



## **CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E EFICIÊNCIA DE COLETA DE NANOPARTÍCULAS EM UM PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO DE ENTRADA**

RAÍSSA G. S. A. ANDRADE<sup>1\*</sup>, VÁDILA G. GUERRA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química  
Departamento de Engenharia Química  
\*e-mail: raissagsaandrade@gmail.com

**RESUMO** - O precipitador eletrostático é uma alternativa viável para o controle da poluição do ar e seu desempenho está diretamente relacionado às condições operacionais utilizadas e à sua geometria. Dessa forma, o presente trabalho objetivou estudar a influência do espaçamento de entrada na eficiência de coleta de nanopartículas e nas características elétricas do equipamento. Para isso, foi utilizado um aerossol de NaCl (0,1 g/L), para uma faixa de diâmetro de partículas entre 6,15 e 241,4 nm. O precipitador eletrostático foi do tipo placa-fio de simples estágio, com duas placas coletoras de 10 cm de altura e 30 cm de comprimento, espaçadas em 6,5 cm. Foram utilizados 3 fios de aço inoxidável de 0,4 mm como eletrodos de descarga, espaçados entre si em 6,0 cm. As eficiências de coleta e as características elétricas do equipamento foram condizentes entre si, e as configurações com as menores voltagens de início apresentaram uma maior remoção de partículas. Por outro lado, não ocorreu uma variação linear entre o espaçamento de entrada e a eficiência de coleta de partículas. Cada espaçamento apresentou uma condição ótima de operação de acordo com a velocidade do ar utilizada, mas o espaçamento de 10,5 cm atingiu elevadas eficiências de coleta.

### **INTRODUÇÃO**

A emissão de partículas na atmosfera ainda se apresenta como um desafio no controle da poluição do ar. A inalação periódica dessas partículas desencadeia problemas respiratórios e cardiovasculares graves, câncer de pulmão, entre outros, podendo levar a óbito (OMS, 2021).

Nas últimas décadas, os equipamentos utilizados para realizar o controle dessas emissões se difundiram amplamente. Dentre eles estão os precipitadores eletrostáticos, filtros de manga, lavadores e ciclones. Cada equipamento possui suas particularidades, mas todos são capazes de atingir elevadas eficiências de coleta, de acordo com as condições operacionais utilizadas.

Devido à alta concentração de material particulado nas emissões industriais e ao seu caráter nocivo, é desejável que a eficiência de

coleta de partículas do equipamento seja mais próxima de 100% quanto possível.

A utilização do precipitador eletrostático é vantajosa por apresentar uma grande versatilidade para operar sob diversas condições, longa vida útil, baixa queda de pressão, baixos custos de manutenção e elevada eficiência (> 95%), a depender da faixa de diâmetro das partículas (Parker, 1997). Esse equipamento possui dois componentes principais, o eletrodo de coleta e descarga. Na sua operação, o eletrodo de descarga é carregado negativamente enquanto o eletrodo de coleta é aterrado. Por conta disso, é criado um campo elétrico no interior do precipitador eletrostático que permite a coleta de partículas a partir da deposição na superfície do eletrodo de coleta. O desempenho desse equipamento é influenciado por uma série de fatores, como temperatura, umidade, velocidade, campo elétrico e geometria.

A maior parte dos estudos envolvendo esse equipamento ainda são voltados para o

aumento da eficiência através de modificações nas condições operacionais, como velocidade e campo elétrico. Apesar de existirem uma série de estudos sobre o precipitador eletrostático, os tópicos que envolvem seus parâmetros geométricos ainda são negligenciados em comparação com as condições operacionais. Ainda assim, nos últimos anos foram desenvolvidos alguns trabalhos acerca do tema e foi observado que pequenas alterações, como a adição de um eletrodo de descarga, por exemplo, conseguem elevar a eficiência de coleta de forma significativa (Andrade e Guerra, 2020; Arif *et al.*, 2018; Kasdi, 2016) e a distribuição do campo elétrico no interior do precipitador eletrostático (Wang, 2020). Também foi concluído que diferentes configurações de diâmetros ou espaçamentos de fios, para citar alguns parâmetros, conseguiram apresentar o mesmo desempenho com determinadas condições operacionais (Lima, 2021). Esses estudos indicam que a geometria dos componentes internos do precipitador eletrostático influencia os mecanismos de carregamento e coleta das partículas.

