

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**AValiação de diferentes condições geométricas e operacionais de
precipitadores eletrostáticos na coleta de nanopartículas**

Felipe de Aquino Lima

São Carlos/SP

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**AValiação de diferentes condições geométricas e operacionais de
precipitadores eletrostáticos na coleta de nanopartículas**

Felipe de Aquino Lima

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Vádila Giovana Guerra Béttega

São Carlos/SP

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Felipe de Aquino Lima, realizada em 22/02/2021.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega (UFSCar)

Prof. Dr. Marcos Vinicius Rodrigues (UNIFAL)

Profa. Dra. Mônica Lopes Aguiar (UFSCar)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

*“A menos que modifiquemos a nossa
maneira de pensar, não seremos
capazes de resolver os problemas
causados pela forma como nos
acostumamos a ver o mundo”*

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu força e resignação para passar por todos os obstáculos.

À minha família, pois não poderia ter chegado a onde cheguei sem o apoio de vocês. Em especial, aos meus pais, José e Sônia, minha irmã Débora e minha avó Nair. Muito obrigado por todo o suporte, pelos conselhos, por acreditar em mim e por fazerem o possível e o impossível para que eu alcançasse esse sonho. Essa conquista também é de vocês! Ao meu sobrinho/afilhado Heitor, que chegou no meio desse processo para trazer a esperança que faltava. Espero contribuir para um mundo melhor para você!

À professora Vádila Giovana Guerra Béttega, pelo exemplo de pessoa e profissional, que garantiu todo o suporte e orientação durante a execução desse trabalho, além de todos os ensinamentos que me fizeram crescer profissionalmente. À professora Mônica Lopes Aguiar por todo o apoio, por dividir seu conhecimento e trazer o desejo que ele se multiplicasse. Agradeço aos servidores técnico-administrativos do DEQ e da UFSCar, em especial ao Marcos, técnico dos laboratórios do Controle Ambiental, que sempre se prontificou a me ajudar a solucionar problemas e sanar minhas dúvidas.

Aos meus amigos de Samonte, sou grato por todos os momentos bons que passamos e por me mostrarem que a amizade é muito maior que qualquer distância e diferença. Aos meus amigos de São Carlos pelo companheirismo e pela grande amizade que construímos, obrigado por todo apoio, suporte e momentos incríveis. Aos amigos do Controle Ambiental, pelo companheirismo diário, por todo aprendizado e por me ajudarem em todos os momentos que precisei.

Também agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo suporte financeiro para desenvolvimento dessa pesquisa.

RESUMO

O desenvolvimento e otimização de equipamentos que visam a remoção de nanopartículas do ar atmosférico vêm ganhando importância no cenário atual. Os efeitos adversos dessas partículas ultrafinas à saúde humana e meio ambiente motivam o desenvolvimento de técnicas para sua remoção, tanto pela sustentabilidade dos processos quanto pela mitigação de poluentes. Dentre os equipamentos comumente empregados, os precipitadores eletrostáticos se destacam pela versatilidade e, para determinadas configurações, eficiências de até 99,9% em uma ampla faixa de tamanho. A recente literatura vem empregando precipitadores a úmido com boa performance. Entretanto, a formação de um novo efluente líquido e a dificuldade de recuperação de partículas com valor agregado encoraja a busca de outras alternativas. Com isso, a operação a seco se destaca pela correção desses problemas e pelos menores custos de operação. Dessa forma, o presente trabalho visa avaliar a influência do campo elétrico, velocidade e dos seguintes parâmetros geométricos: espaçamento entre placas (4 e 6,5 cm) e espaçamento entre eletrodos de descarga (4, 6, 12 cm). Para isso foi realizada uma varredura entre os campos elétricos de 0,0 kV/cm e 5,0 kV/cm para diferentes velocidades do ar (1,9, 2,9 e 3,9 cm/s). Foram utilizados dois precipitadores eletrostáticos com espaçamentos entre placas diferentes, ambos do tipo placa-fio de simples estágio, com duas placas coletoras com comprimento e altura de 30 e 10 cm, respectivamente, com três eletrodos de descarga de diâmetro de 0,4 mm. Os resultados comprovaram a eficiência do precipitador em remover nanopartículas, com eficiências acima de 99,9% para campos elétricos de 5,0 kV/cm em ambos os precipitadores. Já o aumento da velocidade não apresentou um comportamento bem definido, com aumento da eficiência ao aumentar a velocidade em algumas condições. Em geral, a utilização de espaçamentos entre fios de 4 cm apresentou queda na eficiência de coleta de nanopartículas com a diminuição do tempo de residência. Na varredura do campo elétrico para verificar a influência do espaçamento entre placas, maiores variações da eficiência de coleta ocorreram entre os campos de 3,1 e 3,4 kV/cm para o precipitador com espaçamento entre placas de 6,5 cm e entre campos de 4,0 e 4,5 kV/cm para o precipitador com espaçamento de 4 cm. Para um mesmo campo elétrico, o precipitador com espaçamento entre placas de 6,5 cm apresentou melhor capacidade de coleta. Eficiências acima de 99% foram obtidas com campos elétricos acima de 3,4 kV/cm e 4,5 kV/cm para espaçamentos entre 6,5 cm e 4 cm, respectivamente. Deve-se salientar que maiores eficiências são obtidas com uma menor voltagem aplicada no precipitador com menor espaçamento entre placas. Logo, mesmo que o precipitador com espaçamento de 6,5 cm tenha apresentado melhores eficiências com base no campo elétrico, o custo energético é maior devido a maior voltagem aplicada. Na avaliação do espaçamento entre fios, o aumento dos valores desse parâmetro proporcionou maior corrente e, em geral, melhores eficiências de coleta. No entanto, diferenças pouco significativas foram obtidas ao se aumentar o campo elétrico, com remoções de 99,9% para todos os espaçamentos em 5,0 kV/cm. As curvas de eficiência global pelo campo elétrico apresentaram comportamento sigmoide, com maior taxa de aumento da eficiência próximo ao início da corona. Pela análise estatística foi possível comprovar o efeito significativo do espaçamento entre placas e espaçamento entre fios. Além disso, estatisticamente o espaçamento entre placas e campo elétrico são mais influentes que a velocidade e espaçamento entre fios.

Palavras-chave: Precipitação eletrostática, nanopartículas, controle ambiental, poluição atmosférica.

ABSTRACT

The development and optimization of equipment aimed at removing nanoparticles from atmospheric air have been gaining importance in the current scenario. The adverse effects of these ultrafine particles on human health and the environment motivate the development of techniques for their removal, both for the processes' sustainability and the mitigation of pollutants. Among the commonly used equipment, electrostatic precipitators stand out for their versatility and, for certain configurations, efficiencies are up to 99.9% in a wide size range. The recent literature has employed wet precipitators with good performance. However, the formation of a new liquid effluent and the difficulty of recovering particles with added value encourages the search for other alternatives. With this, dry operation stands out for the correction of these problems and the lower operating costs. Thus, the present work aims to evaluate the influence of the electric field, velocity, and the following geometric parameters: plate spacing (4 and 6.5 cm) and wire spacing (4, 6, and 12 cm). For this, a scan will be performed between the electric fields of 0.0 kV/cm and 5.0 kV/cm for different air velocities (1.9, 2.9, and 3.9 cm/s). Two electrostatic precipitators with different plate spacing were used, both with single stage wire-plate type, with two collecting plates with length and height of 30 and 10 cm, respectively, with three discharge electrodes with a diameter of 0.4 mm. The results showed the efficiency of the precipitator in removing nanoparticles, with efficiencies above 99.9% for electric fields of 5.0 kV/cm in both precipitators. The increase in velocity did not present a well-defined behavior, with increased efficiency by increasing the velocity in some conditions. In general, the use of 4 cm wire spacing showed a decrease in the efficiency of nanoparticle collection with the reduction of residence time. In the scanning of the electric field to verify the influence of plate spacing, greater variations in the collection efficiency occurred between the fields of 3.1 and 3.4 kV/cm for the precipitator with spacing between plates of 6.5 cm, and between fields of 4.0 and 4.5 kV/cm for the precipitator with a spacing of 4 cm. For the same electric field, the precipitator with a plate spacing of 6.5 cm presented better collection capacity. Efficiencies above 99% were obtained with electric fields above 3.4 kV/cm and 4.5 kV/cm for spacings between 6.5 cm and 4 cm, respectively. It should be noted that higher efficiencies are obtained with a lower voltage applied in the precipitator with less plate spacing. Therefore, even though the precipitator with the spacing of 6.5 cm presented better efficiencies based on the electric field, the energy cost is higher due to the higher voltage applied. In the evaluation of the wire spacing, the increase in the values of this parameter provided greater current and, in general, better collection efficiencies. However, few significant differences were obtained by increasing the electric field, with removals of 99.9% for all spacings at 5.0 kV/cm. The overall efficiency curves by the electric field showed sigmoid behavior, with a higher rate of efficiency increase near the beginning of the corona. By statistical analysis, it was possible to verify the significant effect of plate spacing and wire spacing. Also, statistically, the plate spacing and electric field are more influential than the velocity and wire spacing.

Keywords: Electrostatic precipitation, nanoparticles, environmental control, atmospheric pollution.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 2.1. Poluição do Ar e Material Particulado..... | 4 |
| 2.2. Nanopartículas | 5 |
| 2.2.1. Características de partículas em escala nanométrica..... | 5 |
| 2.2.2. Aplicações de nanopartículas | 8 |
| 2.2.3. Emissões de nanopartículas e partículas ultrafinas..... | 9 |
| 2.2.4. Efeitos à saúde humana | 10 |
| 2.3. Precipitador Eletrostático..... | 13 |
| 2.3.1. Ionização do gás | 15 |
| 2.3.2. Carregamento das partículas..... | 18 |
| 2.3.3. Velocidade de migração das partículas | 20 |
| 2.3.4. Eficiência de coleta..... | 21 |
| 2.3.5. Fatores que influenciam a precipitação eletrostática..... | 23 |
| 2.4. Estudos envolvendo o uso de precipitadores eletrostáticos na coleta de partículas .. | 29 |
| 3. OBJETIVOS..... | 41 |
| 3.1. Objetivo geral | 41 |
| 3.2. Objetivos específicos | 41 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 42 |
| 4.1. Unidade experimental | 42 |
| 4.1.1. Compressor de ar | 44 |
| 4.1.2. Filtro de purificação de ar..... | 45 |
| 4.1.3. Gerador de nanopartículas | 46 |
| 4.1.4. Solução para geração de nanopartículas..... | 47 |
| 4.1.5. Secador por difusão | 47 |
| 4.1.6. Fontes neutralizadoras | 48 |
| 4.1.7. Amostragem de partículas | 48 |
| 4.1.8. Classificador eletrostático..... | 49 |
| 4.1.9. Contador de partículas | 52 |
| 4.2. Precipitadores eletrostáticos..... | 54 |
| 4.3. Procedimentos experimentais | 56 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.3.1. | Curva Corrente-Tensão..... | 57 |
| 4.3.2. | Testes preliminares | 57 |
| 4.3.3. | Avaliação da influência do espaçamento entre placas | 58 |
| 4.3.4. | Avaliação da influência do espaçamento entre fios..... | 60 |
| 4.4. | Análise estatística | 61 |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 63 |
| 5.1. | Testes preliminares | 63 |
| 5.1.1. | Propriedades do aerossol | 63 |
| 5.1.2. | Parâmetros elétricos..... | 71 |
| 5.1.3. | Testes de eficiência de coleta | 73 |
| 5.2. | Avaliação da influência do espaçamento entre placas..... | 77 |
| 5.2.1. | Curvas corrente-tensão | 77 |
| 5.2.2. | Número eletro-hidrodinâmico | 80 |
| 5.2.3. | Testes de eficiência de coleta | 81 |
| 5.3. | Avaliação da influência do espaçamento entre fios..... | 94 |
| 5.3.1. | Curvas corrente-tensão | 94 |
| 5.3.2. | Número eletro-hidrodinâmico | 97 |
| 5.3.3. | Testes de eficiência de coleta | 99 |
| 5.4. | Análise estatística | 114 |
| 5.4.1. | Avaliação do espaçamento entre placas, velocidade e campo elétrico..... | 114 |
| 5.4.2. | Avaliação do espaçamento entre fios, espaçamento entre placas, velocidade e campo elétrico | 123 |
| 6. | CONCLUSÕES E SUGESTÕES | 135 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 137 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Representação do tamanho da partícula em relação ao caminho livre médio do gás onde: (a) partícula de diâmetro D_1 é muito maior que o caminho livre médio das moléculas do gás e (b) a partícula possui diâmetro D_2 aproximadamente igual ao caminho livre médio das moléculas do gás..... | 7 |
| Figura 2. Representação do processo de precipitação eletrostática..... | 13 |
| Figura 3. Representação de um precipitador eletrostático: (a) simples estágio; (b) duplo estágio. | 14 |
| Figura 4. Representação de um precipitador eletrostático: (a) tubo-fio; (b) placa-fio. | 15 |
| Figura 5. Representação de uma curva corrente-tensão. | 16 |
| Figura 6. Princípio do efeito corona e desenvolvimento da avalanche de elétrons..... | 17 |
| Figura 7. Representação das linhas de campo elétrico para uma partícula condutora em um campo elétrico uniforme: (a) partícula não-carregada; (b) partícula parcialmente carregada; (c) partícula com carga de saturação. | 19 |
| Figura 8. Valores calculados da constante d/a para valores de s/a entre 0,6 e 2,0. | 24 |
| Figura 9. Eletro-fluidodinâmica de um precipitador placa-fio para diferentes voltagens. | 25 |
| Figura 10. Principais dimensões e elementos de um precipitador do tipo placa-fio onde: $2s$ é o espaçamento entre as placas, $2r_{SE}$ é o diâmetro dos fios e $2c$ é o espaçamento entre fios. | 27 |
| Figura 11. Representação de diferentes configurações do eletrodo de coleta (placas) onde: (a) tipo lisa; (b) tipo cerca; (c) tipo U. | 27 |
| Figura 12. Representação de diferentes configurações do eletrodo de descarga (fios) onde: (a) haste em espiral; (b) haste com serras; (b) haste com dentes quadrados; (c) haste em forma de estrela; (e) haste com elementos quadrados torcidos; (f) faixa lisa; (g) tira serrilhada. | 28 |
| Figura 13. Linhas de campo para um precipitador eletrostático do tipo placa-fio. | 29 |
| Figura 14. Fluxograma da unidade experimental onde: (1) Filtros de ar; (2) Gerador atomizador; (3) Secador de difusão; (4) Fonte de Kr-85; (5) Precipitador eletrostático; (6) Fonte de alta tensão; (7) Rotâmetro; (8) Válvula de três vias; (9) Fonte de Am-241; (10) Classificador eletrostático; (11) Contador de partículas; (12) Microcomputador. | 42 |
| Figura 15. Representação gráfica da unidade experimental. | 43 |
| Figura 16. Representação do compressor. | 45 |
| Figura 17. Filtro de purificação de ar da TSI, modelo 3074B..... | 45 |

| | |
|---|----|
| Figura 18. gerador de nanopartículas TSI, modelo 3079A, com vazão de aerossol ajustável. | 46 |
| Figura 19. Esquema do funcionamento do gerador de nanopartículas..... | 46 |
| Figura 20. Secador por difusão da TSI, modelo 3062..... | 47 |
| Figura 21. Fonte neutralizadora de Kr-85 da TSI, modelo 3054..... | 48 |
| Figura 22. Sonda de amostragem na tubulação de escoamento do aerossol. | 49 |
| Figura 23. Classificador eletrostático da TSI, modelo 3080, com um analisador de mobilidade diferencial longo (<i>Long DMA</i>) da TSI, modelo 3081..... | 50 |
| Figura 24. Esquema do impactador inercial. | 50 |
| Figura 25. Esquema dos fluxos e componentes internos do classificador eletrostático acoplado ao <i>Long DMA</i> | 52 |
| Figura 26. Contador de partículas ultrafinas por condensação (UCPC) da TSI, modelo 3776. | 53 |
| Figura 27. Esquema dos fluxos e componentes internos do contador de partículas. | 54 |
| Figura 28. Representação do precipitador eletrostático com cotas nas principais dimensões onde: (a) vista frontal; (b) vista superior. | 55 |
| Figura 29. Distribuição granulométrica das nanopartículas na entrada do precipitador eletrostático para diferentes vazões onde: (a) P.I.; (b) P.II. | 64 |
| Figura 30. Distribuição granulométrica das nanopartículas de aerossol na entrada do precipitador eletrostático para diferentes velocidades onde: (a) P.I.; (b) P.II. | 64 |
| Figura 31. Curvas pressão em diferentes vazões onde: (a) queda de pressão; (b) pressão manométrica no início da linha principal. | 67 |
| Figura 32. Curvas pressão em diferentes velocidades onde: (a) queda de pressão; (b) pressão manométrica no início da linha principal. | 67 |
| Figura 33. Distribuição granulométrica das nanopartículas na entrada do precipitador eletrostático nas velocidades de (a) 1,9 cm/s (em número); (b) 2,9 cm/s (em número); (c) 3,9 cm/s; (d) 1,9 cm/s (em massa); (e) 2,9 cm/s (em massa); (f) 3,9 cm/s (em massa). | 69 |
| Figura 34. Curvas corrente-tensão para diferentes velocidades onde: (a) 1,9 cm/s; (b) 2,9 cm/s; (c) 3,9 cm/s; (d) 2,9 cm/s (corrente-campo elétrico). | 72 |
| Figura 35. Eficiência fracionária para ambos os precipitadores em diferentes voltagens nas velocidades de: (a) 1,09 cm/s, (b) 2,09 cm/s e (c) 3,09 cm/s. | 75 |
| Figura 36. Eficiência fracionária para ambos os precipitadores em diferentes campos elétricos nas velocidades de: (a) 1,09 cm/s, (b) 2,09 cm/s e (c) 3,09 cm/s. | 76 |

| | |
|--|-----|
| Figura 37. Curvas corrente-tensão para diferentes espaçamentos entre placas e nas velocidades de: (a) 1,9 cm/s; (b) 2,9 cm/s; (c) 3,9 cm/s..... | 78 |
| Figura 38. Valores de N_{EHD}/Re^2 para diferentes espaçamentos entre placas e velocidades onde: (a) campos elétricos até 3,0 kV/cm; (b) campos elétricos entre 3,0 e 5,0 kV/cm. | 80 |
| Figura 39. Varredura da eficiência global pelo campo elétrico para diferentes espaçamentos entre placas nas velocidades de: (a) 1,9 cm/s; (b) 2,9 cm/s; (c) 3,9 cm/s..... | 82 |
| Figura 40. Varredura da eficiência global pela voltagem para diferentes espaçamentos entre placas nas velocidades de: (a) 1,9 cm/s; (b) 2,9 cm/s; (c) 3,9 cm/s..... | 85 |
| Figura 41. Variação da eficiência global pela velocidade utilizando o precipitador com espaçamento de 4 cm (P.I.)..... | 88 |
| Figura 42. Variação da eficiência global pela velocidade utilizando o precipitador com espaçamento de 6,5 cm (P.II.). | 88 |
| Figura 43. Eficiências fracionárias para ambos os precipitadores e diferentes velocidades ao se aplicar o campo elétrico de: (a) 3,0 kV/cm; (b) 3,15 kV/cm; (c) 3,25 kV/cm; (d) 3,4 kV/cm; (e) 4,25 kV/cm; (f) 4,3 kV/cm; (g) 4,4 kV/cm; (h) 5,0 kV/cm. | 91 |
| Figura 44. Curvas corrente-tensão para o precipitador P.I. com diferentes espaçamentos entre fios e nas velocidades de: (a) 1,9 cm/s; (b) 2,9 cm/s; (c) 3,9 cm/s..... | 95 |
| Figura 45. Curvas corrente-tensão para o precipitador P.II. com espaçamentos entre fios e nas velocidades de: (a) 1,9 cm/s; (b) 2,9 cm/s; (c) 3,9 cm/s..... | 96 |
| Figura 46. Valores de N_{EHD}/Re^2 obtidos para o precipitador P.I. com diferentes espaçamentos entre fios e velocidades..... | 98 |
| Figura 47. Valores de N_{EHD}/Re^2 obtidos para o precipitador P.II. com diferentes espaçamentos entre fios e velocidades..... | 98 |
| Figura 48. Varredura da eficiência global pelo campo elétrico para os precipitadores P.I. e P.II. com diferentes espaçamentos entre fios e nas velocidades de: (a) 1,9 cm/s; (b) 2,9 cm/s; (c) 3,9 cm/s..... | 100 |
| Figura 49. Variação da eficiência global pela velocidade utilizando o precipitador com espaçamento de 4 cm (P.I.) com espaçamentos entre fios de: (a) 4 cm; (b) 6 cm; (c) 12 cm. | 103 |
| Figura 50. Variação da eficiência global pela velocidade utilizando o precipitador com espaçamento de 6,5 cm (P.II.) com espaçamentos entre fios de: (a) 4 cm; (b) 6 cm; (c) 12 cm. | 104 |
| Figura 51. Eficiências fracionárias para o precipitador P.I. com espaçamentos entre fios de 4, 6 e 12 cm ao se utilizar a velocidade de 1,9 cm/s e campos elétricos de: (a) 4,0 kV/cm; (b) 4,25 | |

| | |
|--|-----|
| kV/cm; (c) 4,3 kV/cm; (d) 4,35 kV/cm; (e) 4,4 kV/cm; (f) 4,45 kV/cm; (g) 4,6 kV/cm; (h) 5,0 kV/cm. | 106 |
| Figura 52. Eficiências fracionárias para o precipitador P.I. com espaçamentos entre fios de 4, 6 e 12 cm ao se utilizar a velocidade de 2,9 cm/s e campos elétricos de: (a) 4,0 kV/cm; (b) 4,25 kV/cm; (c) 4,3 kV/cm; (d) 4,35 kV/cm; (e) 4,4 kV/cm; (f) 4,45 kV/cm; (g) 4,6 kV/cm; (h) 5,0 kV/cm..... | 107 |
| Figura 53. Eficiências fracionárias para o precipitador P.I. com espaçamentos entre fios de 4, 6 e 12 cm ao se utilizar a velocidade de 3,9 cm/s e campos elétricos de: (a) 4,0 kV/cm; (b) 4,25 kV/cm; (c) 4,3 kV/cm; (d) 4,35 kV/cm; (e) 4,4 kV/cm; (f) 4,45 kV/cm; (g) 4,6 kV/cm; (h) 5,0 kV/cm. | 108 |
| Figura 54. Eficiências fracionárias para o precipitador P.II. com espaçamentos entre fios de 4, 6 e 12 cm ao se utilizar a velocidade de 1,9 cm/s e campos elétricos de: (a) 3,0 kV/cm; (b) 3,1 kV/cm; (c) 3,15 kV/cm; (d) 3,20 kV/cm; (e) 3,25 kV/cm; (f) 3,3 kV/cm; (g) 3,35 kV/cm; (h) 3,4 kV/cm..... | 111 |
| Figura 55. Eficiências fracionárias para o precipitador P.II. com espaçamentos entre fios de 4, 6 e 12 cm ao se utilizar a velocidade de 2,9 cm/s e campos elétricos de: (a) 3,0 kV/cm; (b) 3,1 kV/cm; (c) 3,15 kV/cm; (d) 3,20 kV/cm; (e) 3,25 kV/cm; (f) 3,3 kV/cm; (g) 3,35 kV/cm; (h) 3,4 kV/cm..... | 112 |
| Figura 56. Eficiências fracionárias para o precipitador P.II. com espaçamentos entre fios de 4, 6 e 12 cm ao se utilizar a velocidade de 3,9 cm/s e campos elétricos de: (a) 3,0 kV/cm; (b) 3,1 kV/cm; (c) 3,15 kV/cm; (d) 3,20 kV/cm; (e) 3,25 kV/cm; (f) 3,3 kV/cm; (g) 3,35 kV/cm; (h) 3,4 kV/cm..... | 113 |
| Figura 57. Diagrama de Pareto referente aos resultados do planejamento fatorial com campo elétrico de 3,0 e 4,0 kV/cm..... | 115 |
| Figura 58. Gráfico de probabilidade normal dos resíduos referente aos resultados do planejamento fatorial com campo elétrico de 3,0 e 4,0 kV/cm. | 117 |
| Figura 59. Valores de eficiência preditos versus observados para planejamento fatorial com campo elétrico de 3,0 e 4,0 kV/cm. | 117 |
| Figura 60. Superfícies de resposta referentes aos resultados do planejamento fatorial com campo elétrico de 3,0 e 4,0 kV/cm em função de: (a) campo elétrico e espaçamento entre placas; (b) velocidade e espaçamento entre placas; (c) campo elétrico e velocidade; (d) gráfico de contornos para campo elétrico e espaçamento entre placas. | 118 |

