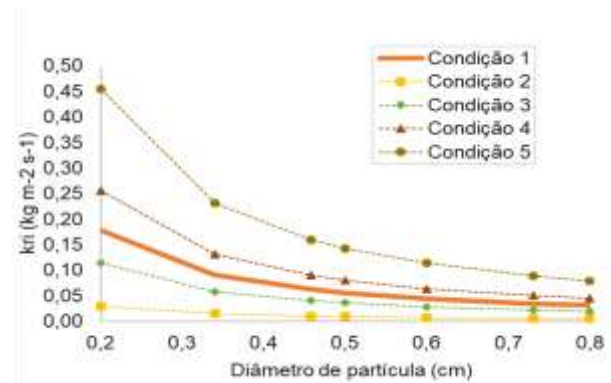
Fonte: Autores.

A Figura 3 mostra os resultados obtidos para análise da constante de elutriação no estudo da variação da velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), mantendo Q e α constantes.

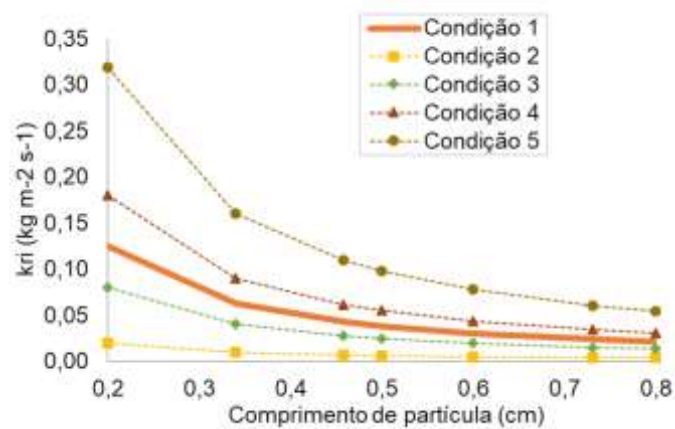
Figura 3. Resultados para a variação de massa retida no leito quando variada a velocidade mínima de fluidização para (a) primeiro elutriador; (b) segundo elutriador; (c) terceiro elutriador.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autores.