A partir da análise dos trabalhos desenvolvidos na área, foi selecionado um parâmetro ainda não explorado na literatura, o espaçamento de entrada. Ou seja, a distância entre o início da placa coletora e o primeiro eletrodo de descarga. Acredita-se que esse parâmetro desempenha um papel importante na precipitação eletrostática devido à distribuição das linhas de campo elétrico no interior do equipamento.

Dessa forma, o presente trabalho objetiva avaliar o efeito de modificações geométricas na eficiência de coleta de nanopartículas em um precipitador eletrostático do tipo placa-fio de simples estágio. Para tanto, será avaliado o desempenho desse equipamento sob diferentes velocidades, a fim de determinar os efeitos desse parâmetro e do espaçamento de entrada na eficiência de coleta de partículas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Unidade Experimental

A unidade experimental utilizada para a realização dos testes está representada na Figura 1.

Inicialmente, um compressor Schulz (modelo MSV 12/175) fornece o ar a ser utilizado, que passa por um filtro de purificação TSI (modelo 3074B) para coleta de impurezas. Em paralelo, uma solução de NaCl 0,1 g/L é inserida em um gerador de nanopartículas TSI (modelo 3079), operando com uma vazão de 200 L/h.

O aerossol então segue para um secador por difusão TSI (modelo 3062), para reter o excesso de umidade. O fluxo de aerossol se une ao fluxo principal de ar e passa por uma fonte neutralizadora de Criptônio-85 (Kr-85) para neutralização das possíveis cargas adquiridas pelas partículas. Em seguida, esse fluxo passa pelo precipitador eletrostático, conectado a uma fonte de alta tensão SPELLMAN (modelo SL30PN300), que fornece a voltagem para ionização e coleta das partículas.

À jusante e à montante do precipitador estão localizadas duas sondas, conectadas a uma válvula de 3 vias, que permite determinar a região de amostragem das partículas. Após a passagem pela válvula de 3 vias, o aerossol passa por uma fonte neutralizadora de Amerício-241, para neutralização das cargas adquiridas no interior do precipitador eletrostático, para a aferição correta dos dados. Por fim, as partículas seguem para um sistema de análise de partículas por mobilidade elétrica (SMPS), formado por um classificador TSI (modelo 3080) e um contador de partículas TSI (modelo 3076), operando na faixa de diâmetro de 6,15 a 241,4 nm, durante 315 s, e um computador para visualização dos dados coletados. O controle da vazão volumétrica é realizado por um rotâmetro conectado à tubulação.