| | |
|--|-----|
| Figura 61. Diagrama de Pareto referente aos resultados do planejamento fatorial com campo elétrico de 4,0 e 5,0 kV/cm..... | 120 |
| Figura 62. Gráfico de probabilidade normal dos resíduos referente aos resultados do planejamento fatorial com campo elétrico de 4,0 e 5,0 kV/cm. | 122 |
| Figura 63. Valores de eficiência preditos versus observados para planejamento fatorial com campo elétrico de 4,0 e 5,0 kV/cm. | 122 |
| Figura 64. Superfícies de resposta referentes aos resultados do planejamento fatorial com campo elétrico de 3,0 e 4,0 kV/cm em função de: (a) campo elétrico e espaçamento entre placas; (b) velocidade e espaçamento entre placas; (c) campo elétrico e velocidade; (d) gráfico de contornos para campo elétrico e espaçamento entre placas. | 123 |
| Figura 65. Diagrama de Pareto referente aos resultados do planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 4 e 12 cm..... | 125 |
| Figura 66. Gráfico de probabilidade normal dos resíduos referente aos resultados do planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 4 e 12 cm..... | 127 |
| Figura 67. Valores de eficiência preditos versus observados para planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 4 e 12 cm..... | 127 |
| Figura 68. Superfícies de resposta referentes aos resultados do planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 4 e 12 cm em função de: (a) espaçamento entre placas e velocidade; (b) espaçamento entre fios e velocidade; (c) campo elétrico e velocidade; (d) espaçamento entre fios e espaçamento entre placas; (e) campo elétrico e espaçamento entre placas; (f) campo elétrico e espaçamento entre fios..... | 128 |
| Figura 69. Diagrama de Pareto referente aos resultados do planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 6 e 12 cm..... | 130 |
| Figura 70. Gráfico de probabilidade normal dos resíduos referente aos resultados do planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 6 e 12 cm..... | 132 |
| Figura 71. Valores de eficiência preditos versus observados para planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 6 e 12 cm..... | 132 |
| Figura 72. Superfícies de resposta referentes aos resultados do planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 6 e 12 cm em função de: (a) espaçamento entre placas e velocidade; (b) espaçamento entre fios e velocidade; (c) campo elétrico e velocidade; (d) espaçamento entre fios e espaçamento entre placas; (e) campo elétrico e espaçamento entre placas; (f) campo elétrico e espaçamento entre fios..... | 133 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1. Dimensões dos precipitadores eletrostáticos que foram utilizados nesse trabalho... | 56 |
| Tabela 2. Experimentos realizados nos testes preliminares com voltagem e campo elétrico .. | 58 |
| Tabela 3. Experimentos realizados nos testes de avaliação da influência do espaçamento entre placas | 59 |
| Tabela 4. Experimentos realizados nos testes de avaliação da influência do espaçamento entre fios | 60 |
| Tabela 5. Planejamento fatorial para avaliação estatística da influência do espaçamento entre placas, velocidade e campo elétrico | 61 |
| Tabela 6. Planejamento fatorial para avaliação estatística da influência do espaçamento entre fios, espaçamento entre placas, velocidade e campo elétrico..... | 62 |
| Tabela 7. Umidade relativa do gás (%) para as condições utilizadas de vazão e velocidade total | 66 |
| Tabela 8. Concentração em número de partículas, mediana e desvio padrão geométrico (σ) da distribuição granulométrica de nanopartículas na entrada dos precipitadores em diferentes velocidades | 70 |
| Tabela 9. Concentração mássica de partículas, mediana e desvio padrão geométrico (σ) da distribuição granulométrica de nanopartículas na entrada dos precipitadores em diferentes velocidades | 70 |
| Tabela 10. Voltagem e corrente de início da corona e relação entre número eletro-hidrodinâmico e número de Reynolds (N_{EHD}/Re^2) | 73 |
| Tabela 11. Correntes elétricas medidas do aerossol após a passagem pelo precipitador eletrostático e estimativa da carga elétrica média das partículas..... | 87 |
| Tabela 12. Efeito estimado, erro padrão, valor de t e grau de significância estatística (p) para o planejamento fatorial com campo elétrico de 3,0 e 4,0 kV/cm | 115 |
| Tabela 13. Análise de variância do modelo ajustado para o planejamento fatorial com campo elétrico de 3,0 e 4,0 kV/cm..... | 116 |
| Tabela 14. Efeito estimado, erro padrão, valor de t e grau de significância estatística (p) para o planejamento fatorial com campo elétrico de 4,0 e 5,0 kV/cm | 119 |
| Tabela 15. Análise de variância do modelo ajustado para o planejamento fatorial com campo elétrico de 4,0 e 5,0 kV/cm..... | 121 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 16. Efeito estimado, erro padrão, valor de t e grau de significância estatística (p) para o planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 4 e 12 cm..... | 125 |
| Tabela 17. Análise de variância do modelo ajustado para o planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 4 e 12 cm..... | 126 |
| Tabela 18. Efeito estimado, erro padrão, valor de t e grau de significância estatística (p) para o planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 6 e 12 cm..... | 130 |
| Tabela 19. Análise de variância do modelo ajustado para o planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 6 e 12 cm..... | 131 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Definição | Unidade |
|----------------|--|---------------------|
| λ | Caminho livre médio | L |
| μ | Viscosidade dinâmica | $M L^{-1} t^{-1}$ |
| ν | Viscosidade cinemática | $L^2 t^{-1}$ |
| P | Pressão | $M L^{-1} t^{-2}$ |
| M | Peso molecular | M |
| T | Temperatura absoluta | T |
| d_p | Diâmetro da partícula | L |
| Kn | Número de Knudsen | Adimensional |
| Q_p^∞ | Carga de saturação | I t |
| ϵ_0 | Permissividade elétrica no vácuo | t L |
| ϵ_r | Permissividade relativa do material | Adimensional |
| E | Campo elétrico | $M L I^{-1} t^{-3}$ |
| $C(d_p)$ | Coefficiente de correção de Cunningham | Adimensional |
| $w(d_p)$ | Velocidade de migração | $L T^{-1}$ |
| η | Eficiência de coleta | % |
| C_i | Concentração de partículas na entrada | $M L^{-3}$ |
| C_f | Concentração de partículas na saída | $M L^{-3}$ |
| $\eta_D(d_p)$ | Eficiência de coleta do Modelo de Deutsch | % |
| l | Comprimento do eletrodo de coleta | L |
| u | Velocidade do gás | $L t^{-1}$ |
| s | Distância entre eletrodos de coleta e descarga | L |
| A' | Área de coleta | L^2 |
| Q | Taxa de fluxo volumétrico | $L^3 t^{-1}$ |
| h | Altura dos eletrodos de coleta | L |
| η_{ZG} | Eficiência de coleta do Modelo de Zhibin e Guoquan | % |
| Pe | Número de Péclet | Adimensional |
| De | Número de Deutsch | Adimensional |
| y | Comprimento perpendicular ao fluxo do gás | L |

| | | |
|-----------|---|-----------------------|
| D | Difusividade da partícula | $L^2 t^{-1}$ |
| ξ | Razão entre o comprimento perpendicular (y) e o espaçamento entre placa e fio (s) | Adimensional |
| V | Voltagem | $M L^2 I^{-1} t^{-3}$ |
| N_{EHD} | Número eletro-hidrodinâmico | Adimensional |
| I | Corrente elétrica | I |
| ρ_f | Densidade do gás | $M L^{-3}$ |
| Z_i | Mobilidade elétrica dos íons | $t I M^{-1}$ |
| Re | Número de Reynolds | Adimensional |
| l_d | Comprimento do fio de descarga | L |
| d | Constante | L |
| r_o | Raio do eletrodo de descarga | L |
| V_o | Voltagem de início da corona | $M L^2 I^{-1} t^{-3}$ |
| a | Espaçamento entre fios | L |
| $2s$ | Espaçamento entre placas | L |
| $2c$ | Espaçamento entre fios | L |
| $2r_{SE}$ | Diâmetro do eletrodo de descarga | L |
| p | Grau de significância estatística | Adimensional |

1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade tornou-se uma das principais preocupações de muitas empresas, organizações e governos. Com o crescente apreço por este conceito, também aumentou a busca por tecnologias para reduzir o efeito das ações antropogênicas no meio ambiente e na sociedade. Nesse contexto, a nanotecnologia permitiu a criação de materiais que propiciaram significativos avanços em áreas como energia, eletrônica e medicina.

Esses avanços são em parte associados às diferentes propriedades ópticas, magnéticas e elétricas que as nanopartículas exibem ao se comparar com o mesmo material em escalas maiores, como micrométrica (REMIRO, 2018). Com base nisso, há uma preocupação com os potenciais efeitos negativos que essas mudanças podem causar e, portanto, parece haver um paradoxo entre o desenvolvimento e a aplicação da nanotecnologia (GAUTHIER; GENET, 2014).

Estudos toxicológicos e dos efeitos ambientais demonstraram evidências de bioacumulação de nanopartículas e transferência pela cadeia alimentar nos organismos aquáticos, além de alterações na dinâmica das comunidades de bactérias do solo (CARBONE *et al.*, 2014; JOVANOVIĆ; PALIĆ, 2012; LEKAMGE *et al.*, 2019). Efeitos negativos também são sentidos pelo ser humano devido aos danos à saúde causados pela inalação de nanoparticulados (OLIVEIRA, 2019).

Essas nanopartículas, mesmo com menor massa, se apresentam mais numerosas, possuem alta superfície, neurotoxicidade, facilidade de penetração pulmonar e capacidade de serem transportadas pela corrente sanguínea e acessar outros órgãos, células e estruturas subcelulares (BRUNEKREEF; HOLGATE, 2002; CALDERÓN-GARCIDUEÑAS *et al.*, 2019). Devido a essa capacidade, pesquisas envolvendo a exposição a nanopartículas de metais em ratos, demonstraram que elas podem atingir o cérebro, causar estresse e diminuição da viabilidade celular e aumentar a incidência no desenvolvimento de doenças neurodegenerativas, como Alzheimer, Parkinson, doença mental e redução da inteligência (MAHER *et al.*, 2016; WU; DING; SUN, 2013).

Portanto, com o crescente aumento de emissões de partículas ultrafinas (<100 nm), pelas indústrias e centros urbanos, torna-se necessário a implementação de meios eficientes para sua remoção do ar. Outro ponto importante é o aprimoramento de processos não somente para mitigar os danos causados por esse tamanho de partícula, mas como pela recuperação de

materiais que podem apresentar valor agregado. Nesse sentido, processos que envolvem a síntese e/ou utilização de nanopartículas de ouro, prata e paládio, em escala laboratorial e industrial, seriam beneficiados com a coleta de suas emissões no ar (BODDU *et al.*, 2011; HARRA *et al.*, 2012; HILLMAN *et al.*, 2017). Além desses, dependendo da concentração das emissões, a recuperação de partículas ultrafinas de óxidos de ferro, óxidos de prata, óxidos de titânio e óxidos de alumínio em escala industrial poderia trazer uma diminuição dos custos, a longo prazo, na implementação de equipamentos de controle dessas emissões (VANCE *et al.*, 2015).

Os poucos trabalhos que visam a remoção de nanoparticulados propõem uso de equipamentos como colunas de bolha, filtros de membrana, eletro ciclone, precipitadores eletrostáticos e o desenvolvimento de meio filtrantes para filtros de mangas (CADAVID-RODRIGUEZ *et al.*, 2014; CYRS *et al.*, 2010; FEITOSA, 2009; LIN *et al.*, 2013; OLIVEIRA, 2019; WANG; OTANI, 2013).

Dentre esses equipamentos, os precipitadores eletrostáticos se destacam pela versatilidade, alta eficiência, baixa resistência e adaptabilidade a diferentes tipos de partículas (LU *et al.*, 2016). Para determinadas configurações, eficiência de até 99,9% no controle de emissões atmosféricas pode ser obtida em uma ampla faixa de tamanho. De toda forma, essa técnica precisa ser avaliada afim de obter tal eficiência na escala nanométrica.

De forma geral, o funcionamento de um precipitador eletrostático se baseia na descarga corona, criada pelos eletrodos de descarga, que carrega as partículas suspensas no ar, distorce sua trajetória com o campo elétrico induzido em direção ao eletrodo de coleta e as intercepta na placa coletora (HE; DASS, 2018). O seu desempenho também sofre influência dos seguintes parâmetros: operacionais, como vazão de gás e concentração de partículas; mecânicos, como a distância entre fios, diâmetro dos fios, distância entre placas; e elétricos, como a voltagem aplicada e polaridade (CHEN *et al.*, 2014; KHALED; ELDEIN, 2013; LU *et al.*, 2016). Entre estes, os estudos que envolvem alterações da geometria para melhorar eficiência de coleta de nanopartículas ainda são escassos.

Em geral, os estudos para remoção de particulado em escala nanométrica têm se concentrado na utilização de precipitadores a úmido e na aglomeração das partículas na corrente de entrada. Entretanto, conforme explicitado por Oliveira (2019), mesmo com boas eficiências, a geração de lama no processo a úmido gera um inconveniente que é a formação de um efluente líquido. Além disso, nos casos em que as partículas apresentam valor agregado, a operação a seco mostra-se mais interessante e economicamente viável.

Nesse viés, é incentivador buscar novas formas de otimizar o processo de precipitação eletrostática para remoção de nanoparticulados. Tal otimização envolve, além de parâmetros operacionais, a avaliação das influências dos parâmetros geométricos na coleta de nanopartículas.

Dessa forma, o escopo do presente trabalho visa avaliar a influência da geometria do precipitador eletrostático na remoção de partículas na faixa nanométrica. Foi avaliado como a eficiência de coleta se altera com mudanças no espaçamento entre os eletrodos de coleta (placas) e espaçamento entre os eletrodos de descarga (fios). Para tal, foi realizado uma varredura de campo elétrico para entender como esses parâmetros geométricos influenciam o processo em diferentes velocidades do aerossol. A partir disso, um planejamento experimental foi utilizado para determinação estatística da influência desses parâmetros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, inicialmente será discutido a poluição do ar e o conceito de material particulado, com ênfase nas nanopartículas, suas características, aplicações, emissões e periculosidade. Devido a isso, será evidenciado o precipitador eletrostático como equipamento de controle, demonstrando suas características, teoria e influência de parâmetros operacionais e geométricos.

2.1. Poluição do Ar e Material Particulado

A poluição do ar é um problema mundial que se acentuou com o aumento da industrialização e urbanização. A introdução de substâncias à atmosfera afeta a qualidade do ar e causa grandes problemas ao meio ambiente e saúde pública. Dentre os contaminantes, como NO_x , SO_x , CO e CO_2 , o material particulado (MP) se destaca por apresentar composições e características variadas, muitas das quais contribuem com sua periculosidade. Seus efeitos, dependentes da toxicidade, tempo de exposição e concentração, são alvos de diversos estudos. Muitos desses demonstraram evidências que a poluição atmosférica está associada desenvolvimento de doenças no sistema respiratório inferior e cardiovascular, como alergia, asma, pneumonia e câncer (FANN *et al.*, 2012; FIORDELISI *et al.*, 2017; LAUMBACH; KIPEN, 2012).

Os efeitos ambientais e o tempo que as partículas se mantêm suspensas variam de acordo com seu tamanho. Frequentemente, se utiliza o diâmetro aerodinâmico, ou seja, o diâmetro de uma esfera de densidade unitária que possui a mesma velocidade terminal da partícula estudada, para caracterizar os particulados (HINDS, 1999). Em termos práticos, as MP_{10} (menores que 10 μm) podem penetrar no sistema respiratório inferior, enquanto as $\text{MP}_{2,5}$ (menores que 2,5 μm) podem penetrar na região de troca gasosa do pulmão. Uma atenção especial deve ser dada as ultrafinas (menores que 100 nm) que, mesmo com menor massa, se apresentam mais numerosas, com alta superfície, facilidade de penetração pulmonar e capazes de acessar órgãos, células e estruturas subcelulares (BRUNEKREEF; HOLGATE, 2002; CALDERÓN-GARCIDUEÑAS *et al.*, 2019).

Com base nisso, é um consenso geral que partículas com menores diâmetros aerodinâmicos apresentam um maior potencial de causar efeitos adversos à saúde humana. Logo, as partículas nanométricas começaram a ser alvo de inúmeras pesquisas que identificaram várias evidências epidemiológica e clínicas dos prejuízos causados com a sua inalação (GWINN; VALLYATHAN, 2006).

2.2. Nanopartículas

As partículas ultrafinas e nanopartículas são partículas em escala nanométrica (10^{-9} m) que se apresentam sob diversas formas no meio ambiente. Partículas deste tamanho apresentam características singulares em relação a partículas e superfícies macroscópicas (QUINA, 2004). Em termos gerais, há uma distinção entre esses termos, onde partículas ultrafinas se referem às partículas que são geradas incidentalmente no ambiente, em geral com composição e tamanho heterogêneo, frequentemente como subprodutos da combustão de combustíveis fósseis, condensação de substâncias semivoláteis, queima de madeira, emissões industriais, enquanto as nanopartículas são fabricadas por processos controlados de engenharia, apresentando composição e tamanho homogêneos (LI *et al.*, 2016; NEL, 2006). Nesse trabalho esses termos serão utilizados como sinônimos.

A ISO/TS 12025:2012 define essas partículas como as que compreendem a escala nanométrica, ou seja, entre 1 e 100 nm. Entretanto, não há um consenso na literatura sobre qual diâmetro aerodinâmico pode-se considerar uma partícula como nanopartícula. Falaguasta (2005), Hinds (1999) e Pui e Chen (1997) classifica como nanopartículas as menores que 50 nm. Para Joodatnia e colaboradores (2013) as partículas nanométricas são as menores que 300 nm, enquanto para Bencs e colaboradores (2017) são entre 10 a 300 nm. Meira (2009) define essas partículas como menores que 250 nm. Li e colaboradores (2016), Löndahl e colaboradores (2014), Mohnen e Hidy (2010), Mushtaq e colaboradores (2015), Oberdörster e colaboradores (2005) consideram como nanopartículas aquelas menores que 100 nm.

2.2.1. Características de partículas em escala nanométrica

As características únicas e novas que as partículas ultrafinas e nanopartículas

apresentam são associadas ao seu tamanho extremamente pequeno, composição química (pureza, cristalinidade, propriedades eletrônicas), estrutura superficial (reatividade superficial, grupos superficiais), solubilidade, forma e agregação (LI *et al.*, 2016; NEL, 2006). Além disso, aerossóis de partículas em escala nanométrica são mais dinâmicos e apresentam características singulares em relação às partículas micrométricas, devido à maior sensibilidade a efeitos físicos, como a difusão browniana (ISO, 2012; OLIVEIRA, 2019).

Para explicar esses efeitos, deve-se entender dois conceitos: o caminho livre médio do gás e o movimento browniano. O caminho livre médio (λ) é definido como a distância média que a molécula do gás percorre entre colisões sucessivas (Equação 1) e o movimento browniano é o movimento aleatório e irregular da partícula causada pelas colisões de moléculas do gás contra a partícula (DULLIEN, 1989; HESKETH, 1996; HINDS, 1999).

$$\lambda = \frac{\mu}{0,499P(8M/\pi RT)^{0,5}} \quad (1)$$

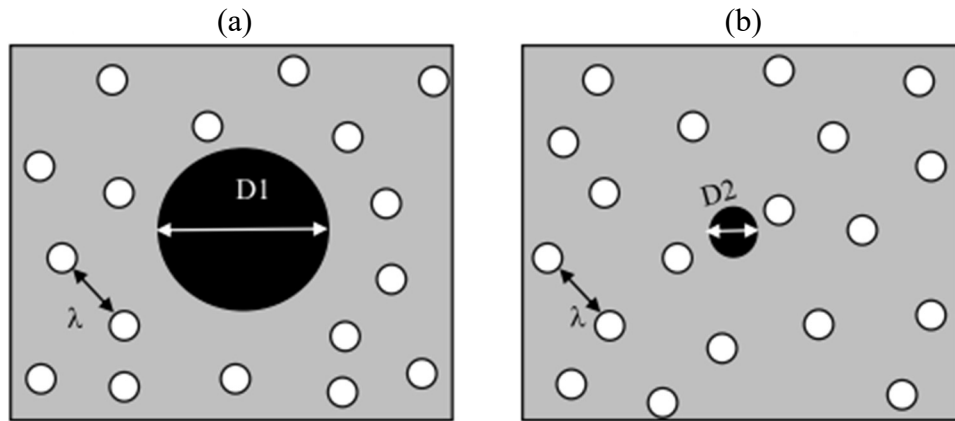
Nessa equação, μ é a viscosidade do ar (Kg/ms), P é a pressão (Pa), M é o peso molecular e T é a temperatura absoluta (K).

Partículas com grandeza micrométrica, em média, terão percorrido uma distância igual ao caminho livre médio (em condições padrões apresenta um valor de 0,066 μm) desde a última colisão com outra molécula de gás. Seu diâmetro é muito maior que esse caminho livre médio e a partícula se comporta como em um meio contínuo (HINDS, 1999; OLIVEIRA, 2019). A Figura 1 mostra uma comparação entre o tamanho da partícula e o caminho livre médio.

À medida que as partículas diminuem de tamanho, para um dado caminho livre médio do gás, elas começam a escapar do contato com as moléculas do gás. Assim, a forma que a partícula interage com as moléculas do gás é diferente, apresentando interações com outras entidades química e difusão aleatória em todas as direções. Quando isso ocorre, partículas extremamente pequenas se comportam de maneira diferente e veem o meio como algo descontínuo (HESKETH, 1996; HINDS, 1999).

Esse efeito é demonstrando quando se observa o coeficiente de difusão para partículas de tamanhos diferentes. A 20°C, para uma partícula de 0,01 μm é $5,4 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e para uma partícula de 10 μm é $2,4 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Ou seja, o transporte por difusão é 20 mil vezes mais rápido na partícula 0,01 μm . Como o coeficiente de difusão caracteriza a intensidade do movimento browniano, tem-se que esse fenômeno é bem pronunciado em partícula menores (HINDS, 1999).