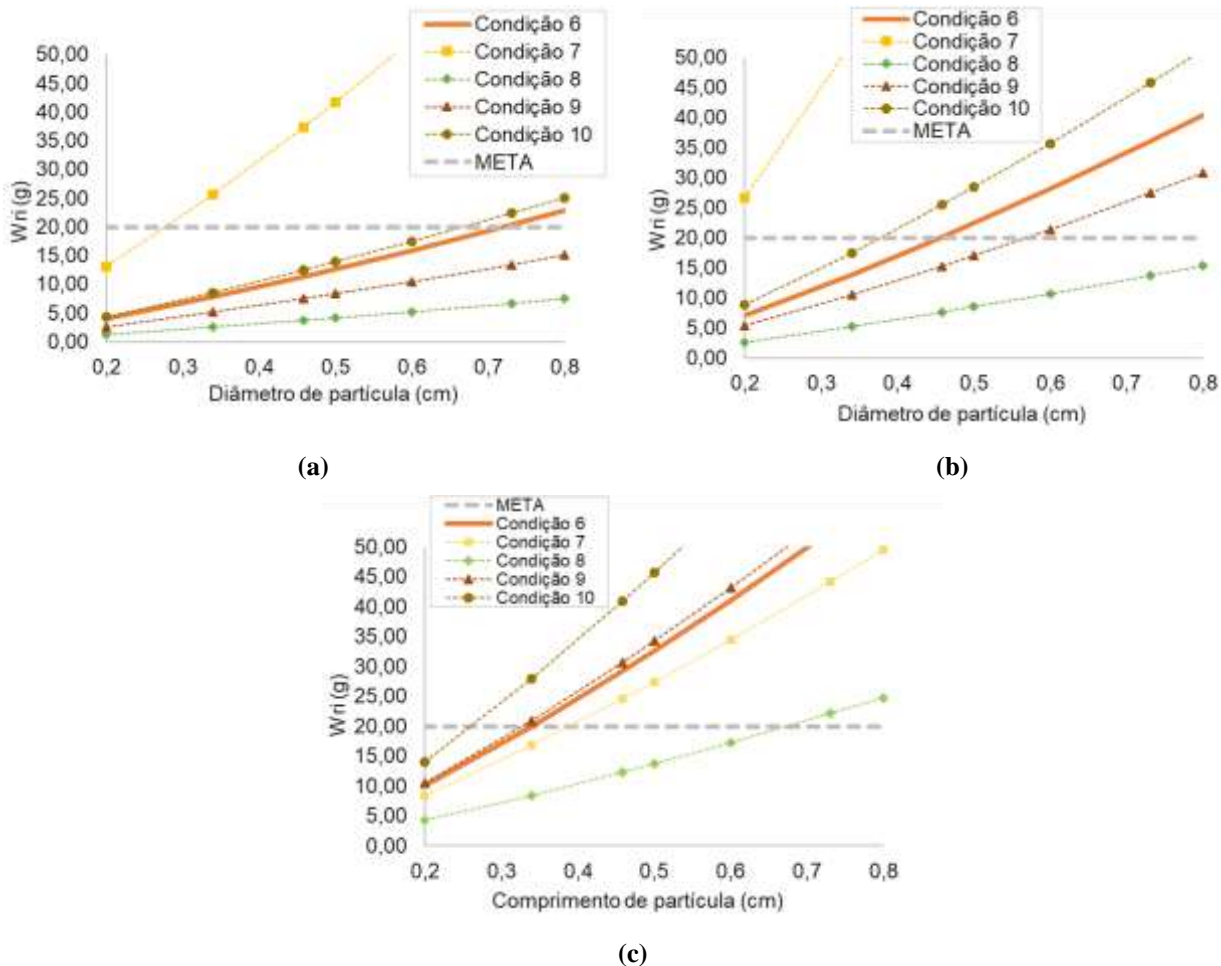
Pode ser percebido que para o primeiro elutriador no tamanho de partícula de 0,7309 cm o valor ideal de U_{mf} para uma quantidade de massa de 20g retidas no leito é de $51,52 \text{ cm s}^{-1}$; para o segundo elutriador, no tamanho de partícula 0,4583 cm, o valor ideal de U_{mf} é de $25,11 \text{ cm s}^{-1}$; para o terceiro elutriador, no tamanho de partícula 0,34 cm, o valor ideal de U_{mf} é de $14,41 \text{ cm s}^{-1}$, mostrando que condição 1 foi a condição ótima de operação para o caso 1.

Além disso, é possível concluir que a diminuição no valor do fator da velocidade mínima de fluidização e, conseqüentemente, no valor de U_{mf} implica em uma diminuição no valor de $W(r_i)$ e em um aumento no valor de $k(r_i)$. Ou seja, $W(r_i)$ é diretamente proporcional a U_{mf} e inversamente proporcional a $k(r_i)$.

Caso 2

Os resultados obtidos para análise da quantidade de massa retida no leito no estudo da variação de α , mantendo Q e U_{mf} constantes (condições de 6 a 10), são apresentados na Figura 4 a seguir.

Figura 4. Resultados para a variação de massa retida no leito quando variado α (a) primeiro elutriador; (b) segundo elutriador; (c) terceiro elutriador.



Fonte: Autores.