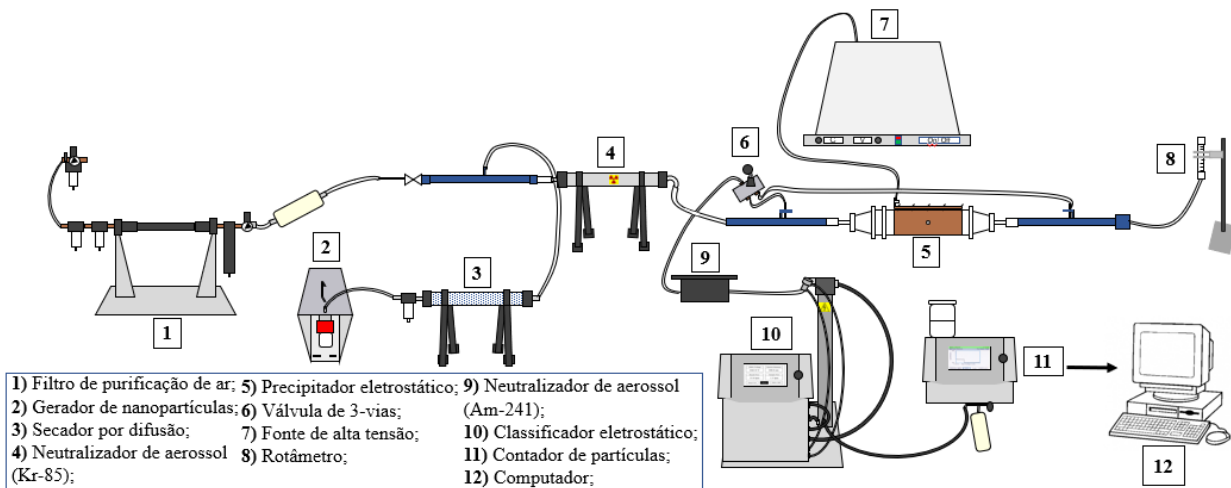


Figura 1 - Representação da unidade experimental.

Fonte: Adaptado de Andrade e Guerra (2020).

### Condições Operacionais e Parâmetros Geométricos

O precipitador eletrostático utilizado (Figura 2) é composto por duas placas coletoras de cobre com 30 cm de comprimento e 10 cm de altura, espaçadas entre si em 6,5 cm. Dispostos na região central entre as placas coletoras, foram inseridos 3 eletrodos de descarga, fios cilíndricos de aço inoxidável com 0,4 mm de diâmetro, espaçados entre si em 6,0 cm.

Para avaliação do espaçamento de entrada, foram selecionados os espaçamentos de 1,5, 4,5, 7,5, 10,5 e 13,5 cm, de forma a se obter a distribuição dos fios nas regiões inicial, central e final do duto do precipitador eletrostático. Essas configurações estão representadas na Figura 2. Para cada espaçamento de entrada foram utilizadas as velocidades do ar de 1, 2, 4 e 5 cm/s, com o campo elétrico de 3,11 kV/cm. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

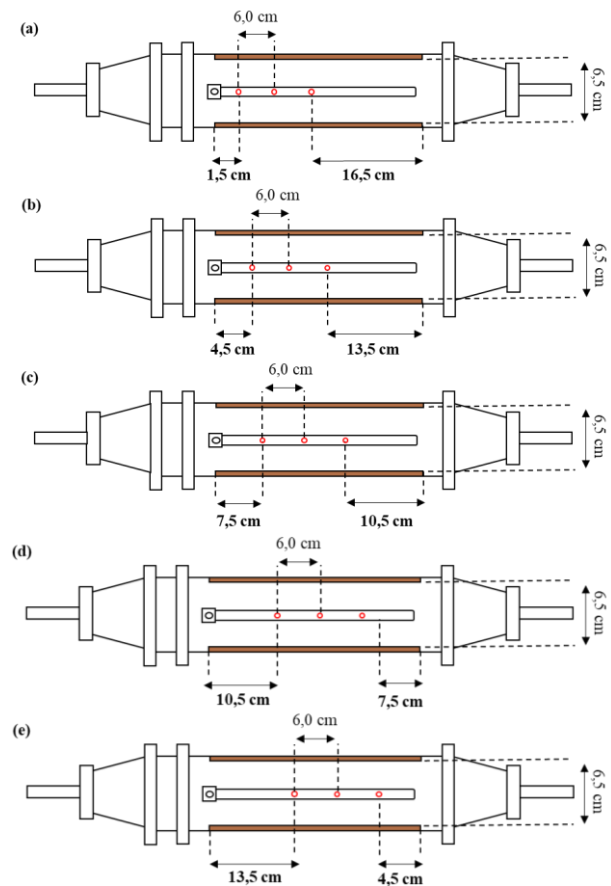


Figura 2 - Representação dos espaçamentos de entrada utilizados (vista superior do precipitador eletrostático).