Figura 1. Representação do tamanho da partícula em relação ao caminho livre médio do gás onde: (a) partícula de diâmetro $D1$ é muito maior que o caminho livre médio das moléculas do gás e (b) a partícula possui diâmetro $D2$ aproximadamente igual ao caminho livre médio das moléculas do gás.



Fonte: Oliveira (2019).

Também pode-se avaliar o comportamento da partícula através do número de Knudsen, que relaciona o caminho livre médio das moléculas do gás e o diâmetro da partícula (d_p), dado pela Equação 2. Se $Kn < 0,1$ e $d_p > 1,3 \mu\text{m}$, a partícula é maior que o caminho livre médio e se comporta como se estivesse em um meio contínuo. Para $Kn \leq 0,3$ e $d_p \geq 0,04 \mu\text{m}$ é chamado de fluxo de escorregamento. Já para $Kn > 10$ e $d_p < 0,01 \mu\text{m}$ a partícula possui a mesma ordem de grandeza das moléculas do gás e interage como se fosse uma molécula perante as moléculas do gás. Com Kn entre 0,3 e 10 e $0,01 < d_p < 0,4 \mu\text{m}$ é chamado de região de transição, quando $Kn \approx 1$ existe dificuldade para determinação do comportamento e os dados não são confiáveis (HESKETH, 1996; HINDS, 1999).

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (2)$$

Com essas propriedades diferentes, juntamente com o pequeno tamanho e área superficial, as partículas em escala nanométrica passaram a serem estudadas e aplicadas em diversas áreas. Sua geração se acentuou nas universidades, indústrias e empresas emergentes nesse ramo. Esses avanços nas áreas de nanociência e nanotecnologia resultaram em inúmeras possibilidades de aplicações em produtos de consumo (LANGER; WEISSLEDER, 2015; STONE; JOHNSTON; CLIFT, 2007; VANCE *et al.*, 2015)

2.2.2. Aplicações de nanopartículas

A nanotecnologia, atualmente, aparece como uma das tecnologias com grande potencial para ajudar na solução de problemas que envolvem a sustentabilidade e uso de recursos energéticos (GAUTHIER; GENET, 2014). As aplicações de nanomateriais e nanopartículas permitiram o desenvolvimento de uma gama de produtos que vão desde catalisadores, tintas e tecidos até medicamentos, técnicas de liberação de fármacos e cosméticos em áreas como eletrônica, medicina, agronegócio e alimentícia (ROSSI-BERGMANN, 2008). O portal *The Nanodatabase* (2020), desenvolvido pela DTU *Environment*, pelo Conselho de Ecologia da Dinamarca (*Danish Ecological Council*) e pelo Conselho de Pesquisa da Dinamarca (*Danish Consumer Council*), criou um banco de dados para coleta de informações e categorização de nanomateriais utilizados em produtos de consumo. No inventário, acessado em 10 de fevereiro de 2020, estava catalogado 3120 produtos contendo nanopartículas.

O Projeto sobre Nanotecnologias Emergentes (2013) do Centro Internacional Woodrow Wilson para Pesquisadores mantém um banco de dados on-line de nanoprodutos de consumo (Projeto sobre Inventário de Produtos de Consumo para Nanotecnologias Emergentes 2009). Essa plataforma cataloga produtos de consumo que anunciam abertamente a utilização de nanocomponentes. Em sua atualização mais recente, com informações acessadas em 10 de fevereiro de 2020, haviam 1833 produtos catalogados.

Com base no projeto do Centro Internacional Woodrow Wilson, Vance e colaboradores (2015) avaliaram o inventário lançado em outubro de 2013 onde constava 1814 produtos de consumo de 622 empresas em 32 países. Dentre o total de produtos cadastrados, 42% são referentes a categoria Saúde e Boa Forma. Além disso, 37% dos produtos advertem sobre o uso de metais e óxidos de metais, sendo a prata o nanomaterial mais utilizado (24%). Outros materiais como óxidos de titânio, óxidos de zinco e óxidos de silício e ouro. Entre os nanomateriais carbonáceos (89 produtos), as nanopartículas de carbono são as mais utilizadas (39 produtos). Entretanto, 49% dos produtos incluídos nessa plataforma não fornecem a composição do nanomaterial utilizado.

A primeira onda da nanotecnologia foi sentida principalmente no campo da informática e eletrônica, particularmente na fabricação de chips para computadores, tablets e smartphones. O avanço rápido nas pesquisas nessa área permitiu a criação de produtos químicos nanoestruturados, formas mais eficientes de administração de fármacos, melhoras em exames

de imagem e nas ferramentas de diagnósticos para medicina (DEMELLO; WOOLLEY, 2010; GYLES, 2012).

As perspectivas são promissoras e podem permitir uma melhoria da qualidade de vida nos mais diversos setores. Para Quina (2004), os nanomateriais tem potencial para aumentar a eficiência dos processos e, conseqüentemente, um aproveitamento mais eficiente de matérias primas, com menor consumo energético e menor geração de resíduos. Nesse sentido, as nanopartículas ou nanomateriais vem sendo aplicados na área catalítica para aumentar a eficiência e a seletividade de processos industriais (SHAO *et al.*, 2013), na parte terapêutica para obter melhores formas de assimilação de medicamentos pelo corpo humano (BAMRUNGSAP *et al.*, 2012; GYLES, 2012; LANGER; WEISSLEDER, 2015), na área de cosméticos com desenvolvimento de melhores sistemas de entrega e absorção dos produtos (MU; SPRANDO, 2010) e em outras áreas, como na fabricação de supercapacitores e baterias (LIU *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2014).

O recente avanço da nanotecnologia, embora abra novas oportunidades de avanços na tecnologia e medicina, poderiam também causar efeitos adversos a saúde com a exposição a humanos. Mais pesquisas são necessárias para esclarecer a segurança das partículas em nanoescala, bem como a elucidação do possível uso benéfico dessas partículas no tratamento de doenças (Li *et al.*, 2016)

2.2.3. Emissões de nanopartículas e partículas ultrafinas

Mesmo o desenvolvimento da nanotecnologia sendo algo recente, a presença de partículas ultrafinas no ar não é algo recente nem incomum. Entretanto, elas passaram a ser um problema com o aumento das emissões e a dificuldade em caracterizar geograficamente ou ao longo do tempo, já que a concentração sofre influência de parâmetros como umidade e temperatura ambiente, direção do vento e a distância da fonte de emissão (LI *et al.*, 2016; WEICHENTHAL *et al.*, 2008)

Em média, o número de partículas ultrafinas em áreas urbanas se encontra na ordem de 10^4 partículas/cm³, enquanto em áreas rurais são na ordem de 10^3 partículas/cm³ (MATSON, 2005). Entretanto, regiões populosas ou industriais apresentam concentrações em número com ordens de grandeza maiores, como 10^6 partículas/cm³ (HEITBRINK *et al.*, 2007).

Muitos estudos envolvendo partículas ultrafinas focam em áreas urbanas e rodovias, principalmente causada por emissões de veículos. Cheng e colaboradores (2010) realizou um estudo em um pedágio de uma rodovia de Taiwan com um tráfego de 227 mil veículos por dia e mostrou que as pessoas que trabalham nessa região estão expostas a concentrações de partículas ultrafinas na faixa de $9,3 \times 10^3 - 1,6 \times 10^5$ partículas/cm³. Wheatley e Sadhra (2004) relataram, através de medições paralelas dos níveis de fumaça de diesel no ar em depósitos que utilizavam empilhadeiras movidas a diesel, uma exposição de partículas ultrafinas na faixa de $5,8 \times 10^4 - 2,3 \times 10^5$ partículas/cm³.

Em processos industriais o aumento de partículas nessa faixa de tamanho também é expressivo. Cheng e colaboradores (2008) mostraram que as concentrações em número de partículas ultrafinas em uma fundição de ferro estavam entre $2,07 \times 10^4 - 2,82 \times 10^5$ partículas/cm³. Em um estudo de Heitbrink e colaboradores (2007), em uma instalação de usinagem e montagem de motores, as concentrações de número de partículas muito finas foram de $7,5 \times 10^5$ partículas/cm³ quando aquecedores a gás natural eram utilizados e 3×10^5 partículas/cm³ quando aquecedores a vapor eram utilizados.

Elihn e Berg (2009) estudaram as características de partículas ultrafinas em sete plantas industriais e mediu as concentrações em dez atividades de trabalho, como soldagem, corte a laser, fundição, fabricação de núcleos, moldagem, concretagem, retificação, peneiramento e lavagem. Concentrações de $1,5 \times 10^4$ a $8,8 \times 10^4$ partículas/cm³ foram obtidas em atividades com soldagem de aço, retificação e lavagem de aço fundido, de $2,5 \times 10^4$ a $3,9 \times 10^4$ partículas/cm³ para a fundição de ferro, de $5,0 \times 10^4$ a $1,3 \times 10^5$ partículas/cm³ para a fundição de aço, de $1,2 \times 10^4$ a $2,2 \times 10^4$ partículas/cm³ para construções com concreto e de $1,2 \times 10^4$ a $9,6 \times 10^4$ partículas/cm³ para moldagem e peneiramento de pós de aço.

2.2.4. Efeitos à saúde humana

As mesmas propriedades que tornam as nanopartículas tão únicas, também podem afetar de forma negativa o meio ambiente. Entretanto, as pesquisas envolvendo seus impactos não conseguem acompanhar a rápida proliferação de pesquisas para desenvolvimento e aplicações de nanomateriais. Essa preocupação com seus efeitos negativos vem dos problemas advindos de outros materiais que também se apresentaram promissores no passado. Como no caso do amianto, com suas décadas de longa latência e efeitos à saúde, existem muitas preocupações

legítimas sobre as consequências desconhecidas para a saúde humana dos nanomateriais (GWINN; VALLYATHAN, 2006).

De forma geral, a inalação é uma das vias de acesso mais perigosas de nanopartículas. A presença de nanopartículas no ar atmosférico é preocupante devido a sua alta eficiência de deposição pulmonar e grande vida útil na atmosfera, podendo ser transportadas por milhares de quilômetros e permanecerem no ar por vários dias (GWINN; VALLYATHAN, 2006; HINDS, 1999). Sua toxicidade, embora influenciada por parâmetros como o tipo de espécie química, potencial de agregação/desagregação, capacidade de adsorver outros poluentes, está bastante associada ao seu pequeno tamanho e grande área superficial (WARHEIT, 2004). Justamente esses dois últimos itens que tornam as partículas ultrafinas mais tóxicas à saúde que partículas de tamanhos maiores (OBERDÖRSTER, 2000).

Estudos demonstram que, após inaladas, as nanopartículas podem atingir a região de troca gasosa, atravessar a barreira ar-sangue, acessar a corrente sanguínea e redistribuir em outros locais do corpo, como diferentes órgãos e tecidos secundários, causando efeitos sistêmicos à saúde (ADAMS *et al.*, 2019; GWINN; VALLYATHAN, 2006). Um estudo de Oberdörster e colaboradores (2004) demonstrou que elas são eficientemente depositadas nas regiões nasal, traqueobrônquica e alveolar devido à difusão. Além disso, a partir da exposição de ratos a nanopartículas de ouro, foi demonstrado que pode haver distribuição de nanopartículas para órgãos extrapulmonares, como rins, fígado e cérebro. Quanto menor o tamanho das partículas, mais fácil ela teve acesso a corrente sanguínea e maior quantidade pôde ser encontrada no sangue e na urina desses animais. De toda forma, uma grande parte fica retida nos pulmões, onde pode causar respostas inflamatórias (SEMMLER-BEHNKE *et al.*, 2008). A exposição a essas partículas também está associada a doenças cardiovasculares, inflamação sistêmica prolongada, ativação de leucócitos no sangue e danos ao endotélio vascular (ADAMS *et al.*, 2019).

Estudos de toxicidade pulmonar em animais demonstram que as exposições pulmonares a partículas ultrafinas ou nanopartículas produzem respostas inflamatórias mais graves em comparação com partículas maiores de mesma composição e com concentrações de massa equivalentes (MONTEILLER *et al.*, 2007; WARHEIT, 2004). Foi reportado estresse oxidativo como reposta a presença de partículas ultrafinas nas células e que a área superficial das partículas é um fator chave para seu potencial de inflamação (MONTEILLER *et al.*, 2007).

Algumas evidências sugerem que as ultrafinas ou nanopartículas inaladas, após deposição no pulmão, escapam amplamente da vigilância de macrófagos alveolares e ganham acesso ao interstício pulmonar, um compartimento anatômico potencialmente vulnerável. Os resultados do banco limitado de dados toxicológicos promoveram a percepção de que todas as nanopartículas são tóxicas (WARHEIT, 2004). Testes envolvendo a exposição de partículas de exaustão de diesel e Cabosil mostraram alterações na viscosidade plasmática dos pulmões, um marcador de doenças cardiovasculares, obtendo alta correlação com o grau de alterações inflamatórias (EVANS *et al.*, 2006). Também foi evidenciado a translocação de partículas ultrafinas para o Sistema Nervoso Central sendo o mecanismo mais provável o de depósitos na mucosa olfativa da região nasofaríngea do trato respiratório e subsequente translocação através do nervo olfativo (OBERDÖRSTER *et al.*, 2004).

Estudos envolvendo o uso de nanopartículas em roedores reportaram que pode ocorrer alterações da morfologia neuronal e morte neuronal, bem como neuroinflamação e neurodegeneração (CUPAIOLI *et al.*, 2014). O estresse oxidativo e radicais livres podem danificar lipídios, ácidos nucléicos e proteínas no local de deposição, principalmente em locais de alta demanda energética e alto conteúdo celular, como o cérebro (VERONESI *et al.*, 2005). Estudos envolvendo a exposição de nanopartículas de magnetita associaram a toxicidade com a produção de espécies reativas de oxigênio, parâmetro que está ligado a doenças neurodegenerativas, como a doença de Alzheimer (MAHER *et al.*, 2016). As nanopartículas também podem ser um fator de risco para outras doenças como a doença de Parkinson, a doença de Huntington e tumores cerebrais primários (WIN-SHWE; FUJIMAKI, 2011).

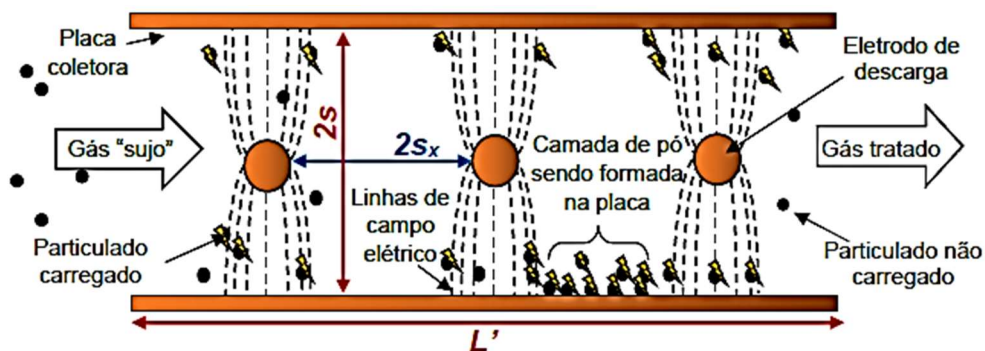
De toda forma, é importante levar em consideração que ainda é necessário pesquisas para afirmar de forma conclusiva os efeitos que as nanopartículas e partículas ultrafinas podem causar à saúde humana. Entretanto, com os dados disponíveis, pode-se inferir que as nanopartículas são um problema que merecem atenção e formas de mitigação para garantir a nanosseguurança robusta e validas para os processos e pessoas. Com isso, pesquisas envolvendo o desenvolvimento de equipamentos para remoção de partículas em escala nanométrica são importantes para garantir o desenvolvimento sustentável e diminuir o impacto negativo à saúde das pessoas.

2.3. Precipitador Eletrostático

A precipitação eletrostática é um processo amplamente utilizado na remoção de material particulado de fluxos de gás, mesmo para tamanho de partículas muito pequenos. Baseado em forças elétricas, os gases podem ser limpos utilizando altas taxas volumétricas simultaneamente com baixas quedas de pressão. Esse dispositivo tem sido utilizado industrialmente há quase um século para a coleta de materiais particulados e apresenta bom tempo de vida útil, em torno de 20 anos (PARKER, 2003; RIEHLE, 1997a).

Dentre os equipamentos que podem ser aplicados na coleta de material particulado, como filtros de mangas, ciclones e lavadores de gases, os precipitadores eletrostáticos se destacam pela versatilidade, elevadas eficiências em uma ampla faixa de tamanho de partículas, possibilidade de serem operados em altas temperaturas, baixos requisitos de manutenção e, caso operados a seco, permite a recuperação direta dos materiais (PARKER, 2003). A Figura 2 mostra um esquema de precipitação eletrostática.

Figura 2. Representação do processo de precipitação eletrostática.



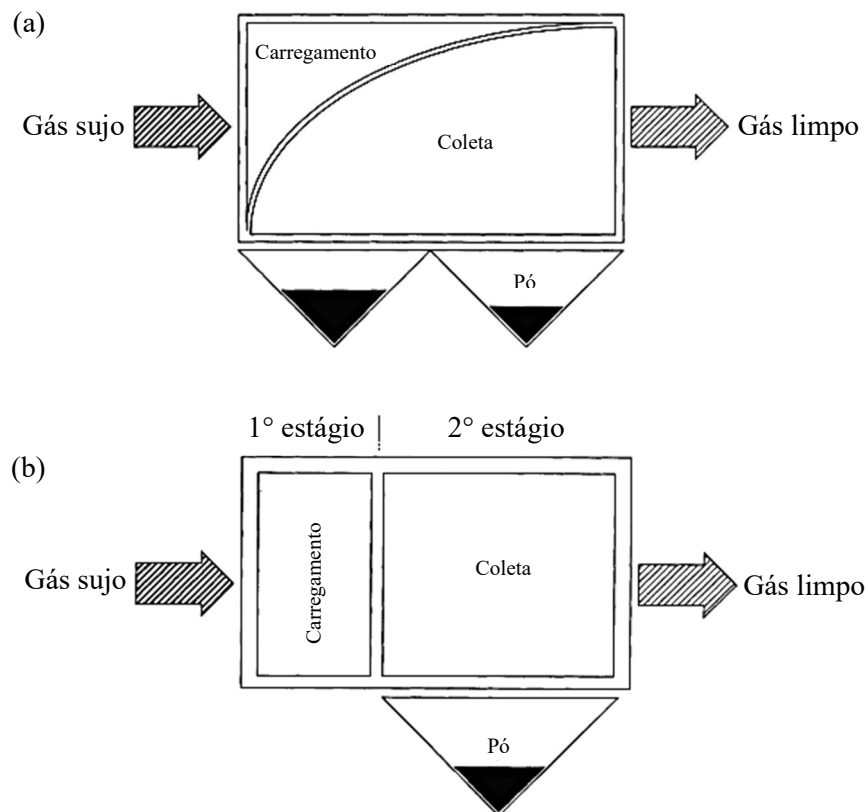
Fonte: Oliveira (2019).

Esse tipo de equipamento pode ser classificado em dois grupos segundo o tipo de operação: a seco ou a úmido. Nos precipitadores operados a seco a coleta de partículas ocorre a seco, sem a presença de outros agentes líquidos. Já na operação a úmido a coleta é realizada a úmido, geralmente a remoção de partículas das placas coletoras ocorre por lavagem com água e um filme de líquido escorrega na parede e direciona os particulados para os reservatórios de coleta (NEUNDORFER, 2020; RIEHLE, 1997b). O processo a seco é mais utilizado por não gerar

uma lama que necessitará de tratamento e descarte, aumentando os custos do processo (OLIVEIRA, 2019). Já a forma úmida é usada em várias aplicações, onde os gases precisam ser resfriados, para condensar material adicional ou para auxiliar na precipitação de partículas (PARKER, 2003).

Além dessa divisão, também podem ser separados pelo número de estágios, conforme Figura 3. Nos precipitadores de simples estágio o carregamento e coleta das partículas ocorrem em uma única etapa, enquanto os precipitadores de duplo estágio possuem duas etapas, na primeira ocorre o carregamento e na segunda a coleta das partículas (HINDS, 1999; RIEHLE, 1997b). Industrialmente, o precipitador de estágio simples é mais utilizado e apresenta a vantagem de minimizar a ressuspensão de partículas, enquanto o de duplo estágio é utilizado em aplicações de pequena escala, apresentando maior tempo de carregamento das partículas e menor tendência ao fenômeno de corona reversa (FALAGUASTA, 2005; MIZUNO, 2000; RIEHLE, 1997b).

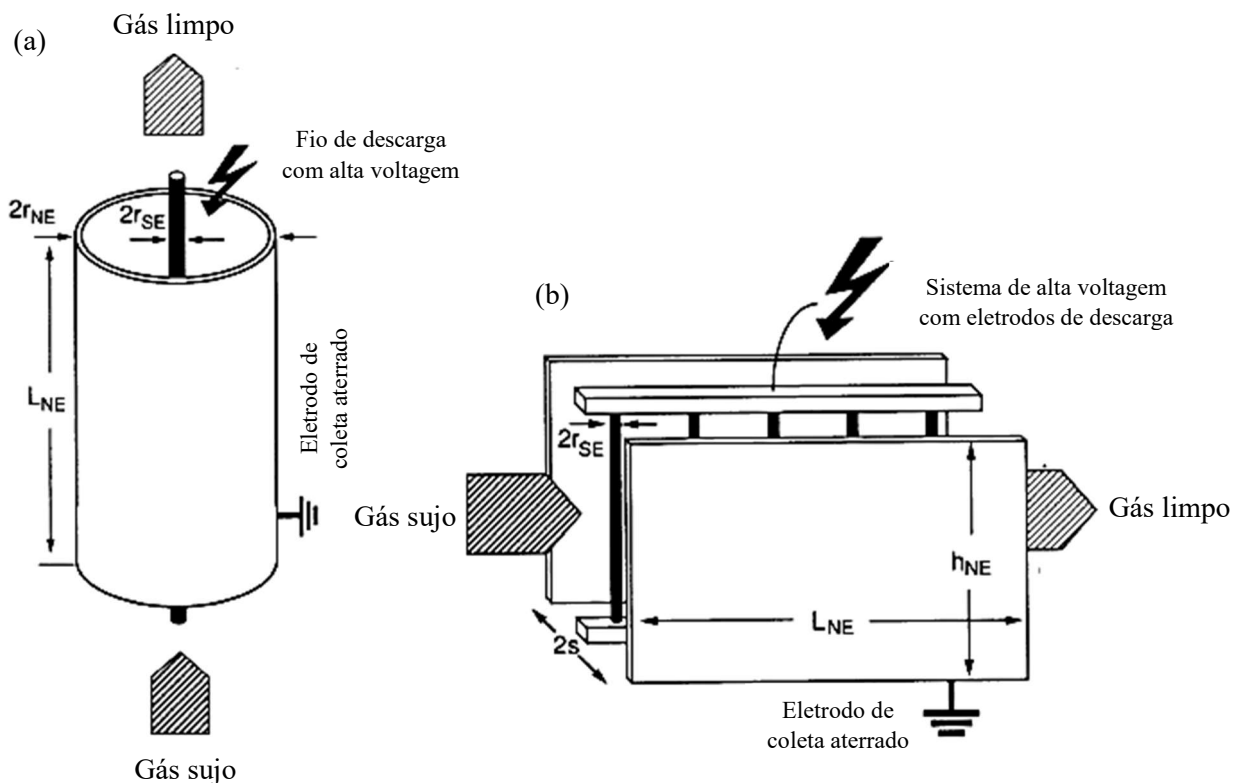
Figura 3. Representação de um precipitador eletrostático: (a) simples estágio; (b) duplo estágio.