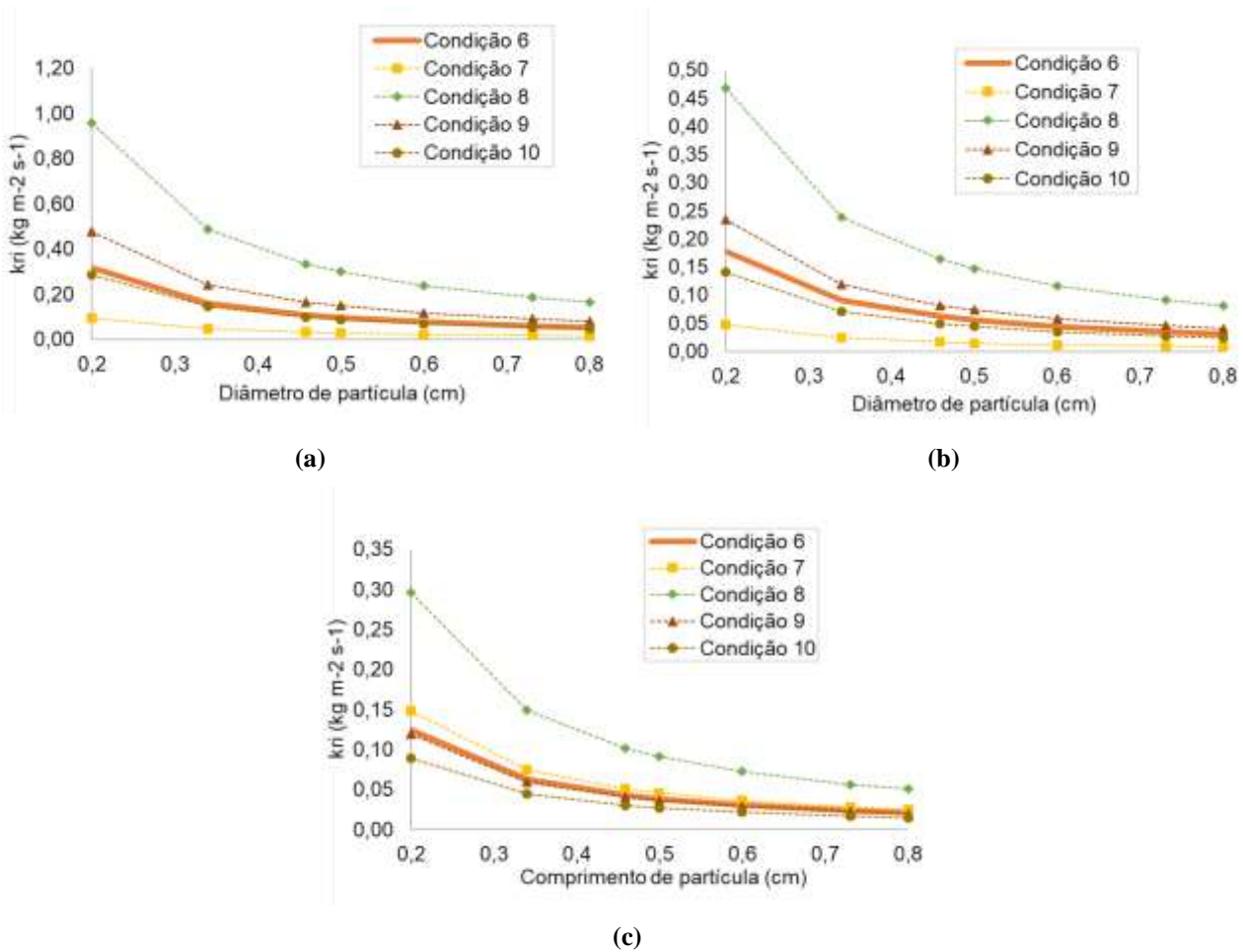
A Figura 5 mostra os resultados obtidos para análise da constante de elutriação no estudo da variação de α , mantendo Q e U_{mf} constantes.

Pode ser percebido que para o primeiro elutriador, no tamanho de partícula de 0,7309 cm, o valor ideal de α para

uma quantidade de massa de 20g retidas no leito é de 3,3; para o segundo elutriador, no tamanho de partícula 0,4583 cm, o valor ideal de α é de 3,8; para o terceiro elutriador, no tamanho de partícula 0,34 cm, o valor ideal de α é de 4,2; mostrando que a condição 6 foi a condição ótima de operação para o caso 2.

Além disso, é possível concluir que o aumento do valor de α implica em uma diminuição no valor de $W(r_i)$ e em um aumento no valor de $k(r_i)$. Ou seja, $W(r_i)$ é inversamente proporcional a α enquanto que $k(r_i)$ é diretamente proporcional a α .

Figura 5. Resultados para a variação de constante de elutriação quando variado α para (a) primeiro elutriador; (b) segundo elutriador; (c) terceiro elutriador.