### Propriedades elétricas e eficiência de coleta

Para compreensão das características elétricas do precipitador eletrostático, foi determinado os valores das voltagens de início

e de ruptura. Esses valores delimitam o ponto inicial e final da curva corrente-tensão, que relacionam a voltagem fornecida com a corrente elétrica obtida.

A eficiência global dos experimentos foi obtida a partir da Equação 1, que relaciona as concentrações de entrada e saída do aerossol.

$$\eta = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\% \quad (1)$$

Onde,

$\eta$ : Eficiência do precipitador eletrostático (%);

$C_i$ : Concentração de entrada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ );

$C_o$ : Concentração de saída ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ );

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Características Elétricas

Os valores das voltagens de início e de ruptura, para cada espaçamento de entrada, em função da velocidade do ar, estão expostos na Figura 3. Os dados apresentaram um perfil distinto de comportamento, quando comparados as concentrações de aerossol de 0 e 0,1 g/L.

No caso das voltagens de início (Figuras 3a e 3b), tanto a velocidade do ar quanto a concentração de partículas exerceram uma grande influência nos dados.

Com 0 g/L (Figura 3a), os espaçamentos de 1,5 a 10,5 cm apresentaram valores próximos, entre 10,8 e 11 kV, e entre 10,65 e 11,1 kV para o espaçamento de 13,5 cm. De maneira geral, as curvas possuem um perfil crescente, com uma pequena redução nos valores com a velocidade de 2 cm/s. Os espaçamentos de 1,5 e 4,5 cm apresentaram os mesmos valores, indicando uma semelhança no perfil elétrico dessas configurações. Para o espaçamento de 7,5 cm, as voltagens de início foram iguais ou inferiores aos menores espaçamentos, exceto pela velocidade de 5 cm/s. Menores valores de voltagem de início indicam uma maior corrente elétrica, pois a corrente corona inicia antes e pode atingir valores mais altos para uma determinada voltagem. Com o espaçamento de 10,5 cm ocorreu uma maior redução da voltagem de início. Por fim, o espaçamento de 13,5 cm

apresentou o comportamento distinto das demais curvas, com valores entre 10,65 e 11,1 kV, com um perfil crescente com o aumento da velocidade.

Com a concentração de 0,1 g/L (Figura 3b), as voltagens de início foram menores para os espaçamentos entre 1,5 e 10,5 cm. Novamente, as curvas de 1,5 e 4,5 cm foram sobrepostas. Diferente da concentração de 0 g/L, as curvas apresentaram valores crescentes com a velocidade do ar. Desse modo, as maiores velocidades estão associadas a uma menor corrente elétrica, como pode ser observada pelas maiores voltagens de início. A curva referente ao espaçamento de 12,5 cm apresentou o mesmo comportamento da obtida com a concentração de 0 g/L, mas com valores um pouco superiores.