Fonte: Riehle (1997b) – Adaptado

Entre os precipitadores de simples estágio, eles podem apresentar duas configurações, de acordo com o formato do eletrodo de coleta: tubo-fio e placa-fio. Nos precipitadores eletrostáticos do tipo tubo-fio (Figura 4-a), o eletrodo de descarga e o tubo são orientados ao longo do eixo gravitacional. Em geral, a limpeza é realizada com um filme líquido nas paredes do tubo. Em precipitadores eletrostáticos do tipo placa-fio (Figura 4-b), os eletrodos de descarga, orientados ao longo do eixo gravitacional, são posicionados entre as placas coletoras, que são dispostas paralelamente entre si, formando dutos. A remoção da camada de pó é realizada de forma mecânica e a ação gravitacional as direciona para os reservatórios de coleta na parte inferior do equipamento (MEIRA, 2009; OLIVEIRA, 2019).

Figura 4. Representação de um precipitador eletrostático: (a) tubo-fio; (b) placa-fio.



Fonte: Riehle (1997b) – Adaptado.

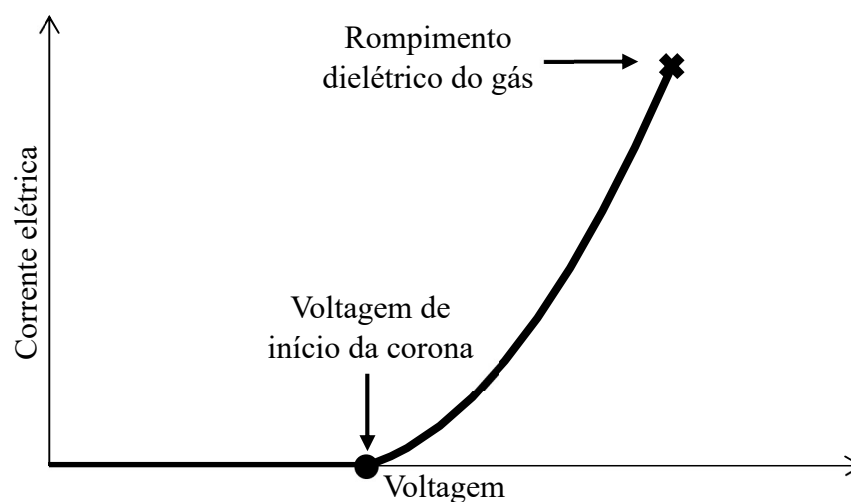
2.3.1. Ionização do gás

O princípio básico de operação de um precipitador eletrostático é a remoção de partículas do ar a partir da passagem do aerossol por uma região previamente ionizada. Os íons

irão transferir carga para as partículas, que migram para as placas coletoras, são depositadas e removidas do gás (ANDRADE, 2020). Embora existam vários métodos de carregamento de partículas, como efeitos triboelétricos, ultravioleta e radiação, para aplicações em precipitadores industriais, a descarga corona é universalmente usado como sendo a abordagem mais eficiente e econômica (RIEHLE, 1997b).

Para produzir uma grande quantidade de íons em fase gasosa, é necessário aplicar uma alta tensão nos eletrodos de descarga para que se supere o valor do campo elétrico crítico. Quando se excede esse valor, uma corrente elétrica pode ser medida entre os eletrodos de descarga e coleta, indicando o início da descarga corona, conforme evidenciado na curva corrente-tensão dada pela Figura 5. Um aumento adicional da voltagem aplicada levará a um aumento progressivo da corrente elétrica detectável até um limite quando há a formação do arco elétrico, indicando a ruptura dielétrica do gás (RIEHLE, 1997b).

Figura 5. Representação de uma curva corrente-tensão.



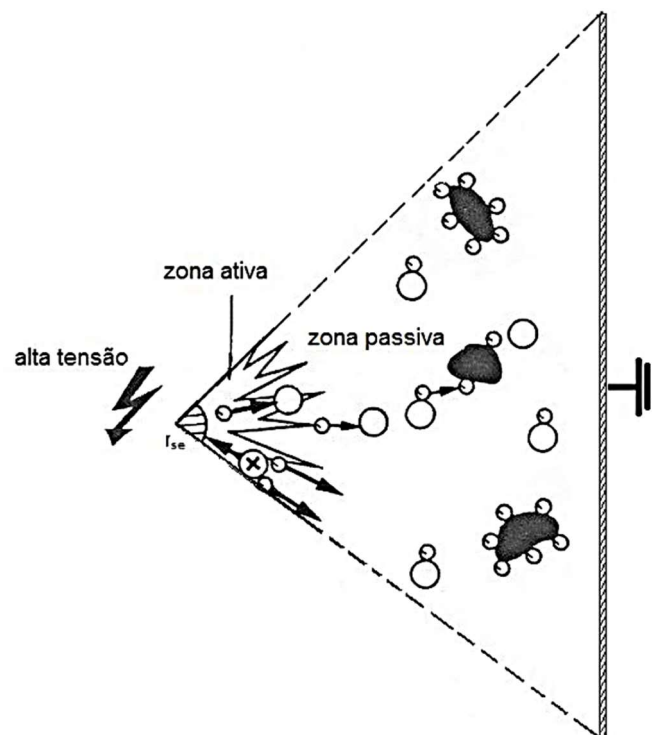
Fonte: Autor.

Normalmente o gás contém uma grande quantidade de moléculas neutras por cm^3 . A ionização natural do gás é geralmente muito baixa devido à recombinação de elétron e íon imediatamente posterior à ionização. Se um campo elétrico estiver presente durante a ionização, o elétron será acelerado e separado rapidamente do íon positivo restante. Essa ionização é produzida pelos elétrons livres devido a sua grande mobilidade elétrica. Se a energia cinética desses elétrons for suficiente ele será capaz de, ao colidir com outra molécula de gás neutro,

formar íons positivos e elétrons adicionais, produzindo uma avalanche de elétrons. Essa região, onde ocorrem os processos de ionização é chamada de zona ativa, mostrada na Figura 6. Ela está presente geralmente próximo dos eletrodos de descarga e produz um efeito de luminescência, com um brilho azul fraco além de um ruído crepitante (PARKER, 2003; RIEHLE, 1997b).

Os elétrons se movem para a região de máximo campo elétrico, para longe do fio. Quando eles entram na região de menor intensidade do campo elétrico, a zona passiva, eles não são capazes de ionizar outras moléculas, mas se ligam a uma molécula de gás eletronegativa, formando assim íons gasosos negativos. Nessa zona, as partículas são carregadas pelos íons de gás e migram em direção às placas coletoras sob a influência da força elétrica (RIEHLE, 1997b).

Figura 6. Princípio do efeito corona e desenvolvimento da avalanche de elétrons.



Fonte: Meira (2009).

Podem ser empregados a polarização positiva ou negativa para gerar a descarga corona. Na corona negativa, os elétrons migram em direção ao eletrodo de coleta (placas) e os íons

positivos em direção ao eletrodo de descarga (fio). Na corona positiva, os elétrons são atraídos para os fios, enquanto os íons positivos migram para o eletrodo de coleta. A corona negativa requer maiores campos elétricos para que ocorra o rompimento dielétrico do ar. Dessa forma, esse tipo de polarização é mais utilizado industrialmente, permitindo trabalhar com maiores voltagens, correntes e ser mais estável. Além disso, a descarga negativa requer gases com componentes eletronegativos, sendo bastante comuns na atividade industrial. Entretanto, esse tipo de polarização produz grande quantidade de ozônio, fazendo a polarização positiva ser mais utilizada nos sistemas de ventilação de ar indoor (WHITE, 1963).

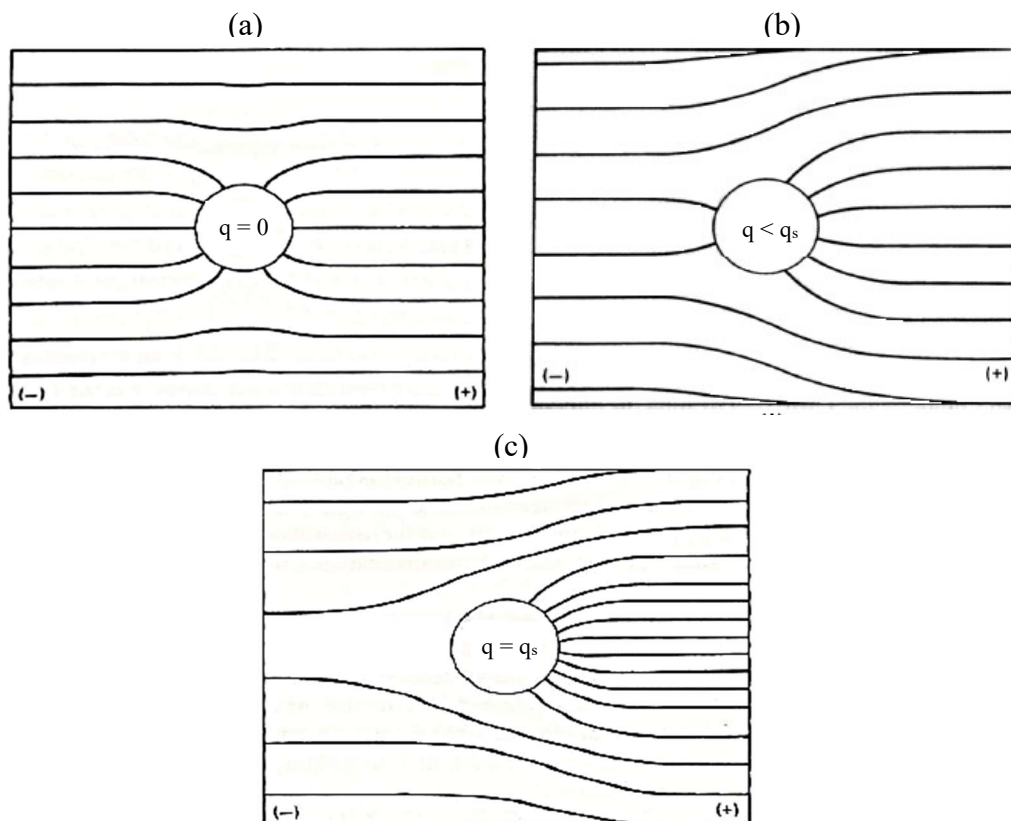
2.3.2. Carregamento das partículas

Quando a polarização negativa da corona é utilizada o carregamento de partículas ocorre na área entre a região ativa e a superfície passiva do eletrodo. Nessa área, uma grande quantidade de íons neutros, íons negativos e alguns elétrons livres se movem em direção ao eletrodo passivo como resultado do campo elétrico. A remoção das partículas depende da Lei de Coulomb, sendo proporcional a intensidade do campo elétrico aplicado e à magnitude de carga adquirida pelas partículas (FALAGUASTA, 2005; RIEHLE, 1997b). Dois mecanismos de carregamento podem ocorrer e eles dependem da faixa de tamanho das partículas: o carregamento por campo, em partículas em torno de 1 μm , e por difusão, em partículas menores que 0,1 μm (RIEHLE, 1997a).

No carregamento por campo, os íons formados na descarga corona se deslocam de maneira ordenada ao longo das linhas de campo elétrico formadas entre os eletrodos de descarga e eletrodos de coleta. As partículas descarregadas que entram na região que o campo elétrico está presente, o distorcem e causam uma concentração dessas linhas de campo ao seu redor (Figura 7-a). O grau de distorção depende da constante dielétrica do material e da carga da partícula. Os íons negativos que se deslocam nessas linhas de campo colidem com o material particulado, transferindo-lhes carga (Figura 7-b). Esse carregamento ocorre até que eventualmente a partícula atinja sua carga de saturação (Figura 7-c), onde sua carga é suficiente para gerar um campo de repulsão, impedindo a colisão de outros íons (HINDS, 1999; WHITE, 1963).

O carregamento por difusão é baseado no movimento aleatório dos íons do gás que surgem por efeito de temperatura, seguindo a teoria cinética dos gases, ou seja, a partir do movimento browniano, que se intensifica com a diminuição do tamanho da partícula (ALONSO; ALGUACIL, 2002; PARKER, 2003). Esse transporte difusivo depende do gradiente de densidade na superfície da partícula e independe do campo elétrico externo. Esse processo predominante em partículas submicrométricas também apresenta colisões dos íons negativos com as partículas no aerossol, mas, diferentemente do carregamento por difusão, essas colisões ocorrem pelo movimento térmico dos íons. Com isso, também há a formação de um campo elétrico de repulsão ao redor da partícula à medida que ela adquire carga (Figura 7), reduzindo a taxa de carregamento (DUNKLE, 1997; HINDS, 1999; RIEHLE, 1997b). Esse mecanismo complexo depende de fatores como a distância entre a partícula e o eletrodo, possíveis interações adicionais entre partícula-partícula e outras perturbações que também acarretam colisões randômicas entre esses elementos (KRINKE *et al.*, 2002).

Figura 7. Representação das linhas de campo elétrico para uma partícula condutora em um campo elétrico uniforme: (a) partícula não-carregada; (b) partícula parcialmente carregada; (c) partícula com carga de saturação.



Fonte: Hinds (1999) – Adaptado.

A carga adquirida pela partícula pode ser calculada pela equação de Cochet (Equação 3). Essa equação analítica é uma alternativa razoável para descrever o processo de carregamento contínuo, desde partículas pequenas até grandes, permitindo o cálculo da carga de saturação da partícula (PARKER, 1997).

$$Q_p^\infty = \pi \epsilon_0 d_p^2 |E| \cdot \left\{ (1 + Kn)^2 + \left(\frac{2}{1 + Kn} \right) \cdot \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \right\} \quad (3)$$

Nessa equação, Q_p^∞ é a carga de saturação, ϵ_0 é permissividade elétrica no vácuo ($8,86 \times 10^{-12}$ As/Vm), ϵ_r é a permissividade relativa do material que constitui a partícula, d_p é o diâmetro da partícula (m), $|E|$ é o módulo do campo elétrico aplicado (V/m) e Kn é o número de Knudsen.

2.3.3. Velocidade de migração das partículas

Após o carregamento, as partículas tendem a seguir as linhas de campo e migrar para o eletrodo de coleta. A velocidade que acontece essa migração depende do balanço de forças atuantes na partícula, como forças gravitacionais (Equação 4), elétricas (Equação 5) e de arrasto (Equação 6) (RIEHLE, 1997a).

$$\vec{F}_T = -m\vec{a} \quad (4)$$

$$\vec{F}_{el} = Q_p \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{F}_w = 3\pi\mu d_p |\vec{v} - \vec{w}| \left(\frac{1}{C} \right) \quad (6)$$

Nessas equações, C é o fator de correção de Cunningham que é uma função da densidade relativa do gás e do caminho livre médio (λ) (RIEHLE, 1997a). A Equação 7 representa o fator de correção de Cunningham.

$$C = 1 + 1,246 \frac{2\lambda}{d_p} + 0,42 \frac{2\lambda}{d_p} \exp \left(-0,87 \frac{d_p}{2\lambda} \right) \quad (7)$$

Realizando o balanço de forças e considerando o estado estacionário, pode-se integrar a equação resultante e obter a velocidade de migração teórica (w) de uma partícula individual carregada individual em um campo elétrico. Além disso, como a partícula se move na direção

perpendicular ao escoamento do gás, tem-se que $\vec{v} = 0$. A Equação 8 explicita a velocidade de migração teórica.

$$w = \frac{Q_p^\infty |E|}{3\pi\mu d_p} \cdot C \quad (8)$$

Nessa equação, Q_p^∞ é a carga de saturação (As), $|E|$ é o módulo do campo elétrico aplicado (V/m), μ é a viscosidade do gás (kg/ms) e d_p o diâmetro da partícula (m).

2.3.4. Eficiência de coleta

A eficiência de coleta de um precipitador eletrostático pode ser calculada experimentalmente relacionando as concentrações de entrada e saída de acordo com a Equação 9.

$$\eta = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

Nessa equação, C_i é a concentração de partículas na entrada, C_f é a concentração de partículas na saída e η é a eficiência de coleta em porcentagem.

Alguns modelos podem ser empregados para determinar a eficiência de coleta e validar os dados experimentais. Um dos primeiros modelos criados foi o modelo de Deutsch que, apesar de apresentar diversas simplificações, apresenta uma aproximação satisfatória (ANDRADE, 2020). A eficiência de coleta por esse modelo é dada pela Equação 10.

$$\eta_D = 1 - \exp\left(-w \cdot \frac{l}{us}\right) = 1 - \exp\left(-w \cdot \frac{A'}{Q}\right) \quad (10)$$

Nessa equação, η_D é a eficiência de coleta pelo modelo de Deutsch, w é a velocidade de migração das partículas (m/s), d_p é o diâmetro da partícula (m), l é o comprimento do eletrodo de coleta (m), s é a distância entre os eletrodos de coleta e descarga (m), u é a velocidade do gás (m/s), A' é a área de dois eletrodos de coleta adjacentes (m²) e Q é a taxa de fluxo volumétrico do gás (m³/s).

No modelo de Deutsch assume mistura perfeita do particulado no gás, com as partículas homogeneamente distribuídas na corrente gasosa devido a turbulência do escoamento, fluxo de

massa uniforme, velocidade do gás constante, distribuição uniforme do campo e migração uniforme das partículas (VINCENT, 1980; WHITE, 1963).

A partir do modelo de Deutsch pode-se definir um parâmetro adimensional denominado número de Deutsch (OLIVEIRA, 2019), conforme a Equação 11.

$$De = w \cdot \frac{l}{us} \quad (11)$$

Embora esse modelo seja amplamente utilizado, a equação de Deutsch-Anderson foi baseada em muitas suposições, incluindo a distribuição constante e uniforme de campo elétrico e ausência de reentrada de partículas. O transporte de partículas no interior do precipitador é mais complexo e essa equação geralmente subestima a eficiência da coleta porque as condições reais de operação são diferentes das suposições ideais (LIN; CHEN; TSAI, 2012). Para prever com precisão a eficiência da coleta de partículas, há modificações do modelo de Deutsch-Anderson como o de Cooperman (1971), Leonard, Mitchner e Self (1980), Zhibin e Guoquan (1992), Zhibin e Guoquan (1994), Kim, Park e Lee (2001), Ortiz, Navarrete e Cañadas (2010) e Lin, Chen e Tsai (2012).

Zhibin e Guoquan (1992) introduziu a influência da turbulência considerando o perfil de velocidade não uniforme e coeficiente de mistura infinita. Esse modelo desconsidera a reentrada de partículas e assumindo um aerossol monodisperso com carregamento prévio. O modelo é representado pela Equação 12.

$$\eta_{zG} = 1 - \frac{\sqrt{Pe}}{2s\sqrt{\pi De}} \int_0^s \exp\left[-\frac{Pe}{4De} \left(\frac{y}{s} - De\right)^2\right] dy \quad (12)$$

Nessa equação, o parâmetro Pe é chamado número de Péclet e definido pela Equação 13.

$$Pe = \frac{w \cdot s}{D} \quad (13)$$

Onde, D é a difusividade da partícula (m²/s).

Nóbrega, Falaguasta e Coury (2004) realizaram uma modificação no modelo de Zhibin e Guoquan utilizando a hipótese que há um aumento na concentração de partículas à medida que se aproxima dos eletrodos de coleta. A expressão é dada pela Equação 14.

$$\eta_N = 1 - \frac{\sqrt{Pe/\pi}}{De^{1,5}} \int_0^1 \left\{ \xi \cdot \exp\left[-\frac{Pe}{4De} (\xi - De)^2\right] \right\} d\xi \quad (14)$$

Nessa equação, ξ é a razão entre o comprimento perpendicular ao escoamento de gás y e o espaçamento entre placa e fio s . Os autores consideram para a difusividade da partícula a expressão dada pela Equação 15.

$$D = \frac{2 \times 10^{-7}}{d_p} \quad (15)$$

Onde, d_p é o diâmetro da partícula (m).

2.3.5. Fatores que influenciam a precipitação eletrostática

O desempenho de um precipitador eletrostático sofre influência dos seguintes parâmetros: operacionais, como vazão de gás e concentração de partículas; mecânicos, como a distância entre fios, diâmetro dos fios, distância entre placas; e elétricos, como a campo elétrico aplicado e polaridade da corona (CHEN *et al.*, 2014; KHALED; ELDEIN, 2013; LU *et al.*, 2016).

O campo elétrico é um parâmetro muito importante que influencia o processo de precipitação eletrostática. A distribuição do campo elétrico rege a distribuição das linhas de corrente entre os eletrodos de descarga e coleta, a ionização do gás, o carregamento das partículas e sua migração. Esse parâmetro é uma função local e sua distribuição depende da geometria e estado operacional do precipitador. Pela dificuldade de caracterizar o campo elétrico real, uma aproximação satisfatória é considera-lo pseudo-homogêneo, ou seja, constante em todo precipitador, conforme descrito pela Equação 16 (FALAGUASTA, 2005; RIEHLE, 1997b).

$$E = \frac{V}{s} \quad (16)$$

Nessa equação, E é o campo elétrico, V é a voltagem aplicada e s é metade da distância entre as placas coletoras.

A Lei de Townsend descreve como a corrente se comporta em diferentes voltagens aplicadas, descrevendo a curva corrente-tensão, como mostrado na Equação 17 (COOPERMAN, 1960; SAID *et al.*, 2014).

$$I = \frac{4\pi\epsilon_0 Z_i l_d}{s^2 \log(d/r_0)} V(V - V_0) \quad (17)$$

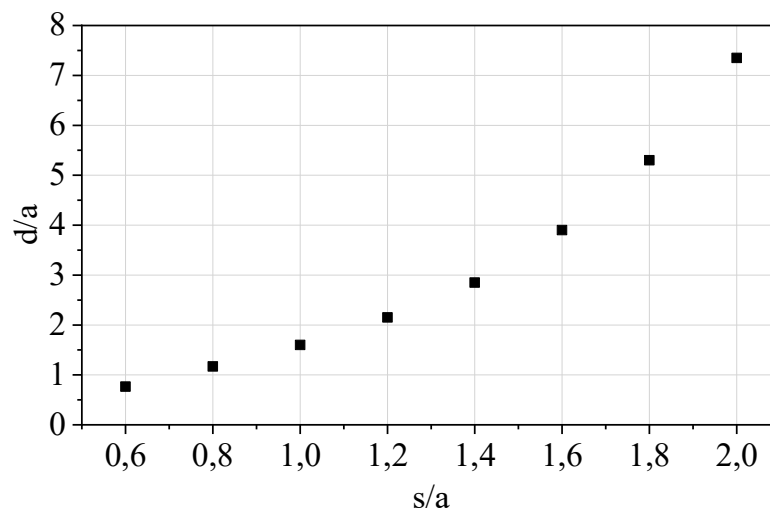
Onde, I é a corrente da descarga corona (A), V é voltagem aplicada (V), V_0 é a voltagem de início da corona (V), ϵ_0 é a permissividade elétrica (As/Vm), Z_i é a mobilidade elétrica dos íons ($\text{m}^2\text{V/s}$), l_d é o comprimento do fio de descarga (m), s é a distância entre a placa coletora e o fio de descarga (m), r_0 é o raio do eletrodo de descarga (m) e d é uma constante calculada através das Equações 18 e 19, sendo a o espaçamento entre os fios (m).

$$\frac{s}{a} \leq 0,6 \rightarrow d = \frac{4s}{\pi} \quad (18)$$

$$\frac{s}{a} \geq 2,0 \rightarrow d = \frac{a}{\pi} e^{\pi s/2a} \quad (19)$$

Os valores de d/a para o intervalo entre 0,6 e 2,0 podem ser obtidos pelo uso de um gráfico como dado por Cooperman (1960). A Figura 8 apresenta uma adaptação da curva dada por esse autor.