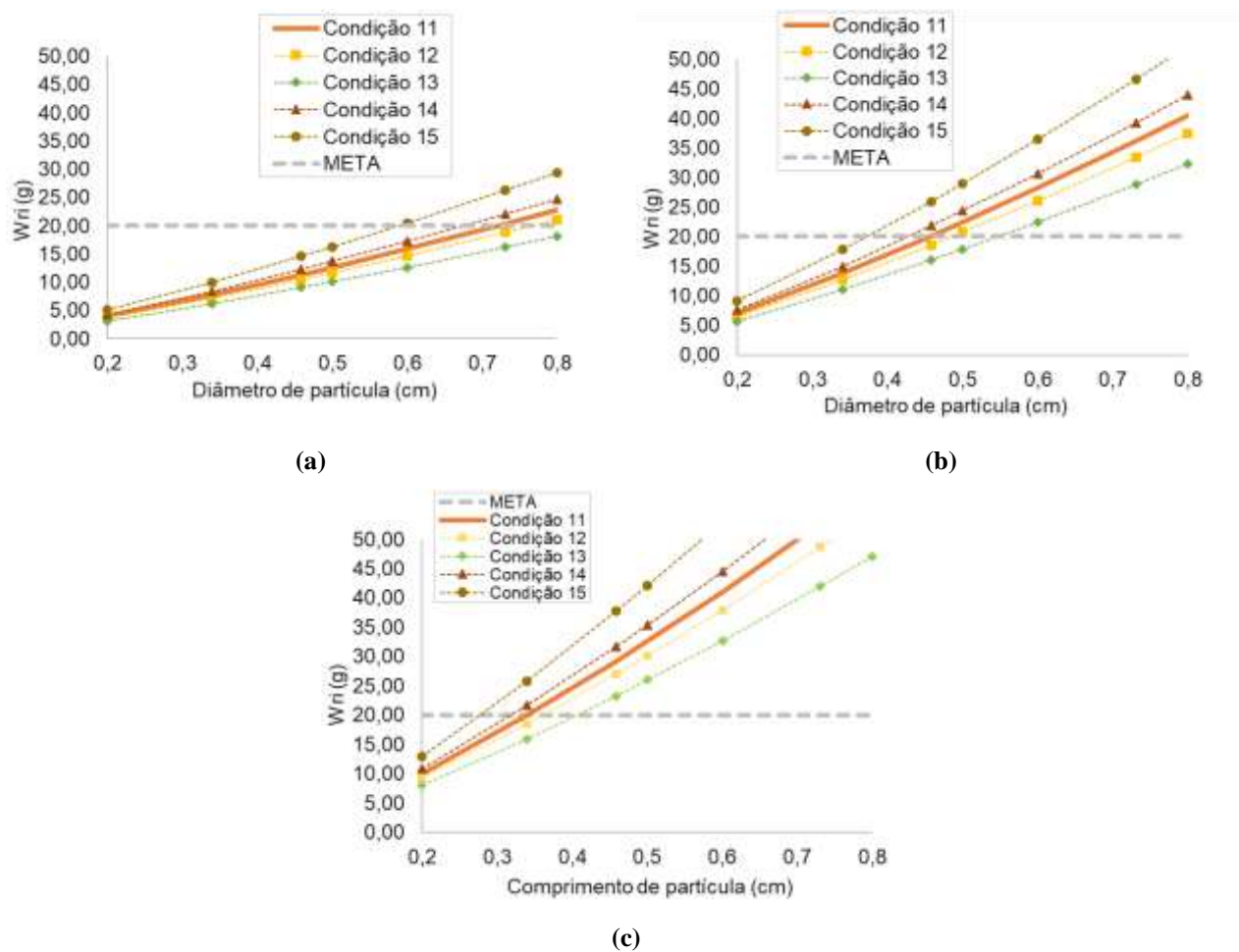


Fonte: Autores.

Caso 3

A Figura 6 representa os resultados obtidos para análise da quantidade de massa retida no leito no estudo da variação de Q , mantendo α constante (condições 11 a 15); U_{mf} também sofrerá variação uma vez que o mesmo depende da vazão, no entanto o fator da velocidade mínima de fluidização é constante.