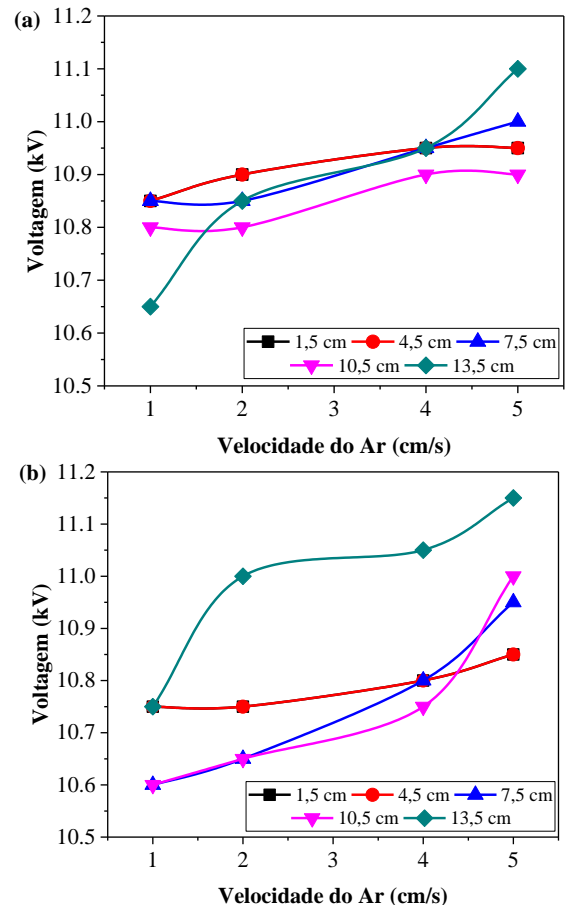


Figura 3 - Voltagens de início com as concentrações de (a) 0 g/L e (b) 0,1 g/L, em função da velocidade do ar, para cada espaçamento de entrada.

Para as voltagens de ruptura (Figuras 4a e 4b), foi utilizada uma escala diferente no gráfico, para melhor visualização dos valores.

Com a concentração de 0 g/L (Figura 4a), os valores para os espaçamentos de 7,5, 10,5 e 13,5 cm variaram entre 19,2 e 20 kV, aproximadamente. Algumas variações foram observadas, mas as oscilações são comuns nas voltagens de ruptura. No caso dos espaçamentos de 1,5 e 4,5 cm, a voltagem de ruptura atingiu um pico máximo com a velocidade de 2 cm/s, indicando que a faixa de operação para essas velocidades é mais extensa.

Com a concentração de 0,1 g/L (Figura 4b), as curvas apresentaram uma menor oscilação, principalmente as de 1,5 e 4,5 cm. Os espaçamentos de 7,5 e 10,5 cm foram semelhantes ou menores que os com a concentração de 0 g/L, e os espaçamentos de 1,5 e 4,5 cm apresentaram um comportamento crescente, exceto pela velocidade de 5 cm/s. Para o espaçamento de 7,5 cm, os valores foram levemente maiores, indicando uma menor corrente elétrica.

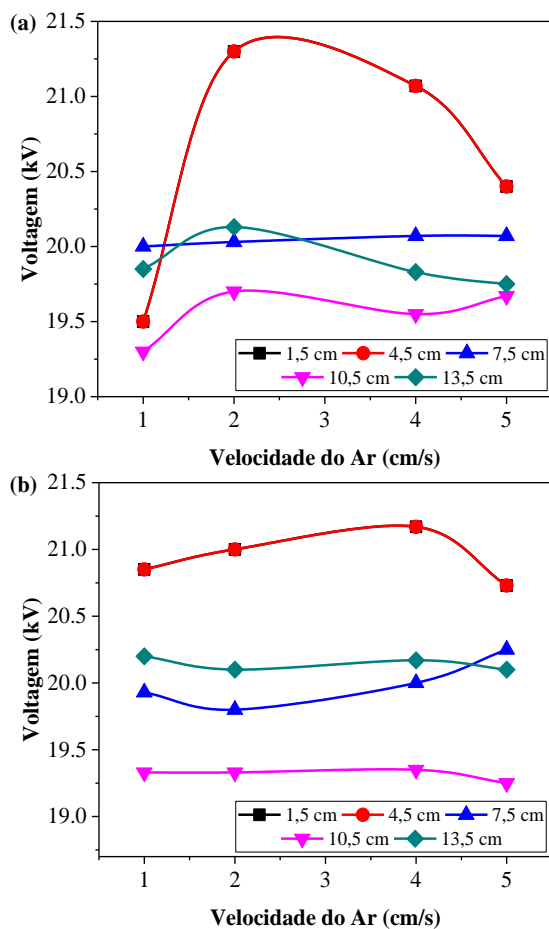


Figura 4 - Voltagens de ruptura com as concentrações de (a) 0 g/L e (b) 0,1 g/L, em função da velocidade do ar, para cada espaçamento de entrada.