Figura 8. Valores calculados da constante d/a para valores de s/a entre 0,6 e 2,0.



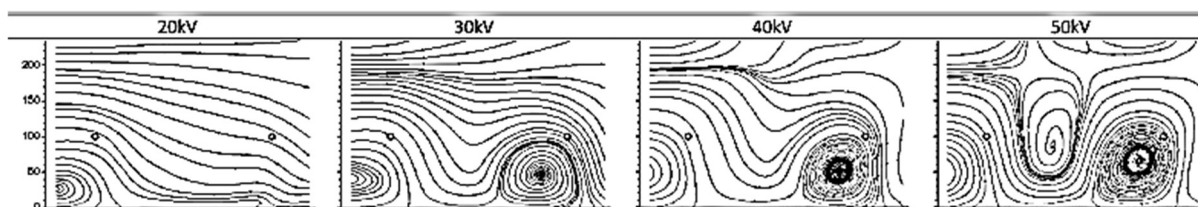
Fonte: Cooperman (1960) - Adaptado.

A velocidade do gás e conseqüentemente o tempo de residência também tem influência no desempenho de um precipitador eletrostático. Estudos com micropartículas demonstram que velocidades muito altas e em particulados com propriedades coesivas ruins, a limpeza das partículas dos eletrodos pode ser afetada e ocorrer a reentrada de partículas, prejudicando a

eficiência de coleta. Já em velocidades muito baixas a eficiência tende a aumentar ao máximo à medida que diminui a velocidade. Mas, em alguns casos, pode ocorrer maior taxa de precipitação próximo à entrada e afetar a distribuição do campo elétrico mais a jusante, bem como, para um precipitador projetado para taxas de fluxo mais altas, ocorrer um novo arrastamento devido à redistribuição das massas de particulado (PARKER, 2003).

O padrão de fluxo pode ser afetado pelo efeito do campo elétrico. As configurações e arranjos dos precipitadores afetam suas características elétricas e eletro-fluidodinâmica. Com a descarga corona, a interação da corrente do fluido (fluxo primário) com o campo elétrico pode levar a um escoamento turbulento (Figura 9). A velocidade do gás dentro de uma área turbulenta é normalmente mais alta do que em uma área não turbulenta, dificultando a coleta de partículas. Em geral, a intensidade da turbulência aumenta com o aumento da voltagem aplicada. Esse fenômeno é chamado de fluxo secundário, também conhecido como vento iônico ou vento elétrico e é objeto de estudos de numerosos estudos experimentais e numéricos (NING *et al.*, 2016; SHEN *et al.*, 2018).

Figura 9. Eletro-fluidodinâmica de um precipitador placa-fio para diferentes voltagens.



Fonte: Ning e colaboradores (2016).

Como pode ser observado pela Figura 9, o aumento da voltagem alterou o significativamente o padrão do fluxo, tornando o escoamento mais turbulento e com presença de vórtices. Em um escoamento turbulento, a velocidade é maior que em um escoamento laminar. O fluxo secundário cria uma área de alta velocidade no centro, no qual o gás passa junto com partículas não coletadas. Certamente, isso poderia reduzir significativamente a eficiência, principalmente reduzindo o tempo de residência geral e a distribuição não homogênea da força de Coulomb. Soldati e Banerjee (1998) evidenciaram que a intensidade da turbulência é reduzida no centro do canal, mas aumenta na região da parede. Chun e

colaboradores (2007) indicaram que o vento iônico apresenta maior efeito na eficiência de coleta de partículas submicrométricas, especialmente na faixa entre 0,1 e 1 μm .

Para relacionar o fluxo primário e secundário pode-se utilizar a razão entre número eletro-hidrodinâmico (N_{EHD}) e o número de Reynolds ao quadrado (Re^2), obtidos pela Equação 20 e 21, respectivamente. Dessa forma, é possível determinar qual o fenômeno preponderante na precipitação eletrostática e a influência da força elétrica sobre as forças inerciais e viscosas do gás (IEEE-DEIS-EHD TECHNICAL COMMITTEE, 2003). Para precipitadores eletrostáticos do tipo placa-fio, valores do número eletro-hidrodinâmico muito maiores que 1 indicam uma forte influência do fluxo secundário ou vento iônico (PODLIŃSKI *et al.*, 2006).

$$N_{EHD} = \frac{I \cdot L^3}{\mu^2 \cdot \rho_f \cdot Z_i \cdot A} \quad (20)$$

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu} \quad (21)$$

Nessas equações, I é a corrente elétrica (μA), L é o comprimento característico (nesse caso, a distância entre os eletrodos de coleta), ρ_f é a densidade do gás, Z_i é a mobilidade elétrica dos íons (comumente para íons gasosos nas condições normais é $2,10 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$), ν é a viscosidade cinemática, A é a área superficial das placas coletoras e u é a velocidade do gás.

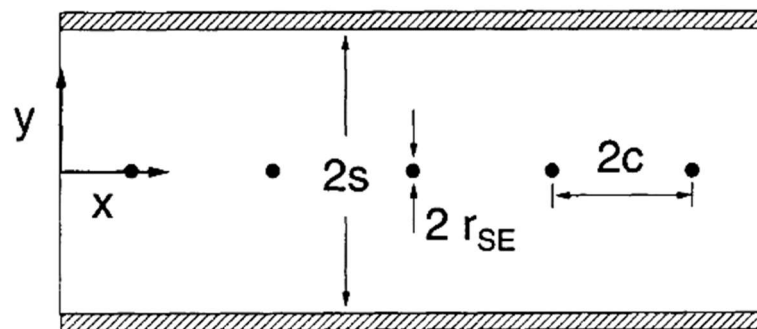
O desempenho dos precipitadores é sensível a resistividade do material das partículas. Com resistividades baixas ocorre um descarregamento rápido do particulado e a partícula é reintroduzida no gás, diminuindo a corrente corona devido a menor emissão de íons. Já resistividades altas o descarregamento do particulado na placa coletora é muito lento ou não ocorre, desenvolvendo um fenômeno chamado corona reversa, que reduz a ionização e migração das partículas no gás, além de dificultar a remoção do particulado depositado nos eletrodos de coleta (COOPER; ALLEY, 2002; ZHUANG *et al.*, 2000).

A geometria do precipitador, bem como as diferentes geometrias e espaçamentos dos eletrodos de descarga e coleta, também influencia no campo elétrico gerado no interior do precipitador eletrostático e, conseqüentemente, na eficiência de coleta (MOROSKO, 2007). A Figura 10 explicita as principais dimensões e elementos de um precipitador do tipo placa-fio.

Para um precipitador do tipo placa-fio, os eletrodos de coleta são geralmente constituídos de aço carbono, aço inox ou ligas metálicas resistentes à corrosão. Geralmente, sua espessura varia entre 0,05 e 0,2 cm, com alturas entre 6 e 12 m e espaçamentos entre placas

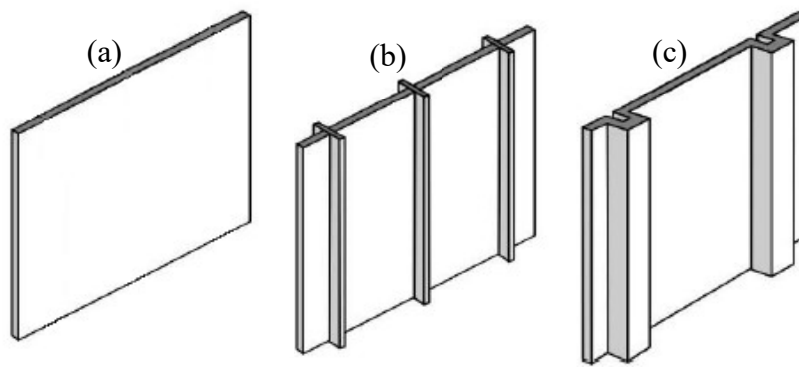
entre 15 e 30 cm. Eles podem ser encontrados com diferentes configurações geométricas, como uma placa lisa ou com chicanas (NEUNDORFER, 2020). A Figura 11 explicita diferentes geometrias dos eletrodos de coleta.

Figura 10. Principais dimensões e elementos de um precipitador do tipo placa-fio onde: $2s$ é o espaçamento entre as placas, $2r_{SE}$ é o diâmetro dos fios e $2c$ é o espaçamento entre fios.



Fonte: Riehle, (1997b).

Figura 11. Representação de diferentes configurações do eletrodo de coleta (placas) onde: (a) tipo lisa; (b) tipo cerca; (c) tipo U.



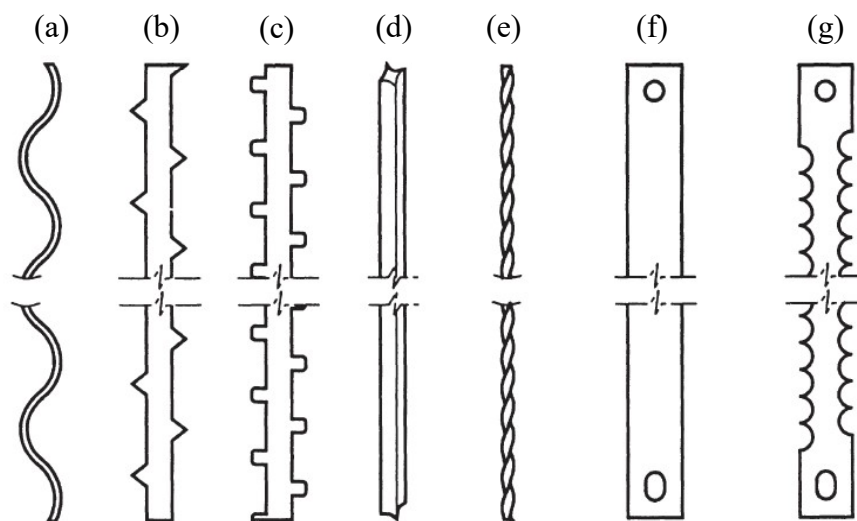
Fonte: Neundorfer (2020) – Adaptado.

O espaçamento entre os eletrodos de coleta também pode afetar o desempenho do precipitador. O campo elétrico atua no espaço intereletrodo, ou seja, entre os eletrodos de descarga e coleta. Se esse espaço for muito grande, a intensidade do campo elétrico é menor e uma maior voltagem deve ser aplicada para produzir o mesmo campo elétrico, gerando um maior gasto energético. Por causa disso, maiores espaços são utilizados para diminuir fagulhas

em precipitadores a úmido. Além disso, também ocorre o aumento da voltagem de início da corona (EL DEIN; USAMA, 2014; WHITE, 1963). Espaços pequenos, a intensidade do campo elétrico é maior dada uma mesma voltagem, aumentando o fenômeno de vento iônico e turbulências dentro do duto, podendo reduzir o desempenho de coleta.

Os eletrodos de descarga podem ser constituídos por aço-carbono, aço inox, cobre, liga de titânio ou alumínio. Geralmente possuem diâmetros entre 0,13 e 0,38 cm e extremidades recobertas por um revestimento para reduzir a erosão pela formação de fagulhas. Eles também podem ser encontrados em diferentes geometrias (Figura 12), desde um simples fio redondo, quadrado ou arame farpado, até os chamados eletrodos de emissão controlada para tarefas específicas (KNUTTSEN; PARKER, 1997; NEUNDORFER, 2020). A presença de elementos pontiagudos, chamados emissores, auxiliam na formação da descarga corona (ANDRADE, 2020).

Figura 12. Representação de diferentes configurações do eletrodo de descarga (fios) onde: (a) haste em espiral; (b) haste com serras; (b) haste com dentes quadrados; (c) haste em forma de estrela; (e) haste com elementos quadrados torcidos; (f) faixa lisa; (g) tira serrilhada.



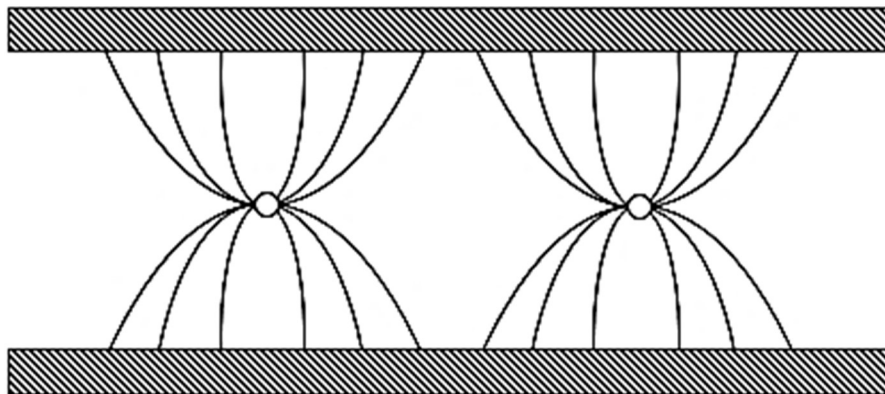
Fonte: Knuttsen e Parker (1997).

Para produzir a intensidade de campo necessária na superfície do eletrodo, é essencial que o raio de curvatura do elemento seja pequeno em comparação com o do eletrodo de coleta.

De forma prática, para precipitadores do tipo-placa fio, esse problema não é significativo, pois as placas podem ser consideradas como tendo um raio infinito de curvatura (KNUTTSEN; PARKER, 1997).

Em qualquer projeto de precipitador, o espaçamento entre os eletrodos de descarga pode influenciar significativamente o campo elétrico e a quantidade de ionização produzida. Em teoria, o espaçamento ideal do eletrodo de descarga é aproximadamente igual à metade da largura do duto. Eletrodos muito próximos resultará na supressão da coroa entre elementos adjacentes, levando à redução da corrente corona, que se aproxima de um sistema não emissor se os eletrodos de coleta estiverem muito espaçados. Esse fenômeno, chamado de blindagem eletrostática, ocorre pelas linhas de campo entre eletrodos adjacentes ficarem em uma posição de interferência, levando a diminuição na intensidade do campo (PARKER, 2003; WHITE, 1963). Para exemplificar, as linhas de campo elétrico são dadas pela Figura 13. Ao aumentar o espaçamento entre os eletrodos de descarga, embora minimize a supressão da corona, há um ponto máximo de corrente. A partir desse ponto a corrente específica total diminui de forma que o desempenho do precipitador seja comprometido (PARKER, 2003).

Figura 13. Linhas de campo para um precipitador eletrostático do tipo placa-fio.



Fonte: Autor.

2.4. Estudos envolvendo o uso de precipitadores eletrostáticos na coleta de partículas

A presença de partículas no ar pode causar diversos problemas de saúde, principalmente partículas ultrafinas ou nanopartículas, como mencionado anteriormente. A utilização de

precipitadores eletrostáticos é bastante elucidada no que tange a remoção de partículas micrométricas. Entretanto, a aplicação na faixa nanométrica ainda requer pesquisas para otimizar a eficiência de coleta.

Diversos trabalhos sobre a utilização de precipitadores eletrostáticos são encontrados na literatura. Mertens e colaboradores (2020) avaliaram medições on-line de números residuais de nanopartículas a jusante dos sistemas de tratamento de gases de combustão de uma ampla variedade de instalações industriais de média e grande escala. As emissões eram de partículas menores que 10 μm , mas com um grande número de partículas entre 0,1 e 0,5 μm . Para as plantas que utilizaram precipitadores eletrostáticos, eficiências de remoção excederam 99%. Entretanto, a eficiência diminuiu para partículas menores que 1 μm e, em termos de número de partículas, as nanopartículas residuais são maiores por várias ordens de magnitude (diferenças de até 10^4 partículas/ cm^3).

Zukeran, Sawano e Yasumoto (2019) utilizaram um precipitador do tipo tubo-fio para investigar as características de coleta de nanopartículas emitidas de um motor diesel. A velocidade do gás foi de 2,4 m/s dentro do precipitador formado por um cilindro coaxial, com comprimento de 80 mm e diâmetro interno de 58 mm e um eletrodo de descarga de arame com diâmetro de 0,26 mm. Foi avaliado emissões de óleo combustível residual e óleo combustível leve de partículas menores que 500 nm. Eles evidenciaram um aumento de partículas em um tamanho de aproximadamente 20 nm nos gases de escape, do motor a diesel com óleo combustível residual. Isso não foi observado para os gases do motor de óleo combustível leve e esse aumento era maior quando se usava a polaridade negativa em relação ao uso da polaridade positiva. A eficiência aumentou ao se aumentar a tensão aplicada e a eficiência total de coleta nos gases de escape, usando o óleo combustível residual, foi de 91%.

Dobrowolski e colaboradores (2018) personalizaram um precipitador eletrostático de duplo estágio para recuperar partículas submicrométricas de medicamentos pouco solúveis em água geradas pelo processo de secagem com condicionamento. Foi utilizado um precipitador com 83 mm de diâmetro e eletrodo de descarga no primeiro estágio com 0,5 mm de diâmetro. A vazão utilizada foi de 120 L/min. A faixa de tamanho de partículas coletadas foi de 0,1–1 μm com eficiências de coleta superiores a 99%. A escolha do precipitador de duplo estágio pelos autores foi associada a diminuição da turbulência no estágio de coleta e para examinar as duas partes separadamente.

Oliveira e Guerra (2018) avaliaram separadamente as influências do tempo de residência e da concentração na coleta de nanopartículas por um precipitador eletrostático operado a seco. Foi utilizado um precipitador do tipo placa fio, com 8 eletrodos de descarga espaçados por 4 cm e com placas de altura de 10 cm e comprimento de 30 cm. Foi evidenciado que o aumento da velocidade do gás, a uma taxa fixa de alimentação de particulados, teve efeitos na eficiência da coleta, relacionados não apenas ao tempo de residência, mas também a alterações na concentração de aerossóis. Dessa forma, uma variação proporcional da taxa de fluxo de alimentação de partículas com a taxa de fluxo de gás, mantendo a concentração constante mesmo na avaliação de diferentes velocidades, é um método melhor para estudar fenômeno de precipitação eletrostática.

Além de concentração e tempo de residência, a umidade relativa do gás também afeta o desempenho de precipitadores eletrostáticos. Nouri e colaboradores (2016) avaliaram esse efeito na remoção de partículas de incenso com tamanhos entre 0,2 e 1 μm . Foi utilizado um precipitador do tipo placa fio, com 3 eletrodos de descarga, com diâmetro de 0,2 mm e espaçados por 4 cm. As duas placas possuíam altura de 10 cm e comprimento de 20 cm e espaçadas por 10 cm. As eficiências de coleta foram medidas para umidade relativa de 40 e 70% sob tensões aplicadas entre 10 e 40 kV. Foi observado que as diferenças na curva corrente-tensão com a umidade para polaridades positivas e negativa foi menor com umidades mais altas e que diferenças entre as curvas para umidades diferentes podem ser associadas a presença de água adsorvida na superfície das partículas. A eficiência de coleta aumenta com o aumento de umidade, provavelmente pelo aumento na condutividade das partículas na presença de água em sua superfície e especialmente ao aumento da coesividade das partículas nos eletrodos coletores e da carga das partículas no espaço entre os eletrodos.

Em geral, os estudos para remoção de particulado em escala nanométrica têm se concentrado na utilização de precipitadores a úmido e na aglomeração das partículas na corrente de entrada. Como o estudo desenvolvido por Liu e colaboradores (2016) que utilizaram soluções de aglomerantes (goma xantana 0,05% e pectina 0,05%) juntamente com um agente umidificante e um controlador de pH. Foi aspergido a solução com aglomerante na corrente gasosa contendo particulado de uma caldeira de queima de carvão com granulometria entre 0,023 e 9,314 μm . Para a goma xantana, foi observado um aumento de até 4 vezes o tamanho das partículas enquanto para a pectina houve uma redução de 47,4% na concentração mássica de saída de finos. Eles concluíram que a concentração de partículas finas muda levemente na saída ao pulverizar apenas águas residuais de dessulfuração, mas diminui consideravelmente

quando a água residual de dessulfuração contém aglomerantes, principalmente ao se usar um soluções com uma alta concentração e baixo valor de pH.

Já Chen e colaboradores (2014) avaliaram um precipitador eletrostático a úmido de único estágio para controle de nanopartículas emitidas na fabricação de semicondutores. Foi utilizado quatro eletrodos de descarga de tungstênio com diâmetro de 0,36 mm e espaçados igualmente em um duto de 40 cm de comprimento. Quatros canais de largura de 4,8 cm estavam possuíam placas na sua lateral, sendo que a área de coleta de cada era de 0,034 m². Eles demonstraram que a supersaturação de água no ar e a fina camada de água na parede das placas permitiram a aglomeração e crescimento das nanopartículas, além de eficiências aprimoradas entre 99,2 a 99,7%, enquanto que na ausência de água as eficiências totais foram de 67,9 a 92,9%. Outro método foi empregado por Kim e colaboradores (2010b) que utilizaram um sistema de *electrospray* induzir carga as partículas ao aspergir gotículas de água carregadas no sistema. Em testes na remoção de partículas de SiO₂ com diâmetro médio de 180 nm, a utilização desse sistema conjuntamente com um precipitador aumentou a eficiência de coleta, em 21 a 36%, dependendo do tamanho da partícula, quando se compara com o precipitador e o *electrospray* operados isoladamente, sob as mesmas condições operacionais.

Anderlohr e Schaber (2015) utilizaram um precipitador eletrostático a úmido do tipo tubo para remoção de nanopartículas de sílica. Através da transferência das partículas da fase gasosa para a líquida o equipamento forneceu eficiências acima de 99% para partículas com granulometria entre 5,9 a 661,2 nm, com baixos tempos de residência e consumo de energia. A adição de agentes estabilizadores no líquido de precipitação ofereceu a possibilidade de estabilizar diretamente as partículas ao entrar na fase líquida, viabilizando o processo de transferência de partículas.

Dey e Venkataraman (2012) também estudaram um precipitador eletrostático a úmido na coleta de nanopartículas de aerossóis monodispersos de poliestireno (PSL), bem como polidispersos de sacarose e ácido esteárico. O protótipo foi projetado para operação com um fluxo contínuo de líquido sobre a placa de coleta para permitir a coleta contínua de partículas da corrente de saída. As dimensões e os parâmetros operacionais foram otimizados usando a modelagem de distribuição de carga, mas em geral se utilizou um elétrodo de descarga de platina-ródio com 7 cm de comprimento na seção de carregamento e uma placa de latão tendo diâmetro de 4,2 cm e separado de toda a estrutura por isolamento de Teflon na seção de coleta. A eficiência de coleta variou entre 70% a 90% para partículas com tamanhos de 80 a 600 nm de diâmetro, em concordância razoável com as estimativas dos modelos teóricos. No entanto,

para partículas pequenas com diâmetros entre 20 e 80 nm a eficiência de coleta medida variou de 40% a 70%, significativamente menor do que as estimativas teóricas. Os autores associaram esse fato a possibilidade de ineficiência na neutralização de cargas negativas obtidas durante a atomização por jato de ar.