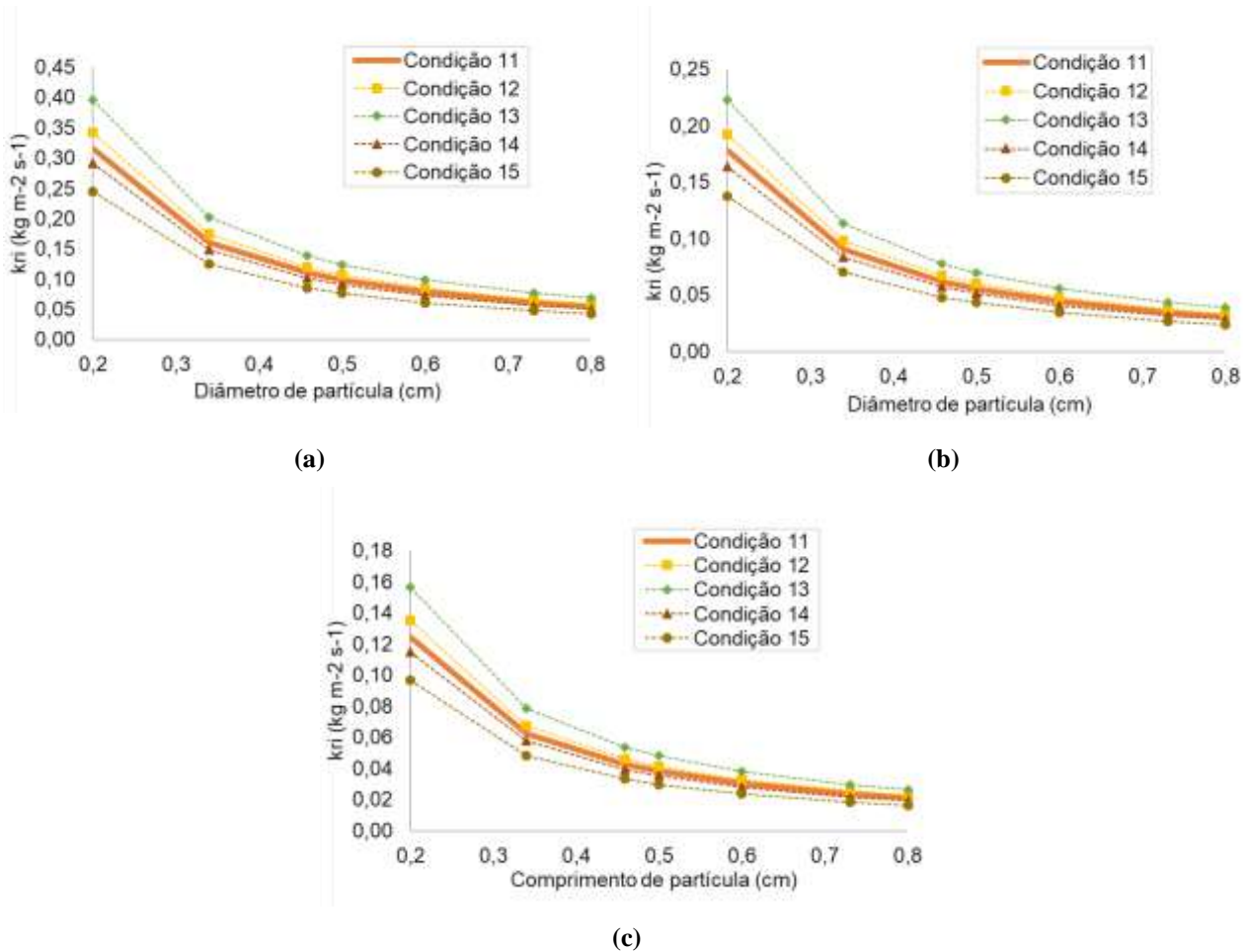
Figura 6. Resultados para a variação de massa retida no leito quando variado Q (a) primeiro elutriador; (b) segundo elutriador; (c) terceiro elutriador.



Fonte: Autores.

A Figura 7 representa os resultados obtidos para análise da quantidade de massa retida no leito no estudo da variação de Q , mantendo α e U_{mf} constantes.