## Eficiência de Coleta

Para melhor visualização da influência dos parâmetros avaliados na eficiência de coleta de partículas, os dados obtidos foram plotados em dois gráficos distintos.

No gráfico da Figura 5, as eficiências de coleta de partículas são apresentadas em função do espaçamento de entrada, para cada velocidade do ar. No caso da Figura 6, os esses dados estão apresentados em função da velocidade do ar, para cada espaçamento de entrada.

Pela análise da Figura 5 é possível perceber a influência da velocidade do ar nos resultados de eficiência. As eficiências diminuíram com o aumento da velocidade, devido ao menor tempo de residência das partículas no interior do precipitador eletrostático. As velocidades de 4 e 5 cm/s foram praticamente sobrepostas e apresentaram um perfil mais oscilatório, em função do espaçamento de entrada, em comparação com as menores velocidades.

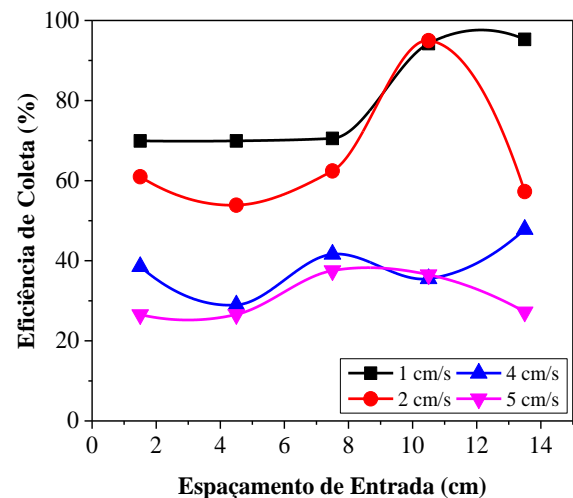


Figura 5 - Eficiência global em função do espaçamento de entrada, para cada velocidade do ar.

Pelas curvas, observa-se que cada velocidade do ar apresentou um melhor desempenho sob determinadas condições. Para a velocidade de 1 cm/s, os espaçamentos de 10,5 e 13,5 cm obtiveram as maiores eficiências de coleta, enquanto para a velocidade de 2 cm/s foi com o espaçamento de 10,5 cm. Além disso, nessa condição, ocorreu uma queda brusca de eficiência quando o espaçamento de entrada

aumentou para 13,5 cm. A velocidade de 4 cm/s apresentou resultados semelhantes com vários espaçamentos, sendo os de melhor desempenho 1,5, 7,5 e 13,5 cm. Por fim, com a velocidade de 5 cm/s, os espaçamentos de 7,5 e 10,5 cm se destacaram por sua maior eficiência de coleta.

A comparação entre as eficiências de coleta obtidas com os diferentes espaçamentos pode ser visualizada na Figura 6. Esse gráfico evidencia que a velocidade do ar e a eficiência de coleta são inversamente proporcionais. Os espaçamentos de 1,5 e 7,5 cm apresentaram resultados praticamente iguais, com todas as velocidades utilizadas. O espaçamento de 10,5 cm atingiu elevadas eficiências de remoção de partículas com as velocidades de 1 e 2 cm/s. Esse resultado corrobora os menores valores de voltagem de início discutidos nas Figuras 3a e 3b.

Com exceção dessas condições e do espaçamento de 13,5 cm, com 1 cm/s, as eficiências de coleta não diferiram tanto entre si. O espaçamento de 4,5 cm apresentou o pior desempenho com as condições operacionais utilizadas. Esse comportamento não era esperado, uma vez que essa configuração obteve características elétricas muito semelhantes com o espaçamento de 1,5 cm, como discutido na subseção anterior.