O desenvolvimento de novas geometrias e arranjos foi analisado por Li e colaboradores (2015), onde um novo tipo de precipitador eletrostático a úmido foi concebido, no qual os fios de descarga foram conectados diretamente na superfície de uma placa dielétrica para facilitar a instalação dos fios, minimizar a deposição de partículas e reduzir a emissão de ozônio mantendo uma alta eficiência de coleta de partículas. O precipitador possuía largura de 50 mm, altura de 20 mm e comprimento de 18 mm. Para partículas de granulometria entre 30 e 1870 nm, eficiências de coleta entre 90,9 a 99,7 e 98,8 a 99,9 % para velocidades de 0,50 e 0,25 m/s, respectivamente. A emissão de ozônio foi até duas vezes menos que um precipitador do tipo placa-fio convencional.

Já Yang e colaboradores (2018a) avaliaram um precipitador eletrostático a úmido combinado com um pré-carregador perfurado para remover partículas finas dos gases de combustão úmidos de usinas a carvão. O pré-carregador foi desenvolvido em uma instalação existente, onde as placas de distribuição de ar foram usadas como placas aterradas e eletrodos de descarga do com pinos foram colocados para gerar a descarga corona. O precipitador eletrostático funcionou como uma fase de coleta e carregamento, apresentando 10 eletrodos de descarga de 10 fios com espaçamento de 100 mm e a distância entre o fio e a placa de 60mm. As placas coletoras possuíam comprimento e altura de 1200 mm e 300 mm, respectivamente. As partículas coletadas na superfície das placas foram limpas por uma película de água. Os resultados mostraram que uma parte das partículas finas não foram carregadas e escaparam, sendo o limite de tamanho para carregamento parcial reduzido para 0,025 μm quando a tensão aplicada aumentou para 32 KV. Os resultados em maior escala mostraram que o nível médio de emissão de material particulado pode ser reduzido de 1,18 mg/m^3 para 0,43 mg/m^3 por esse sistema com pré-carregador em uma usina a carvão de 1000 MW.

Kim e colaboradores (2010a) também desenvolveram novo precipitador eletrostático com um pré-carregador com eletrodos de descarga de carbono. Mesmo os autores utilizando o processo a úmido, foi garantido o isolamento das placas de forma que a alta tensão pudesse ser aplicada nas placas ainda molhadas ou operar durante a limpeza. As dimensões com melhores eficiências foram de 16 canais de ionizadores com largura, altura e comprimento de 400, 400 e 800 mm, respectivamente. Na seção de coleta o espaçamento entre as placas foi de 10 mm com

dimensões de 400x400x185 mm³. Foi avaliado a eficiência de coleta de partículas de KCl com tamanhos entre 0,01 e 0,5 µm para diferentes voltagens, espaçamentos entre as placas de coleta e a vazões de ar. De acordo com os resultados, houve diminuição da eficiência com o aumento da velocidade e melhora na eficiência ao aumentar a tensão aplicada e diminuir o espaço entre as placas de coleta.

Entretanto, conforme explicitado por Oliveira (2019), mesmo com boas eficiências, a geração de lama no processo a úmido gera um inconveniente que é a formação de um efluente líquido. Além disso, nos casos em que as partículas apresentam valor agregado, a operação a seco mostra-se mais interessante e economicamente viável. Já o uso de formas de aglomerar partículas apresentam desvantagens que desmotivam sua utilização. Em casos que utilizam polímeros ou outras substâncias, além do aumento dos custos operacionais, deve-se levar em consideração a geração de efluentes com polímeros, agentes estabilizadores e ácidos, que necessitariam de processos de tratamento para descarte.

A maioria dos estudos focam na verificação da influência de condições operacionais na remoção de nanopartículas. Dessa forma, é encorajador buscar novas formas de otimizar o processo de precipitação eletrostática para remoção de nanoparticulados. Tal otimização envolve, além de parâmetros operacionais, a avaliação das influências dos parâmetros geométricos na coleta de nanopartículas, como o espaçamento entre as placas, diâmetro dos fios, suas configurações e espaçamentos.

Ning e colaboradores (2016) alteraram a geometria dos eletrodos a fim de avaliar seu impacto na eficiência de coleta. Eles se concentraram no estudo do fluxo eletro-hidrodinâmico no interior do precipitador e na eficiência da coleta de partículas usando Velocimetria por Imagem de Partículas e Impactador Elétrico de Baixa Pressão. Foi demonstrado que o aumento do espaço entre as placas coletoras e o diâmetro dos fios afetam negativamente a performance do precipitador, enquanto o aumento da distância e do número de fios tem efeito oposto.

Huang e Chen (2002) avaliaram a performance de precipitadores eletrostáticos placa-fio de simples e duplo estágio. Foram avaliados a eficiência de coleta de partículas de sacarose de diâmetro médio de 42 nm e concentração de $1,2 \times 10^5$ partículas/cm³. Para vazões de gás entre 50 e 150 L/min, eles concluíram que é economicamente viável o uso de precipitadores de simples estágio para partículas menores que 16 nm e duplo estágio para partículas maiores que 16 nm.

Ao se avaliar a geometria dos eletrodos de descarga, o estudo de Yang e colaboradores (2018a), explicitado anteriormente, também avaliaram três tipos de eletrodos de descarga: do tipo com pinos, de serra e haste. Os resultados dos testes mostraram que a corrente de corona e a máxima eficiência de coleta foram classificadas na ordem: com pinos, serra e haste. Świerczok e Jędrusik (2018) avaliaram o eletrodo de descarga com pontas na coleta de cinzas provenientes da queima da lignina com diâmetro entre 0,5 e 500 μm . O precipitador utilizado foi do tipo placa-fio com comprimento de 22,80 cm, altura de 5,80 cm e distância entre os eletrodos de descarga de 4 cm. O objetivo da pesquisa apresentada neste artigo foi comparar o valor da eficiência da coleta determinado experimentalmente e calculado usando o modelo Deutsch. Para voltagens aplicadas entre 20 e 60 kV e a velocidade do gás de 0,8 m/s, eficiências acima de 90% foram obtidas para voltagens mais altas, ocorrendo queda na eficiência em relação ao previsto pelo modelo em voltagens mais baixas. Também houve grandes diferenças entre os dados experimentais e os modelos para partículas menores que 10 μm .

Lu e colaboradores (2017) utilizaram um precipitador com vórtices para coleta de partículas entre 0,2 e 15 μm . Além de analisar a velocidade e voltagem, eles verificaram a influência do espaçamento entre eletrodos de descarga (70 a 120 mm) e área de coleta (0,65 e 1,13 m^2). Na análise do espaçamento entre fios, verificou-se um aumento da eficiência de coleta até 100 mm, após isso diminuindo com o aumento do espaçamento. Isso ocorre porque espaçamentos muito pequenos restringirá a voltagem, o que limitará o aumento da concentração de íons. Se o espaçamento for muito pequeno, haverá tempo insuficiente para formar um campo estável, o que é desvantajoso para a coleta de partículas finas. Se o espaçamento for muito grande, o vórtice reduz e o fluxo principal de gás flui para o espaço entre os eletrodos, ignorando-os, o que também é desvantajoso para a coleta de partículas finas. Já ao avaliar o aumento da área de coleta, a eficiência aumenta à medida que a área de coleta efetiva aumenta. Isso acontece porque, quando a área de coleta efetiva for maior, haverá mais linhas de campo entre os eletrodos de descarga e coleta, dessa forma aumentando as taxas de carregamento, colisão e coleta de partículas finas.

El Dein e Usama (2014) propuseram um modelo em escala laboratorial para validarem um modelo numérico utilizado para prever as características de corrente-tensão de um precipitador do tipo placa-fio. O modelo investigou os efeitos da configuração do eletrodo, do diâmetro dos fios (entre 0,55 e 1,85 mm), do espaçamento entre eles (6,5 e 25 cm), do número de eletrodos de descarga (1, 3 e 7 fios) e do espaçamento entre as placas coletoras (12,5 e 25 cm). Utilizaram um precipitador eletrostático com 100 cm de comprimento, 30 cm de altura e

30 cm de largura e variaram a voltagem entre 10 e 60 KV. O aumento do espaçamento entre os eletrodos de coleta afeta negativamente o desempenho do precipitador e leva à diminuição da corrente corona e ao aumento da voltagem de início da corona, sob a mesma tensão aplicada e diâmetro do fio. Isso foi explicado pela diminuição do campo elétrico resultante ao longo das linhas de campo, com conseqüente diminuição da corrente corona sob a mesma tensão aplicada. Em relação ao aumento no número de eletrodos de descarga, o efeito de blindagem foi mais pronunciado e maior a voltagem requerida para a corrente de início da corona. Ao avaliar o diâmetro de fios, verificaram que o menor diâmetro acarretou em uma menor voltagem para o início da corona e levou a maiores valores de corrente para todas as voltagens aplicadas. Já ao aumentar o espaçamento entre os fios, houve um aumento na corrente e na voltagem de ruptura, explicando esse fato novamente com o efeito da blindagem eletrostática.

He e Dass (2018) realizaram um design de experimentos baseado em uma simulação 3D FEM para obter uma correlação entre os parâmetros de projeto de um precipitador eletrostático (raio do eletrodo de descarga, comprimento da placa, espaçamento entre placas, tensão aplicada e diâmetro das partículas) com seu desempenho. Eles verificaram que as densidades de corrente nos fios centrais são mais baixas do que nas dos dois fios externos, o que é mais evidente em uma tensão aplicada mais alta. Isso foi atribuído aos efeitos de blindagem entre os fios adjacentes. Os fios centrais podem ser blindados pelos outros fios com um aumento subsequente das tensões de início da corona e uma diminuição do campo elétrico em suas superfícies. O efeito de blindagem nos fios centrais se torna mais pronunciado quando o ESP possui mais fios de descarga, porque a tensão de início aumenta com o número de fios. Além disso, eles indicaram a importância da realização de um design de experimentos para entender a influência das variáveis no processo e explicitaram que, além dos efeitos individuais, há também efeitos da interação entre dois ou mais parâmetros.

Kasdi (2016) realizou uma investigação experimental e numérica do precipitador eletrostático do tipo placa-fio. Foram utilizados o software Comsol Multiphysics e um modelo em escala laboratorial para fornecer medições da densidade de corrente e das características de corrente-tensão. Foi avaliado o número de fios entre 1 e 5, espaçamentos entre os fios entre 40 e 80 mm, diâmetros do fio de descarga entre 0,4 e 0,8 mm e espaçamento entre as placas coletoras constante em 100 mm. Uma maior corrente corona foi obtida com maiores números de fios e com o aumento do espaçamento entre eles. Os autores associaram esse comportamento a redução na interação das linhas de campo elétrico, ou seja, há um menor efeito de blindagem exercido por cada fio no outro, principalmente os fios centrais, reduzindo a corrente corona. Ao

se variar o diâmetro dos fios, foi observado que a voltagem de início da corona diminui com o aumento do diâmetro do fio. Consequentemente, para a mesma tensão aplicada, a corrente nos fios com diâmetros menores é mais intensa do que a corrente emitida pelos fios maiores diâmetros.

Preger e colaboradores (2020) também utilizaram o Comsol Multiphysics e chegaram à conclusão que esse software provou ser uma maneira útil de simular as trajetórias de uma coleção de nanopartículas em um fluxo de gás, combinado com um campo elétrico. Os modelos analíticos demonstram por que o processo de precipitação eletrostática de nanopartículas é robusto, mesmo com distribuição uniforme de partículas e tamanho bem definido. Eles encontraram uma relação exata entre o raio do ponto de deposição, os parâmetros de deposição e a distribuição da concentração de nanopartículas em um precipitador eletrostático.

Além desses estudos, é importante destacar os estudos envolvendo o processo de precipitação eletrostática realizados pela área de pesquisa de Controle Ambiental nas dependências do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos.

Andrade (2020) utilizou um precipitador eletrostático do tipo placa-fio de simples estágio com placas coletoras de comprimento 30 cm, altura de 10 cm e com espaçamento de 6,5 cm na coleta de nanopartículas de NaCl menores que 250 nm. O trabalho avaliou a influência da velocidade do ar (1,03, 2,04 e 4,08 cm/s), do campo elétrico (entre 3,08 e 3,38 KV/cm). Foi avaliado o número de eletrodos de descarga (1-4), o diâmetro de fio (de 0,3 e 0,4 mm) e espaçamento entre os eletrodos de descarga (6,5 cm e 12 cm). Os resultados comprovaram a eficiência do precipitador em remover nanopartículas, com 99,99% de remoção em algumas configurações, e evidenciaram o efeito negativo do aumento da velocidade na coleta de partículas e efeito positivo do campo elétrico. A autora evidenciou que um maior número de fios de descarga favorece a coleta de partículas devido a um maior número de emissores de corrente. Como em outros trabalhos, também foi mostrado o efeito positivo da redução do diâmetro dos fios na eficiência do precipitador. Além disso, o aumento do espaçamento entre os fios de descarga também favoreceu a coleta de nanopartículas e a autora associou isso a menor incidência da blindagem eletrostática.

Oliveira (2019) estudou a influência de velocidades abaixo de 10 m/s em um precipitador eletrostático do tipo placa-fio de simples estágio com placa coletora com comprimento de 30 cm e altura de 10 cm. O espaçamento entre os eletrodos de coleta foi de 4 cm e espaçamento entre os eletrodos de descarga de 4 cm. Foram utilizados 8 eletrodos de

descarga com diâmetro de 0,3 mm. Foram utilizadas velocidades de gás entre 1,7 e 19,9 cm/s e campo elétrico entre 3,95 e 4,10 KV/cm para determinar a eficiência de coleta para partículas de KCl, Fe₂O₃ e NiO com diâmetros menores que 250 nm. Foram empregadas concentrações de solução desses compostos entre 0,4 e 6 g/L para produzir nanopartículas por atomização de soluções e suspensões por dispersores de nano-aerossóis. Esse aumento da concentração da solução, além de aumentar a concentração do aerossol, também aumentava o diâmetro médio das partículas. Ele também concluiu que esse aumento da concentração favoreceu a coleta de partículas e que o aumento da velocidade a prejudicou, devido ao maior tempo de residência das partículas no interior do equipamento. Foi constatado um efeito positivo significativo no aumento no campo elétrico, aumentando com a velocidade até um máximo em 6,6 cm/s e que foi associado a efeitos de tempo de residência, da eletro-fluidodinâmica. Para as partículas de óxidos, verificou-se a formação de nanopartículas de granulometrias na saída do precipitador mais finas que na entrada, aumentando com a diminuição da velocidade e aumento do campo elétrico, sendo associado com a desagregação de aglomerados de óxidos e com a erosão dos fios.

Meira (2009) utilizou um precipitador do tipo placa-fio para remoção de nanopartículas de polidispersas de NaCl com diâmetro entre 6 e 245 nm. Os eletrodos de coleta (placas) possuíam comprimento de 30 cm e altura de 10 cm, com espaçamento de 4 cm. Foram utilizados 8 eletrodos de descarga com diâmetro de 2,5mm e com espaçamento de 4 cm. Foram avaliadas velocidades entre 1 e 10 cm/s e campos elétricos entre 4 e 5,5 kV/cm. Foram obtidas eficiências de coleta acima de 99% para todas as velocidades avaliadas entre os campos elétricos de 4 e 5,5 kV/cm. Como esperado, houve aumento da eficiência com o aumento do campo elétrico, chegando a valores máximos em campos elétricos maiores que 5 KV/cm. Os experimentos realizados com campo elétrico menor ou igual a 3,8 kV/cm não apresentaram um comportamento de velocidade definido, onde ocorreu um aumento eficiência entre 1 e 2 cm/s que não foi explicado pela autora. Para valores superiores a 3,8 KV/cm houve queda na eficiência com aumento da velocidade, fato atribuído a diminuição do tempo de residência. A queda na eficiência de coleta para partículas abaixo de 20 nm foi associada ao baixo carregamento e o aumento na eficiência para partículas maiores que 20 nm foi associado ao aumento da mobilidade elétrica. Os dados experimentais não ajustaram bem ao modelo de Deutsch.

Falaguasta (2005) estudou a coleta de partículas em precipitadores do tipo placa-fio para partículas de alumina com diâmetro mediano de 0,6 µm e diâmetro máximo de 2,5 µm, e para

partículas nanométricas de cloreto de sódio com diâmetros entre 8 e 100 nm. Para o estudo com $PM_{2,5}$ foram variados o comprimento das placas (15 e 30 cm), diâmetros dos eletrodos de descarga (2,5 e 4,5 mm), espaçamentos entre eletrodos de descarga (2 e 4 cm), campos elétricos (entre 5 e 8 kV/cm) e velocidades do gás (entre 50 e 100 cm/s). Para o estudo com partículas nanométrico foram variados o comprimento das placas (15 e 30 cm), o espaçamento entre as placas (4 e 6 cm), velocidade do ar (12,5; 25; 50 cm/s) e densidades de corrente (1,8; 2,8; 3,8 mA/m²). O estudo comprovou a capacidade de coleta pelos precipitadores eletrostáticos, inclusive para nanopartículas, com eficiências superiores a 99% para algumas configurações. O aumento da velocidade do ar reduziu a eficiência de coleta. Ela demonstrou que o aumento do comprimento da placa e a distância entre placas causa uma elevação na eficiência de coleta de nanopartículas monodispersas. Essa melhor performance em precipitadores mais largos, ao contrário do que diz modelos como o Deutsch, foi atribuída ao aumento na intensidade do campo devido ao efeito dos íons e partículas carregadas. Esse inesperado comportamento também foi observado por outros pesquisadores, principalmente para partículas de elevada resistividade. O aumento do diâmetro dos fios levou a uma diminuição da eficiência, fato associado à diminuição da corrente elétrica gerada e à consequente diminuição do campo elétrico e carga espacial. Também houve um aumento da eficiência com o aumento da densidade de corrente. O modelo de Deutsch utilizando uma versão modificada da força de arraste de Li e Wang se ajustou adequadamente aos dados experimentais.

Cerda (2004) estudou o perfil de concentração em um precipitador do tipo placa-fio de comprimento de 50 cm e largura de 20 cm na coleta de partículas com diâmetro médio de 4,5 μ m. Foi utilizado 6 eletrodos de descarga com diâmetro de 1 mm e com espaçamento de 10 cm. Foi avaliado o campo elétrico (2,5-5 kV/cm) e a velocidade do ar (0,6-1,4 m/s). Os resultados mostraram que a concentração de partículas é maior no centro no início do duto e depois tende a ficar constante, além de diminuir em direção as placas coletoras. Também foi constatado que em maiores campos elétricos essa variação é menor. O modelo de Deutsch ajustou os dados experimentais.

Como foi explicitado, a maioria dos trabalhos se focaram na verificação da influência de condições operacionais na remoção de nanopartículas. Além disso, muitos desses trabalhos também utilizaram precipitadores eletrostáticos a úmido e, como já foi mostrado, há a desvantagem da formação de um efluente líquido. Dessa forma, é encorajado buscar novas formas de otimizar o processo de precipitação eletrostática para remoção de nanoparticulados. Tal otimização envolve, além de parâmetros operacionais, a avaliação das influências dos

parâmetros geométricos na coleta de nanopartículas. Com isso, esse trabalho visa avaliar a influência da geometria do precipitador eletrostático na remoção de partículas de faixa nanométrica. Será avaliado como a eficiência de coleta se altera com mudanças no espaçamento entre os eletrodos de coleta (placas), espaçamento entre os eletrodos de descarga (fios) e comprimento das placas. Para tal, será realizado um planejamento de experimentos para determinação estatística da influência desses parâmetros. A partir disso, nas melhores condições geométricas, será avaliado a influência da voltagem e vazão visando definir as condições ótimas de remoção das nanopartículas e interação entre os parâmetros.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Investigar a influência de parâmetros geométricos e operacionais na coleta de nanopartículas de NaCl utilizando precipitadores eletrostáticos do tipo placa fio de único estágio e operando a seco.

3.2. Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos, estão:

- Determinar os parâmetros adequados na comparação entre os dois precipitadores como: vazão, velocidade, voltagem, campo elétrico e concentração.
- Caracterizar eletricamente os dois precipitadores eletrostáticos com geometrias diferentes.
- Verificar a influência dos seguintes parâmetros geométricos na eficiência de coleta de nanopartículas: espaçamento entre eletrodos de coleta e espaçamento entre eletrodos de descarga.
- Verificar a influência dos seguintes parâmetros operacionais na eficiência de coleta de nanopartículas: campo elétrico e velocidade (tempo de residência).
- Determinar a influência dos parâmetros geométricos e definir a melhor condição de projeto.

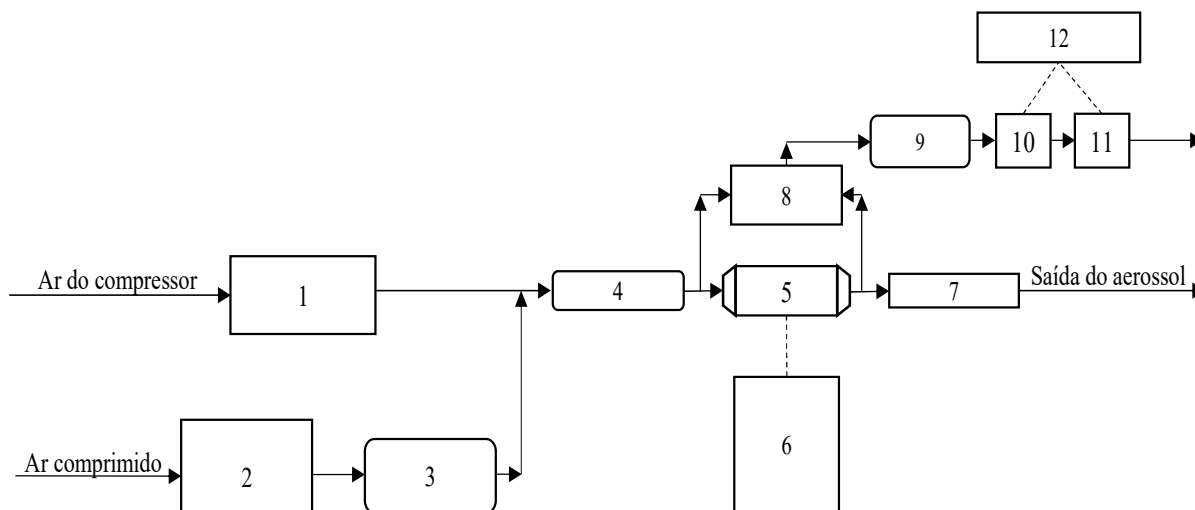
4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção serão apresentados os materiais, aparatos e métodos utilizados nos testes experimentais. Também será descrito as metodologias utilizadas nos estudos das influências dos parâmetros geométricos e operacionais na coleta de nanopartículas.