Figura 7. Resultados para a variação de constante de elutriação quando variado Q para (a) primeiro elutriador; (b) segundo elutriador; (c) terceiro elutriador.



Fonte: Autores.

Pode ser percebido que o valor ideal de Q para uma quantidade de massa de 20g retidas no leito é de $1250 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ para todos os elutriadores, como mostra a condição 11 que foi a condição ótima de operação para o caso 3.

Além disso, é possível concluir que o aumento no valor de Q implica na diminuição do valor de $W(r_i)$ e no aumento do valor de $k(r_i)$. Ou seja, $W(r_i)$ é inversamente proporcional a Q enquanto $k(r_i)$ é diretamente proporcional a Q .

É possível observar, a partir do Quadro 1, os parâmetros de Q , U_{mf} e α os que possibilitaram as condições ótimas de operação para cada um dos operadores individualmente.

Quadro 1. Condições ótimas de operação para cada um dos elutriadores individualmente.

Parâmetros	Elutriador 1	Elutriador 2	Elutriador 3
Vazão ($\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$)	1250,00	1250,00	1250,00
α	3,30	3,80	4,20
U_{mf} (m s^{-1})	51,52	25,11	14,41

Fonte: Autores.

Uma vez obtidas as condições ótimas de operação para os três elutriadores, foi feita a média dos valores de Q , fator da velocidade mínima de fluidização e de α , de modo com que a operação pudesse ser aplicada aos três elutriadores em série. O Quadro 2 mostra as condições obtidas para os três elutriadores em série.

Quadro 2. Condições ótimas de operação para os elutriadores 1, 2 e 3 em série.

Parâmetros	Elutriador 1	Elutriador 2	Elutriador 3
W_{ri} (g)	17,84	20,26	22,25
k_{ri} (g m ⁻² s ⁻¹)	0,07	0,06	0,06
$D_{elutriador}$ (cm)	3,93	5,63	7,43
$\rho_{particula}$ (g cm ⁻³)	7,40	5,50	2,42
U_{mf} (m s ⁻¹)	51,51	25,11	14,41

Fonte: Autores.

Foi possível observar que os valores de $W(r_i)$ para a aplicação dos três elutriadores em série não manteve-se tão próxima de 20g (condição ideal) tanto quanto proposto para os elutriadores separados. Isso ocorreu, pois em posse dos valores, foi necessária a utilização da média de α , o que ocasionou ligeiras mudanças nos valores anteriormente propostos de $W(r_i)$ e $k(r_i)$.

Embora os valores tenham diferido dos valores propostos para os elutriadores separados, é possível concluir que houve a elutriação das partículas de propostas quando os elutriadores operaram em série, evidenciando uma elutriação bem sucedida.

4. Considerações Finais

Após aplicar as diferentes condições nas variáveis de vazão (Q), velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) e parâmetro alfa (α), foi possível perceber que significativas alterações na vazão do fluido não resultaram em variações expressivas na quantidade de massa de partículas retida no leito ($W(r_i)$) e na constante de elutriação ($k(r_i)$), diferentemente de variações no parâmetro alfa (α) e na velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), em que pequenas flutuações nos valores simulados alteravam significativamente as variáveis analisadas.

Para cada um dos elutriadores, analisados individualmente com determinada partícula em uma faixa de tamanho pré-estabelecida, foram encontradas diferentes condições ótimas para os parâmetros alfa (α) e velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), enquanto os valores ideais de vazão (Q) encontrados foram os mesmos para os três elutriadores. Para análise dos três elutriadores operando em série, foi feita, portanto, uma média entre as condições ótimas dos parâmetros citados.

As simulações, adaptadas do trabalho de Trabzuni, 2009, foram satisfatórias para o caso estudado, e a elutriação proposta levando em considerações as características físicas das partículas 1, 2 e 3 é bem-sucedida quando os elutriadores operam em série, evidenciando resultados coerentes com o que era esperado a partir da simulação feita no presente trabalho.

Os autores deixam como sugestões para trabalhos futuros a realização de testes com as dimensões, vazão e condições estabelecidas como ótimas neste trabalho.