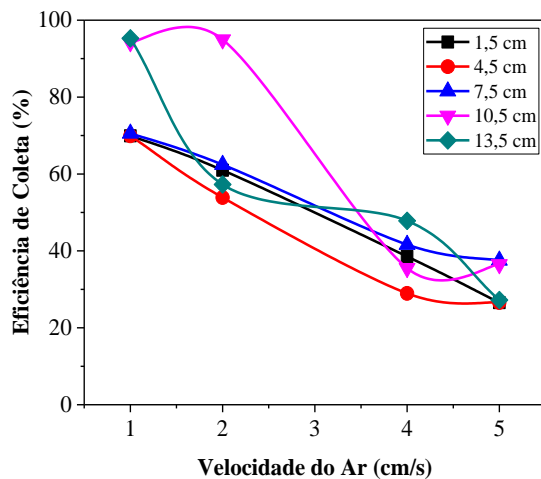


Figura 6 - Eficiência global em função da velocidade do ar, para cada espaçamento de entrada.

## CONCLUSÃO

O desempenho do precipitador eletrostático é influenciado diretamente pelas condições operacionais e parâmetros geométricos utilizados. O presente trabalho

avaliou o impacto da variação do espaçamento de entrada, entre a entrada do duto do precipitador eletrostático e o primeiro eletrodo de descarga, na eficiência de coleta de partículas. Além disso, foram realizados experimentos com diversas velocidades do ar.

As eficiências de coleta apresentaram resultados coerentes com as características elétricas, visto que as configurações com menores voltagens de início obtiveram as maiores eficiências de coleta.

Por outro lado, os resultados obtidos indicaram que não ocorreu uma variação linear entre o espaçamento de entrada e a eficiência de coleta de partículas. Cada espaçamento apresentou uma condição ótima de operação de acordo com a velocidade do ar utilizada. Para o campo elétrico avaliado (3,11 kV), os resultados indicaram o melhor desempenho com o espaçamento de 10,5 e 13,5 cm, em determinadas condições. Entretanto, os demais espaçamentos também apresentaram uma eficiência de coleta satisfatória com as menores velocidades do ar.

Além disso, os resultados comprovam a capacidade do precipitador eletrostático de alcançar um bom desempenho com condições operacionais diversas, além de ser influenciado por muitas condições operacionais. Assim, é necessário que a configuração do precipitador eletrostático escolhida esteja diretamente relacionada com o material utilizado e as propriedades de entrada e saída do processo a ser realizado.

## NOMENCLATURA

$\eta$ : Eficiência do precipitador eletrostático (%);  
 $C_i$ : Concentração de entrada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ );  
 $C_o$ : Concentração de saída ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ );  
 $I$ : Corrente elétrica ( $\mu\text{A}$ );

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, entidade do Governo Brasileiro voltada para a formação de recursos humanos.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R. G. S. A.; GUERRA, V. G. (2020), Discharge electrode influence on electrostatic precipitation of nanoparticles. *Powder Technology*, Vol 379, p.417–427.
- ARIF, S.; BRANKEN, D. J.; EVERSON, R. C.; NEOMAGUS, H. W. J. P.; ARIF, A. (2018), The influence of design parameters on the occurrence of shielding in multi-electrode ESPs and its effect on performance. *Journal of Electrostatics*, Vol 93, n. June, p.17–30.
- KASDI, A. (2016), Computation and measurement of corona current density and V–I characteristics in wires-to-plates electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*, Vol 81, p.1–8.
- LIMA, F. DE A. (2021), Avaliação de diferentes condições geométricas e operacionais de precipitadores eletrostáticos na coleta de nanopartículas. PPGEQ/UFSCar – São Carlos – SP, 164p. (dissertação de mestrado).
- OMS. Ambient (outdoor) air pollution, WHO, 2021. Disponível em: <[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-andhealth](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-andhealth)>. Acesso em: 23 jan. 22
- PARKER, K. R. (1997), *Applied Electrostatic Precipitation*. Blackie Academic & Professional, London.
- WANG, X. (2020), Effects of corona wire distribution on characteristics of electrostatic precipitator. *Powder Technology*, Vol 366, p.36–42.