4.1. Unidade experimental

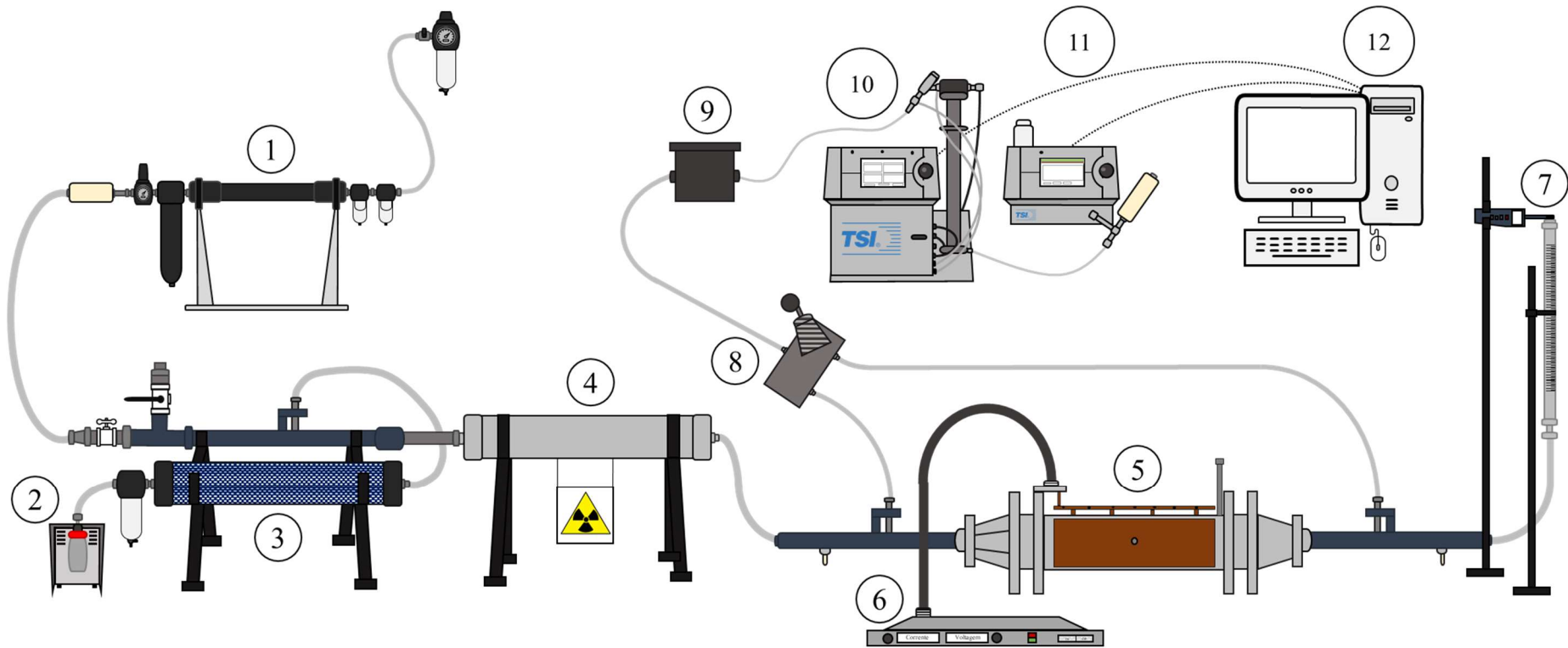
De forma geral, a unidade experimental contém um precipitador eletrostático de paredes de acrílico, eletrodos de coleta de cobre e eletrodos de descarga de aço inox, um gerador de nanopartículas por atomização e um sistema de análise de partículas por mobilidade elétrica (SMPS), explicado melhor nas próximas subseções. Durante a operação foram coletados os valores de umidade relativa e temperatura com um higrômetro da marca Rotronic, modelo Hygropalm. A Figura 14 e Figura 15 apresentam, respectivamente, um fluxograma unidade experimental e sua representação gráfica.

Figura 14. Fluxograma da unidade experimental onde: (1) Filtros de ar; (2) Gerador atomizador; (3) Secador de difusão; (4) Fonte de Kr-85; (5) Precipitador eletrostático; (6) Fonte de alta tensão; (7) Rotâmetro; (8) Válvula de três vias; (9) Fonte de Am-241; (10) Classificador eletrostático; (11) Contador de partículas; (12) Microcomputador.



Fonte: Autor.

Figura 15. Representação gráfica da unidade experimental.



Fonte: Autor.

Na linha principal, ar foi alimentado através de um compressor (Schulz, modelo MSV 12/175) e levado a um sistema de purificação composto por um filtro de purificação (TSI, modelo 3074B), para remoção de impurezas. Paralelamente, um gerador atomizador de partículas (TSI, modelo 3079) injetava ar comprimido para atomizar a solução aquosa de NaCl. O aerossol (ar + nanopartículas) foi encaminhado para um secador por difusão (TSI, modelo 3062), que continha sílica-gel em seu interior, para remoção das partículas de água que envolviam o particulado. Essa corrente foi introduzida à linha principal onde, após a mistura, passou por uma fonte neutralizadora de criptônio 85 (Kr-85) (TSI, modelo 3054), a montante do precipitador eletrostático, a fim de remover quaisquer cargas residuais.

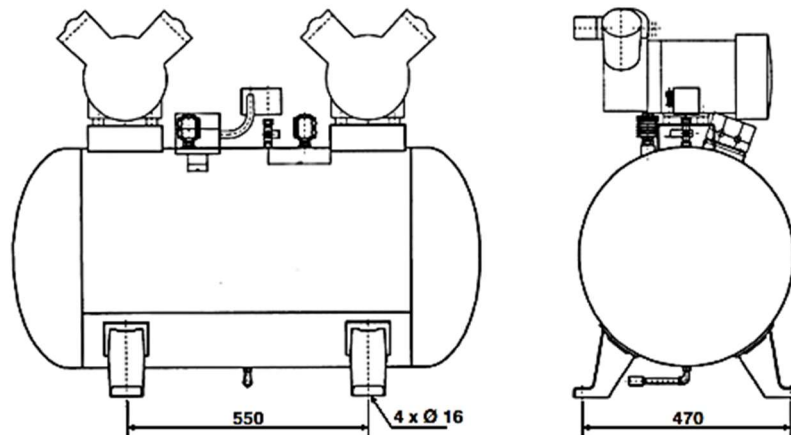
O aerossol seguiu para o precipitador eletrostático, que estava conectado a uma fonte de alta tensão (Spellman, modelo SL 1200) para geração do efeito corona. Uma válvula de três vias coletava amostras ora a montante e ora a jusante desse equipamento. O restante da corrente passou por um rotâmetro (Gilmont, modelo D7200-D7299, número 4) conectado no final da linha principal. A amostra seguiu para uma fonte neutralizadora de Am-241, para também remover cargas residuais que podem causar interferência nos resultados, seguindo na sequência para a aferição da concentração pelo Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (TSI, modelo 3936), composto por um Classificador Eletrostático (modelo 3080) acoplado a um Analisador de Mobilidade Diferencial (DMA) e um Contador de Partículas Ultrafinas (UCPC, modelo 3776), ambos enviavam dados para um microcomputador.

Os principais equipamentos serão apresentados de forma mais detalhada nas próximas subseção.

4.1.1. Compressor de ar

Como dito anteriormente, o ar é fornecido por um compressor Schulz, modelo MSV 12/175. Segundo o catálogo técnico, esse equipamento possui 1 estágio, com pressão de operação máxima de 120 psig e isento de óleo, de forma a evitar a contaminação da corrente gasosa (SCHULZ, 2008). A Figura 16 mostra uma representação do compressor.

Figura 16. Representação do compressor.



Fonte: Schulz (2008).

4.1.2. Filtro de purificação de ar

O ar seguiu para um filtro de purificação de ar da TSI (modelo 3074B), conforme Figura 17, que remove gotas de óleo ou outros líquidos do ar através do uso de dois pré-filtros, elimina qualquer umidade remanescente em um secador por membrana e coleta partículas finas com um filtro de alta eficiência. Segundo o fabricante, esse equipamento pode operar até vazões máximas de 60 L/min para gases com ponto de orvalho de até 2°C e uma pressão máxima de 1000 kPa (150 psig) (TSI, 2019).

Figura 17. Filtro de purificação de ar da TSI, modelo 3074B.



Fonte: TSI (2019).

4.1.3. Gerador de nanopartículas

Foi utilizado um gerador de nanopartículas TSI, modelo 3079A, conforme Figura 18, para gerar nanopartículas de NaCl a partir de uma solução de NaCl $0,1 \text{ g.L}^{-1}$. Esse equipamento permite obtenção de um aerossol mais uniforme, sem variações de concentração ao longo do tempo e com alta reprodutibilidade dos experimentos, com vazões de até 250 NL/h , ajustadas por uma válvula do tipo agulha.

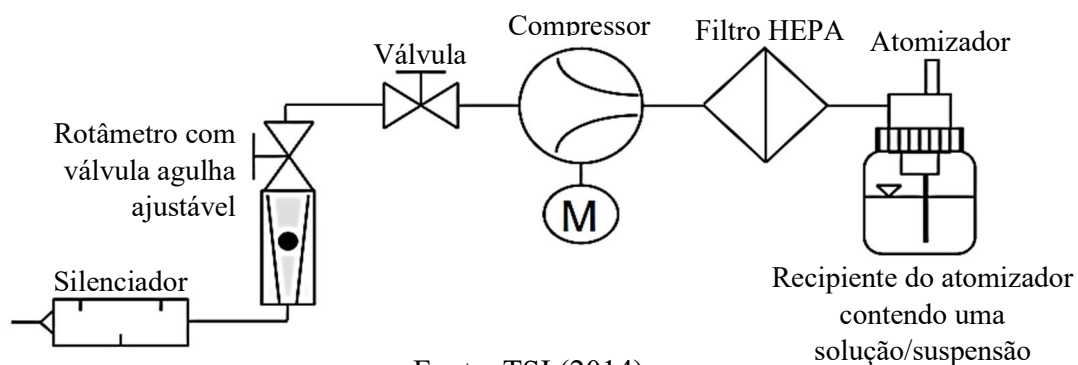
Figura 18. gerador de nanopartículas TSI, modelo 3079A, com vazão de aerossol ajustável.



Fonte: TSI (2014).

Segundo o fabricante, o ar é fornecido por um compressor interno e passa por um filtro HEPA para retirada de impurezas. Ele é encaminhado para uma placa de orifício, onde é expandido e atomiza a solução contida em um frasco. Esse recipiente também atua como impactador, retendo gotículas maiores, e possui uma válvula de alívio de pressão para proteger o equipamento em caso de a saída estar bloqueada (TSI, 2014). A Figura 19 explicita um esquema do funcionamento desse equipamento.

Figura 19. Esquema do funcionamento do gerador de nanopartículas.



Fonte: TSI (2014).

4.1.4. Solução para geração de nanopartículas

A solução de NaCl $0,1 \text{ g.L}^{-1}$ foi preparada utilizando cloreto de sódio da marca J.T.Baker, com pureza de 99,70%, e água deionizada, obtida a partir do sistema *Simplicity Ultrapure Water System*, que purifica a água destilada, retirando impurezas e íons utilizando resinas de troca iônica. Dessa forma, é possível obter água com resistividade a 25°C de $18,2 \text{ M}\Omega.\text{cm}$ (MILLIPORE, 2020).

As propriedades do cloreto de sódio são: densidade de $2,170 \text{ g/cm}^3$, resistividade de $2 \times 10^7 \text{ }\Omega.\text{m}$ (FALAGUASTA, 2005) e permissividade relativa a 25°C de 5,9 (LIDE, 1997).

4.1.5. Secador por difusão

A remoção do excesso de umidade no aerossol, gerado no atomizador, é realizada em um secador por difusão da TSI, modelo 3062, conforme Figura 20, utilizando como princípio a captura difusional. O aerossol passa dentro de uma tela cilíndrica de alumínio e não entra em contato com o material dessecante (sílica-gel), colocada no espaço entre a tela e a parede do equipamento, garantindo uma perda mínima de partículas. Esse equipamento também possui um extrator para remover gotículas de água maiores (TSI, 2019).

Figura 20. Secador por difusão da TSI, modelo 3062.



Fonte: TSI (2020).

4.1.6. Fontes neutralizadoras

O aerossol, após passar pelo secador por difusão, se mistura na linha principal contendo ar do compressor. Essa corrente é encaminhada para uma fonte neutralizadora de criptônio (Kr-85), um inerte gasoso que está completamente fechado no interior de um tubo de aço inoxidável, para neutralizar qualquer carga residual nas partículas. Para isso, a atmosfera circundante é ionizada com íons negativos e positivos, utilizando um decaimento do tipo beta, permitindo que as partículas sejam descarregadas pela captura de íons de polaridade oposta. Dessa forma, se evita que as partículas sejam depositadas nas paredes das tubulações, devido a forças eletrostáticas. A fonte neutralizadora de Kr-85 é dada na Figura 21.

Figura 21. Fonte neutralizadora de Kr-85 da TSI, modelo 3054.



Fonte: TSI (2019).

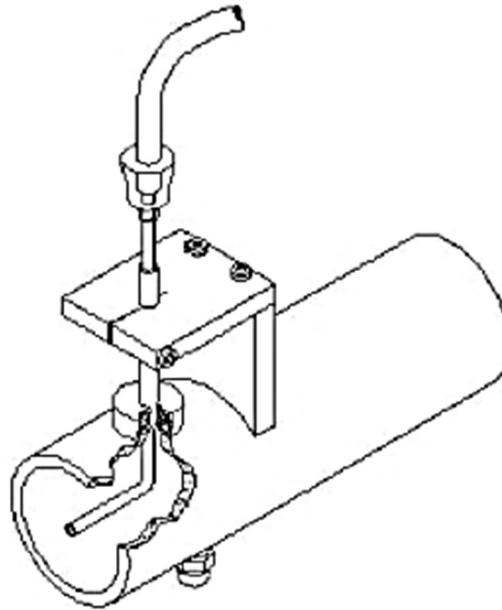
Uma outra fonte radioativa, de amerício (Am-241), acondicionada em uma caixa de chumbo, instalada antes das amostras do aerossol segurem para o Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (SMPS). Essa fonte segue o mesmo princípio explicado anteriormente, mas com decaimento do tipo alfa e é necessária pelo fato do classificador eletrostático utilizar como princípio a diferença de mobilidade elétrica das partículas. Logo, possíveis cargas residuais adquiridas pela passagem no precipitador eletrostático são neutralizadas e impede a interferência nos resultados da aferição.

4.1.7. Amostragem de partículas

A amostragem do aerossol é realizada a 26 cm da entrada e saída do precipitador, onde

estão localizadas sondas metálicas de 2 mm de diâmetro interno, fixadas na superfície da tubulação. Elas possuem um ângulo reto e foram alinhadas no centro da tubulação, paralelas ao fluxo de escoamento do ar, conforme Figura 22.

Figura 22. Sonda de amostragem na tubulação de escoamento do aerossol.



Fonte: Meira (2009).

A tubulação no ponto de amostragem possui diâmetro de 2,6 cm. Mangueiras de 0,5 cm de diâmetro, conectadas em cada sonda, conduzem o aerossol para uma válvula de três vias, utilizada para garantir a amostragem alternada antes e após a passagem pelo precipitador eletrostático. A saída dessa válvula foi conectada a fonte neutralizadora de amerício (Am-241), antes do Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (SMPS).

4.1.8. Classificador eletrostático

A amostra do aerossol polidisperso segue o classificador eletrostático (TSI, modelo 3080), com um analisador de mobilidade diferencial longo (*Long DMA*, TSI, modelo 3081), conforme Figura 23, que separa as partículas com base em sua mobilidade elétrica.

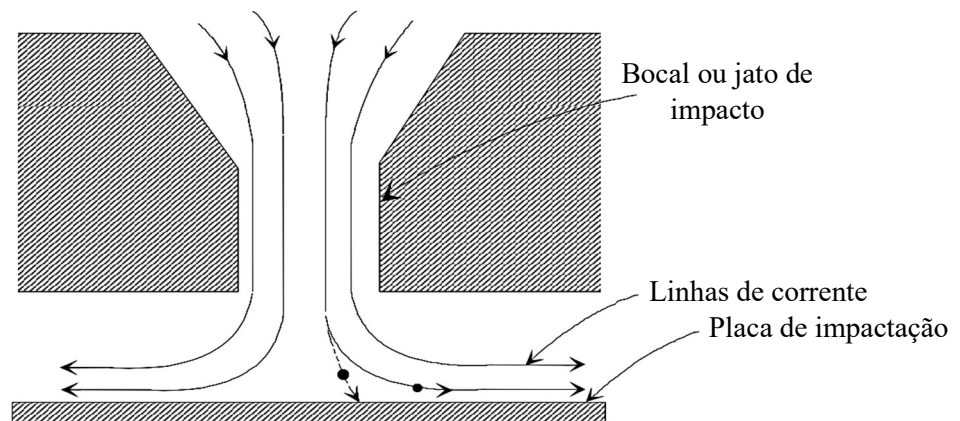
Figura 23. Classificador eletrostático da TSI, modelo 3080, com um analisador de mobilidade diferencial longo (*Long DMA*) da TSI, modelo 3081.



Fonte: TSI (2009).

Segundo o manual do fabricante, a amostra do aerossol passa primeiramente por um impactador localizado na parte externa do classificador eletrostático, que remove partículas maiores que uma carga elementar por impactação inercial, conforme Figura 24. O fluxo do aerossol é acelerado por um bocal e direcionado a uma placa plana (placa de impactação) de tamanho de orifício igual a 0,071 cm, que desvia o fluxo para formar uma curva de 90° nas linhas de corrente. Com esse mecanismo, partículas maiores e, conseqüentemente, com maior inércia são incapazes de seguir as linhas de corrente e ficam retidas na placa. Por outro lado, as partículas menores seguem as linhas de fluxo, evitam o contato com a placa e saem do impactador (TSI, 2009).

Figura 24. Esquema do impactador inercial.



Fonte: TSI (2009) – Adaptado.

O aerossol segue para o classificador eletrostático e entra em um carregador bipolar Kr-85, que expõe as partículas do aerossol a altas concentrações de íons bipolares, de forma a atribui-las cargas positivas, negativas ou nulas. O aerossol carregado segue para o Analisador de Mobilidade Diferencial (DMA), que consiste em dois cilindros de metal concêntricos. O cilindro interno é carregado negativamente, atuando como coletor, enquanto o cilindro externo é aterrado, criando um campo elétrico entre eles (TSI, 2009).

Dois fluxos estão presentes no DMA, ambos introduzidos na parte superior do classificador: o ar de diluição (*sheath flow rate*) segue por uma câmara anular, passa por uma dupla tela fina de nylon para homogeneizar o fluxo e escoar laminar e axialmente na região do classificador; o aerossol polidisperso (*sample flow rate*) escoar axialmente entre dois cilindros concêntricos e é introduzido suavemente na região do classificador para distribuir uniformemente o fluxo laminar. Ambos os fluxos passam pelo anulo sem se misturarem (TSI, 2009). A Figura 25 apresenta esses fluxos, bem como os componentes internos do classificador eletrostático e do DMA.

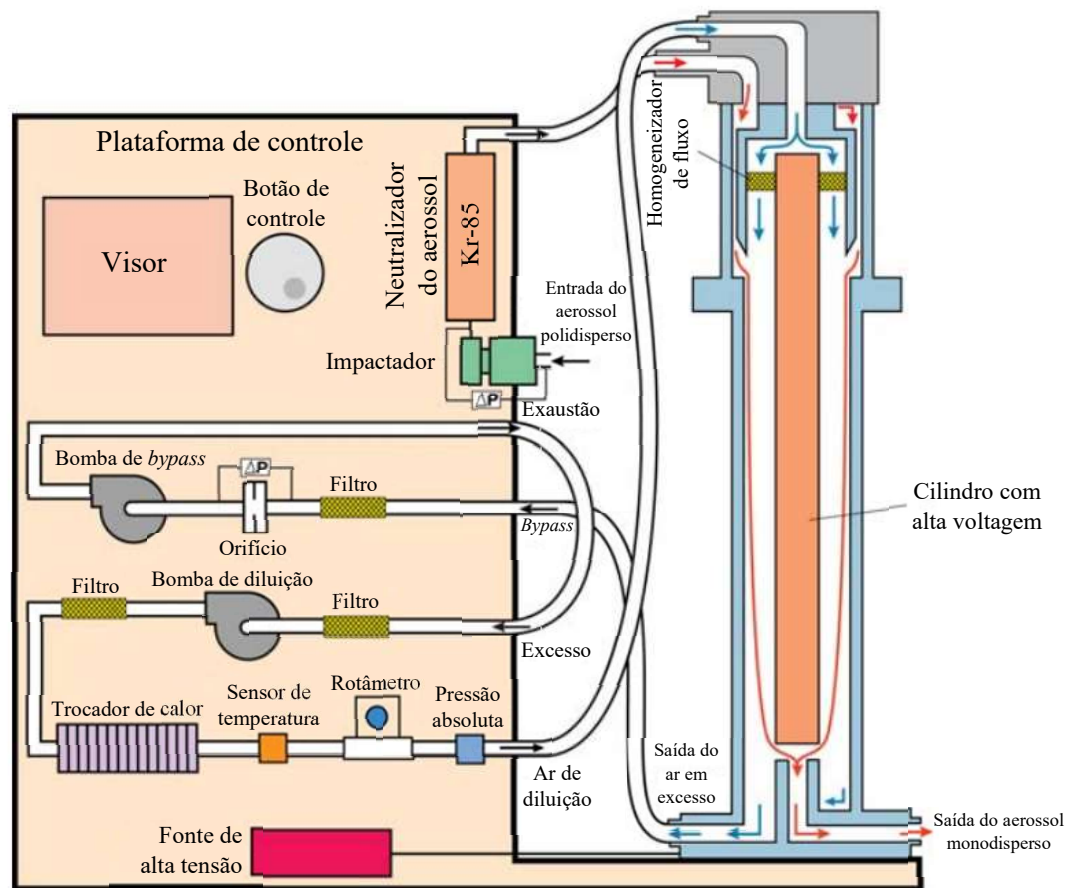
O campo elétrico criado pelos cilindros concêntricos permite que as partículas carregadas positivamente sejam atraídas para o cilindro interno carregado negativamente. As partículas são depositadas em todo o comprimento do cilindro de acordo com sua mobilidade elétrica, ou seja, partículas com menor mobilidade são depositadas na região inferior, enquanto partículas com maior mobilidade são depositadas na região mais alta do DMA. Já as partículas carregadas negativamente são depositadas no eletrodo externo e as partículas sem carga são removidas (TSI, 2009).

As partículas em uma faixa de mobilidade elétrica são direcionadas a uma fenda com doze buracos no eletrodo central, deixam o DMA através de um isolador inferior como um escoamento monodisperso e seguem para o contador de partículas. O restante do fluxo é removido do equipamento por uma corrente de ar em excesso (TSI, 2009).

No classificador eletrostático, é possível ajustar o tempo de amostragem (*scan up*), o tempo de descarregamento do sistema para nova aferição (*retrace*) e o tempo entre aferições (*break*). Esses valores foram determinados conforme a recomendação do fabricante. No controlador do equipamento pode-se alterar o valor de vazão do ar de diluição (*sheath flow rate*) e do aerossol polidisperso (*sample flow rate*), desde que se mantenha a relação 1/10 entre os valores conforme recomendado pelo fabricante. Nos experimentos foram utilizados os

valores de 14 e 1,4 L/min, respectivamente, para o *sheath flow rate* e *sample flow rate*. Dessa forma, a faixa de diâmetro de partículas analisadas foi entre 6,15 a 241,4 nm.

Figura 25. Esquema dos fluxos e componentes internos do classificador eletrostático acoplado ao *Long DMA*.



Fonte: TSI (2009) – Adaptado.