Referências

- Amaral, A. J. R., & Filho, C. A. L. (2021). *Mineração*. <https://www.dnpm-pe.gov.br/Geologia/Mineracao.php>
- Colakyan, M., & Catipovic, N., & Jovanovic, G. & Fitzgerald, T. (1979). Elutriation from a Large Particle Fluidized Bed with and without Immersed Heat Transfer Tubes. *AIChE Symposium Series*, 77 (205), 66-75. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL8130426292>
- Cremsco, M. A. (2014). *Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidodinâmicos*. Blücher.
- Cremsco, M. A. (2014). *Vale a pena estudar Engenharia Química*. Blücher.
- Englert, A.H., & Rubio, J. (2011) *Beneficiamento de rejeito pirítico do processamento de carvão mineral por elutriação aquosa*.

- Follmer, L. R., & Beavers, A. H. (1973). *An Elutriator Method for Particle-size Analysis with Quantitative Silt Fractionation*. *Journal of Sedimentary Research*, 43(2), 544–549.
- 10.1306/74d727de-2b21-11d7-8648000102c1856d
- Foust, A.S., & Wenzel, L. A., & Clump, C.W., & Maus, L., & Andersen, L.B. (1982). *Princípio das Operações Unitárias*. Guanabara Dois.
- Geankoplis, C.J. (2006). *Procesos de transporte y principios de procesos de separación*. Compañía Editorial Continental.
- Gomide, R. (1980). *Operações Unitárias: separações mecânicas*. Câmara Brasileira do Livro (Edição do autor)
- Guha, S. K., & Kumar, A., & Gupta, P. S (1972). *Mechanism of Elutriation from Fluidized Beds*. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 50(5), 602-606. 10.1002/cjce.5450500508
- Hettler, E. N., & Gulliver, J. S., & Kayhanian, M. (2011). *An elutriation device to measure particle settling velocity in urban runoff*. *Science of the Total Environment*, 409(24), 5444-5453. 10.1016/j.scitotenv.2011.08.045
- Choi, J. H., & Sun, J. M., & Chang, I. Y. & Shun, D.W., & Yi, C. K., & Son, J. E., & Kim, S. D. (2001). *The effect of fine particles on elutriation of coarse particles in a gas fluidized bed*. *Powder Technology*, 121 (2-3), 190–194. 10.1016/s0032-5910(01)00333-3
- Klinger, C.; & Leidens, N.; & Nunes, I. S. (2017). *Construção de módulo de elutriação como ferramenta de contextualização para o ensino de operações unitárias*. IV Congresso Internacional de Educação Científica e Tecnológica, 10. (anais)
- Kloekner, J.; & Englert, A. H.; & Rubio, J. (2011). *Recuperação do mineral pirita (FeS₂) de rejeitos do processamento de carvão por elutriação aquosa*. XX Feira de Iniciação à Inovação e ao Desenvolvimento Tecnológico, p.3. (anais)
- Massarani, G. (2001). *Fluidodinâmica em sistemas particulados*. E-Papers.
- Merrick, D., & Highley, J. (1974). *Particle Size Reduction and Elutriation in a Fluidized Bed Process*. *AIChE symposium series*. 70(137), 366-378.
- Perry, R.H., & Chilton, C.H. (1986). *Manual de Engenharia Química*. Guanabara Dois.
- Silva, E. R. (2016). *Análise experimental e numérica do sistema de separação via elutriação de sedimento de drenagem*.
- Trabzuni, F. (2009). *Simulation of titanium dioxide (TiO₂) ore elutriation from chlorination fluidized bed reactors*. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 109(2), 129-133. http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532009000200006
- Wamburg, J. (2014). *Estudo confirma impactos da mineração no país*. Agência Brasil. <https://agenciabrasil.ebc.com.br/pesquisa-e-inovacao/noticia/2014-12/estudo-do-cetem-confirma-impactos-da-mineracao-no-pais>
- Wen, C. Y., & Chen, L. H. (1982). *Fluidized bed freeboard phenomena: Entrainment and elutriation*. *AIChE Journal*, 28(1), 117-128. 10.1002/aic.690280117
- Yates, J. G. (1983). *Fundamentals of Fluidized Bed Chemical Processes*: Butterworth.