4.1.9. Contador de partículas

Após o classificador eletrostático, o fluxo com as partículas entra no contador de partículas ultrafinas por condensação (UCPC) da TSI, modelo 3776, conforme mostrado na Figura 26. De acordo com o fabricante, uma bomba interna de vácuo bombeia a amostra de aerossol para o interior do contador de partículas. Nos experimentos foi utilizado o modo de operação de vazão alta (1,5 L/min), onde 1,2 L/min da vazão de entrada foi desviada como *bypass* e 0,3 L/min da vazão de entrada segue para o conjunto do sensor.

Figura 26. Contador de partículas ultrafinas por condensação (UCPC) da TSI, modelo 3776.



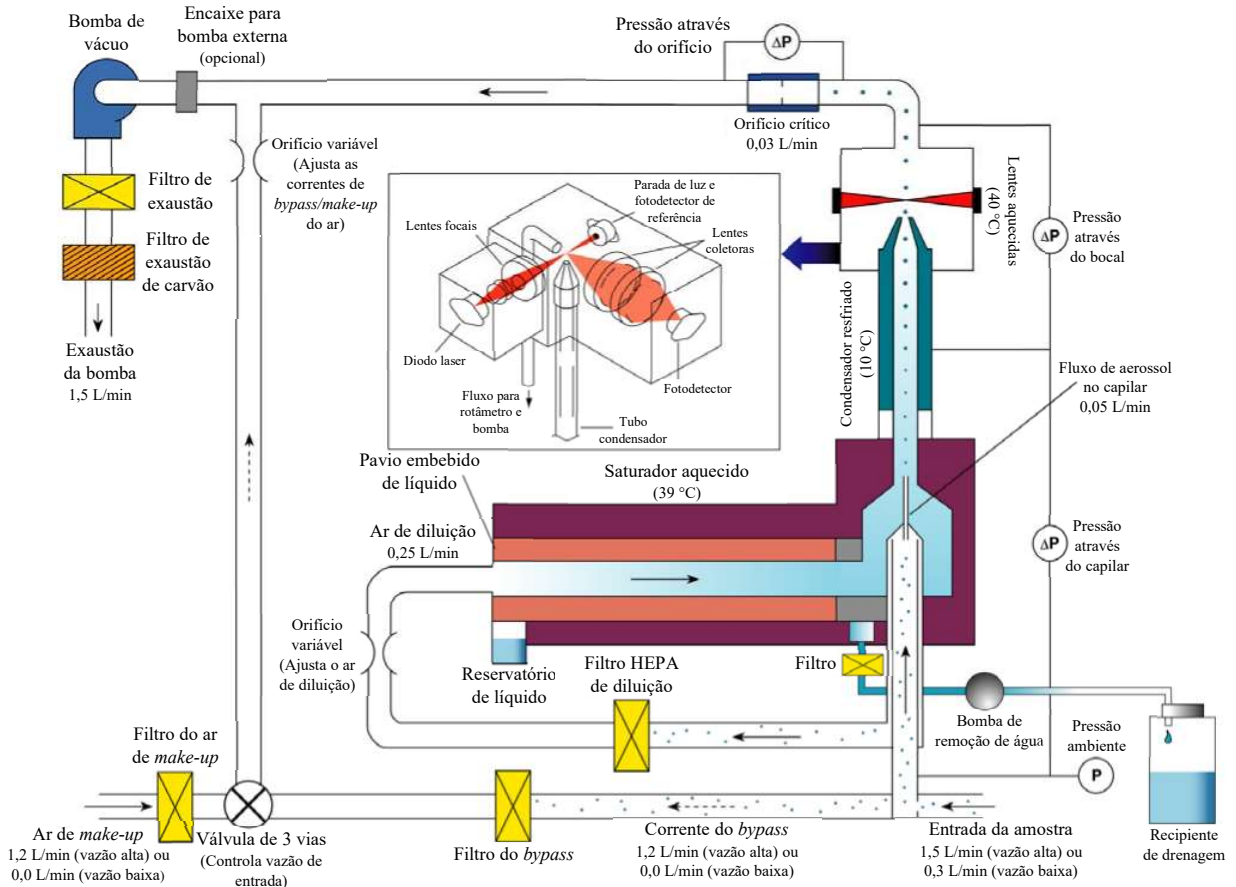
Fonte: TSI (2006).

A Figura 27 mostra uma representação do interior do equipamento. A vazão de 0,3 L/min é novamente separada em ar de diluição (0,25 L/min) e vazão do aerossol (0,05 L/min). O ar de diluição segue para um filtro HEPA, onde são retiradas as partículas. O ar limpo é bombeado para o saturador aquecido a 39°C, onde passa através de um pavio embebido em butanol líquido, que evapora e difunde na corrente até a saturação. A amostra do aerossol passa através de um capilar e se une ao vapor saturado do ar de diluição em uma pequena seção aquecida, permitindo que o vapor se difunda no aerossol. Esse fluxo entra no condensador resfriado a 10°C, onde o butanol se torna supersaturado e condensa. As partículas presentes na corrente da amostra atuam como núcleo de condensação, chamada de condensação heterogênea, onde as partículas maiores que um diâmetro limite crescem rapidamente para gotículas maiores e passam através de um detector óptico, onde são facilmente contadas. O líquido que condensa nas paredes do tubo condensador retorna para o saturador para reuso (TSI, 2006).

No detector do sensor óptico, o laser e as lentes de colimação formam uma faixa de luz horizontal acima do bocal de saída do aerossol. As lentes coletoras e o detector incorporam um par de lentes esféricas que coletam a luz dispersa pelas gotículas em um ângulo de 90°C e concentram a luz em um fotodiodo de baixo ruído. O feixe principal é bloqueado por uma parada de luz na parte traseira da câmara da câmara de detecção. Um fotodiodo de referência é usado para manter a potência do laser constante. A temperatura da superfície da caixa óptica é

mantida em um nível superior ao do saturador para evitar condensação nas superfícies das lentes (TSI, 2006).

Figura 27. Esquema dos fluxos e componentes internos do contador de partículas.



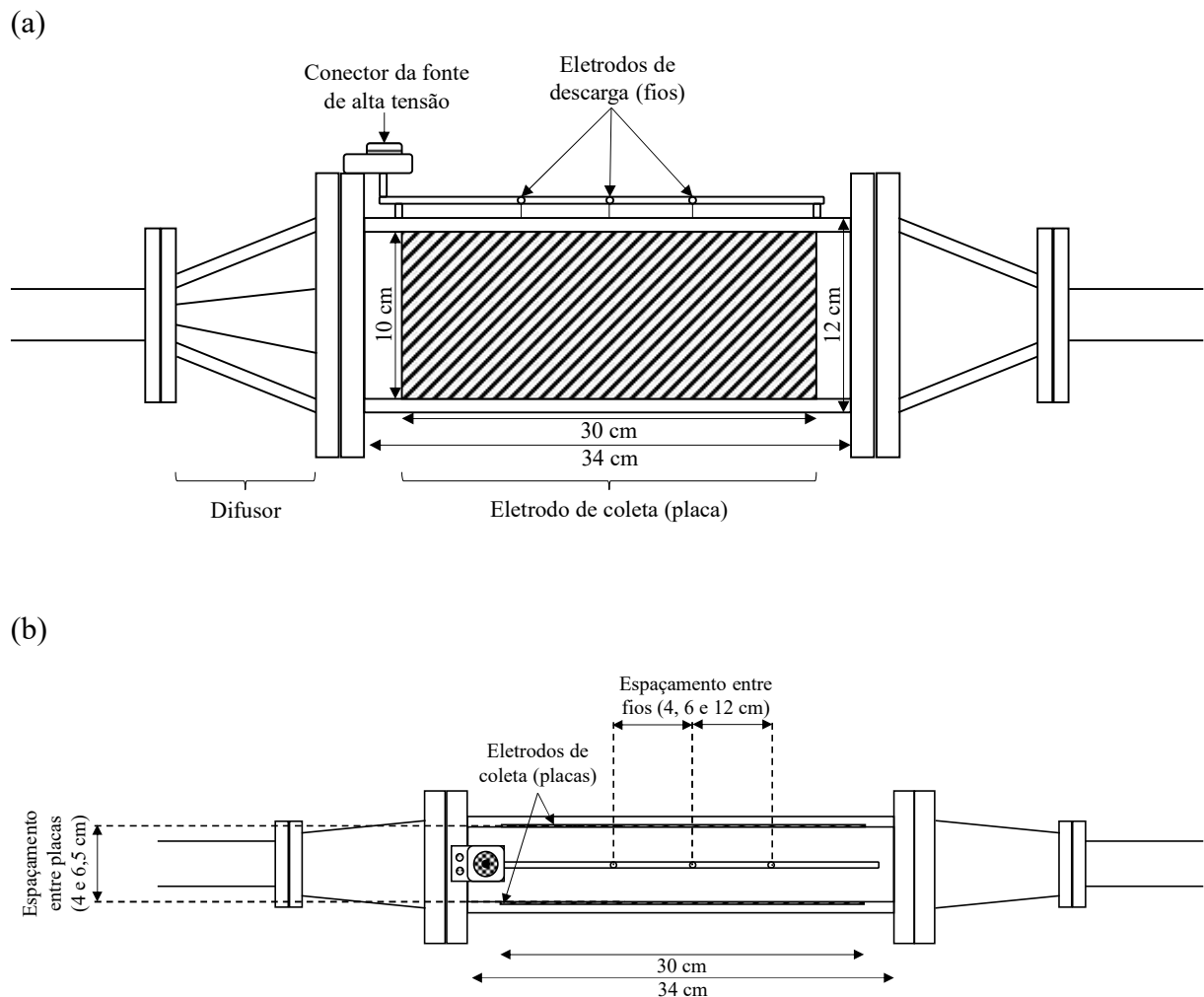
Fonte: TSI (2006) – Adaptado.

4.2. Precipitadores eletrostáticos

Os precipitadores eletrostáticos foram construídos em escala laboratorial e seu desenho esquemático está demonstrados na Figura 28. Eles são do tipo placa-fio, de único estágio e construído em acrílico. As placas coletoras são de cobre e os eletrodos de descarga de aço inox. Sua concepção permite realizar alterações no número, espaçamento, diâmetro e tipo de fios utilizados.

Ele possui um conector para a fonte de alta tensão na sua parte superior e um conector em cada placa para o aterramento. Há um difusor na entrada do equipamento com a finalidade de homogeneização e minimizar efeitos de entrada do aerossol. Uma caixa de acrílico foi colocada na parte superior do precipitador para evitar contato com a região energizada e garantir a segurança do operador. A Tabela 1 apresenta as principais dimensões dos precipitadores utilizados.

Figura 28. Representação do precipitador eletrostático com cotas nas principais dimensões onde: (a) vista frontal; (b) vista superior.



Fonte: Autor.

Tabela 1. Dimensões dos precipitadores eletrostáticos que foram utilizados nesse trabalho

| Dimensões | P.I* | P.II* |
|--|-------------|--------------|
| Altura da placa coletora (cm) | 10 | 10 |
| Comprimento da placa coletora (cm) | 30 | 30 |
| Número de placas coletoras | 2 | 2 |
| Espaçamento entre placas (cm) | 4 | 6,5 |
| Número de eletrodos de descarga (cm) | 3 e 5 | 3 e 5 |
| Espaçamento entre eletrodos de descarga (cm) | 4, 6 e 12 | 4,6 e 12 |
| Diâmetro dos eletrodos de descarga (mm) | 0,4 | 0,4 |

*P.I e P.II referem-se a dois precipitadores eletrostáticos diferentes.

Fonte: Autor.

4.3. Procedimentos experimentais

Conforme explicitado anteriormente, para avaliar a performance dos precipitadores do tipo placa-fio foi utilizado um sistema que dispersa partículas nanométricas polidispersas de cloreto de sódio (NaCl) em uma corrente de ar. O aerossol formado passou pelo precipitador eletrostático para sua remoção e avaliação da eficiência de coleta.

Foi realizado testes de estanqueidade para verificar se havia vazamentos nos dois precipitadores utilizados e testes sem a aplicação de voltagem para quantificar a perda de nanopartículas simplesmente pela passagem pelo precipitador eletrostático. Foi aceito um valor máximo de perda de partículas de 10%, sendo que medidas de contenção foram tomadas em caso de valores superiores. Antes do uso de cada configuração geométrica e condições operacionais foi determinado a curva corrente-tensão para caracterização elétrica.

Foram realizados testes preliminares para determinar quais faixas de vazão de aerossol, vazão do gerador de nanopartículas e voltagem seriam interessantes trabalhar nos testes de influência de parâmetros geométricos na precipitação eletrostática de particulados na faixa nanométrica. Além disso, também foi investigado qual parâmetro constante (vazão ou velocidade, voltagem ou campo elétrico) permitiria uma melhor comparação entre dois precipitadores.

Nos demais testes, foi variado a velocidade e campo elétrico aplicada nos precipitadores. Para a avaliação dos parâmetros geométricos foram realizadas as seguintes etapas: verificação da influência do espaçamento entre placas, mantendo o número, espaçamento e diâmetro de

fios constantes; verificação do espaçamento entre fios para cada espaçamento entre placas, mantendo o número e diâmetro dos fios constante; análise estatística.

4.3.1. Curva Corrente-Tensão

A curva corrente-tensão é importante para entender os limites de operação do precipitador eletrostático. Ela foi determinada para todas as configurações e condições de operações utilizadas nesse estudo. O procedimento foi realizado com e sem a presença de nanopartículas. Após o equipamento ser colocado em operação, foram coletados os valores de umidade relativa e temperatura.

Com a fonte de alta tensão ligada, a voltagem foi aumentada gradualmente a um passo de 1kV. Foram coletados os valores do par corrente e tensão desde 1kV até o rompimento dielétrico do ar, caracterizado por um ruído e centelhas no interior do precipitador eletrostático. O procedimento foi realizado em triplicatas.

4.3.2. Testes preliminares

Os testes preliminares foram realizados para definir quais variáveis seriam variadas e quais mantidas constantes. Foram utilizados dois precipitadores eletrostáticos, com espaçamentos de 4 cm e 6,5 cm, ambos com 5 eletrodos de descarga com diâmetro de 0,4 mm e espaçados por 6 cm. A umidade do ar e temperatura, ambiente e no fim da linha, foram medidas em cada experimento.

Inicialmente, foram realizados testes para comparar se haveria alteração na concentração de entrada de nanopartículas entre os dois precipitadores eletrostáticos, ao se manter todos os outros parâmetros constantes, sem aplicar voltagem. Nesses testes, também foram avaliadas diferenças na concentração ao se utilizar velocidade ou vazão constante em cada precipitador. Isso foi necessário pois foram utilizados precipitadores com áreas transversais diferentes e conseqüentemente, vazões iguais proporcionaria velocidades diferentes dentro do precipitador, alterando sua fluidodinâmica, já velocidades iguais

proporcionaria vazões diferentes, o que poderia alterar a concentração de partículas pelo aumento do ar de diluição. Nos testes envolvendo a vazão constante, foram utilizadas vazões de 3,27, 7,15, 11,2 e 15,10 L/min e nos testes envolvendo a velocidade, foram utilizadas velocidades de 0,9, 1,9, 2,9 e 3,9 cm/s. Na tentativa de manter a concentração de partículas igual nos precipitadores, a vazão do gerador de nanopartícula foi variada entre 130 e 295 L/h.

Para entender as diferenças nas concentrações foram levantadas as quedas de pressão em ambos os equipamentos em diferentes velocidades e vazões, utilizando um aparelho para teste de velocidade do ar da TSI, modelo VelociCalc 9596, conectado na entrada e saída do equipamento. Também foi anotado os valores de pressão fornecidos pelo manômetro no início da linha principal, antes dos purificadores de ar.

A diferença no espaçamento entre as placas também afeta o campo elétrico quando se aplica a mesma voltagem. Dessa forma, foi investigado qual parâmetro é mais apropriado na comparação entre dois precipitadores. Nesses testes, foram utilizadas velocidades de 1,9, 2,9 e 3,9 cm/s e vazões no gerador de nanopartículas de 130, 190 e 295 L/h. Nos testes com voltagem, foram utilizados valores de 10, 10,5 e 11 KV, já nos testes de campo elétricos, foram utilizados valores de 3,08, 3,23 e 3,38 KV/cm. A Tabela 2 apresenta um resumo desses testes.

Tabela 2. Experimentos realizados nos testes preliminares com voltagem e campo elétrico

| Testes com voltagem | | | |
|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------|---|
| Precipitador | Voltagem (KV) | Velocidade (cm/s) | Vazão do gerador de nanopartículas (L/h) |
| P.I | 10, 10,5, 11 | 1,9, 2,9 e 3,9 | 130 e 190 |
| P.II | 10, 10,5, 11 | 1,9, 2,9 e 3,9 | 190 e 295 |
| Testes com campo elétrico | | | |
| Precipitador | Campo elétrico (KV/cm) | Velocidade (cm/s) | Vazão do gerador de nanopartículas (L/h) |
| P.I | 3,08, 3,23 e 3,38 | 1,9, 2,9 e 3,9 | 130 e 190 |
| P.II | 3,08, 3,23 e 3,38 | 1,9, 2,9 e 3,9 | 190 e 295 |

Fonte: Autor.

4.3.3. Avaliação da influência do espaçamento entre placas

Os experimentos foram realizados utilizando os dois precipitadores eletrostáticos,

ambos com 3 eletrodos de descarga com diâmetro de 0,4 mm e espaçados por 6 cm. Foram avaliados os espaçamentos entre placas de 4 cm e 6,5 cm. Para isso, foi realizado uma varredura de campo elétricos, utilizando 36 valores diferentes entre 0 e 5,0 KV/cm, conforme Tabela 3. A velocidade do ar utilizada foi de 1,9, 2,9 e 3,9 cm/s, a concentração de nanopartículas foi mantida entre $2,8 \times 10^5$ e $4,8 \times 10^5$ partículas/cm³, a umidade do ar também foi controlada e mantida abaixo de 20% para todos os testes. Cada experimento foi realizado em triplicata.

Tabela 3. Experimentos realizados nos testes de avaliação da influência do espaçamento entre placas

| Espaçamento entre placas (cm) | Velocidade (cm/s) | Campo elétrico (kV/cm) |
|--------------------------------------|--------------------------|---|
| 4 cm | 1,9, 2,9 e 3,9 | 0; 0,50; 1,00; 1,50; 2,00; 2,25; 2,40; 2,50; 2,65; 2,70; 2,80; 2,90; 3,00; 3,10; 3,15; 3,25; 3,40; 3,55; 3,60; 3,70; 3,75; 3,85; 3,95; 4,00; 4,05; 4,15; 4,25; 4,30; 4,40; 4,45; 4,50; 4,60; 4,75; 4,80; 4,85; 5,00 |
| 6,5 | 1,9, 2,9 e 3,9 | 0; 0,50; 1,00; 1,50; 2,00; 2,25; 2,40; 2,50; 2,65; 2,70; 2,80; 2,90; 3,00; 3,10; 3,15; 3,25; 3,40; 3,55; 3,60; 3,70; 3,75; 3,85; 3,95; 4,00; 4,05; 4,15; 4,25; 4,30; 4,40; 4,45; 4,50; 4,60; 4,75; 4,80; 4,85; 5,00 |

Fonte: Autor.

Com o objetivo de verificar a presença de cargas elétricas nas partículas que passavam pelo precipitador eletrostático sem serem coletadas, amostras de aerossol foram coletadas na saída dos precipitadores eletrostáticos e analisadas em um eletrômetro TSI, modelo 3068B, com auxílio da bomba de vácuo GAST 0523-V5424Q-G588DX. O equipamento foi previamente zerado com auxílio de um filtro HEPA em cápsula PALL Gelman Sciences 12144. Para não ocorrer neutralização das cargas, o aerossol amostrado não passou pelo neutralizador de amerício-241 (Am-241). Foram realizadas medições em ambos precipitadores com espaçamentos entre placas de 4 e 6,5 cm, nas velocidades de 1,9, 2,9 e 3,9 cm/s, aplicando voltagens de 5,0 e 8,0. Testes sem aplicação de voltagem (0,0 kV) também foram avaliados e os experimentos realizados em triplicadas, com medições a cada 1 s com duração de 5 minutos.

A partir das correntes elétricas médias obtidas com o eletrômetro, \bar{I} , foi estimada a carga elétrica média das partículas, \bar{q} , de acordo com a Equação 22.

$$\bar{q} = \frac{\bar{I} - I_{HEPA}}{Q_{elet} \bar{C} e} \quad (22)$$

Onde, I_{HEPA} é a corrente elétrica medida pelo equipamento com a presença do filtro HEPA, Q_{elet} é a vazão volumétrica de amostragem do eletrômetro (nesse caso, 0,3 l/min), \bar{C} é a concentração numérica média de partículas presentes no aerossol, e e é a carga elementar, igual a $1,602 \times 10^{-19}$ C. Para a concentração numérica média das partículas, \bar{C} , foi utilizada a média obtida com o SMPS em todos os ensaios ($3,5 \times 10^5$ partículas/cm³).

4.3.4. Avaliação da influência do espaçamento entre fios

Os experimentos foram realizados utilizando os dois precipitadores eletrostáticos, com espaçamento entre placas de 4,5 cm e 6 cm, ambos com 3 eletrodos de descarga de diâmetro de 0,4 mm. Foram avaliados os espaçamentos entre fios de 4 cm, 6 cm e 12 cm. Esses espaçamentos foram escolhidos com base nos trabalhos de Oliveira e Guerra (2018) e Andrade (2020). O procedimento seguiu a metodologia anterior, com uma varredura de campo elétricos, utilizando 22 valores diferentes entre 3,00 e 5,00 KV/cm e velocidade do ar de 1,9, 2,9 e 3,9 cm/s. A Tabela 4 reúne as informações sobre essa etapa experimental.

Tabela 4. Experimentos realizados nos testes de avaliação da influência do espaçamento entre fios

| Espaçamento entre fios (cm) | Velocidade (cm/s) | Campo elétrico (KV/cm) |
|------------------------------------|--------------------------|--|
| 4 | 1,9, 2,9 e 3,9 | 3,00; 3,10; 3,15; 3,20; 3,25; 3,30; 3,35; 3,40; 3,60; 3,85; 4,00; 4,10; 4,20; 4,25; 4,30; 4,35; 4,40; 4,45; 4,50; 4,60; 4,80; 5,00 |
| 6 | 1,9, 2,9 e 3,9 | 3,00; 3,10; 3,15; 3,20; 3,25; 3,30; 3,35; 3,40; 3,60; 3,85; 4,00; 4,10; 4,20; 4,25; 4,30; 4,35; 4,40; 4,45; 4,50; 4,60; 4,80; 5,00 |
| 12 | 1,9, 2,9 e 3,9 | 3,00; 3,10; 3,15; 3,20; 3,25; 3,30; 3,35; 3,40; 3,60; 3,85; 4,00; 4,10; 4,20; 4,25; 4,30; 4,35; 4,40; 4,45; 4,50; 4,60; 4,80; 5,00 |

Fonte: Autor.

A concentração de nanopartículas também foi mantida entre $2,8 \times 10^5$ e $4,8 \times 10^5$ partículas/cm³ e umidade do ar controlada e mantida abaixo de 20% para todos os testes. Cada experimento foi realizado em triplicata.

4.4. Análise estatística

Para avaliação estatística foi realizado um planejamento fatorial com as principais condições operacionais e geométricas de cada etapa desse trabalho. Se utilizou nessa análise apenas dois níveis, limitado pela avaliação de espaçamentos entre placas nos valores de 4 e 6,5 cm. Os valores extremos das velocidades avaliadas nesse estudo foram empregados, ou seja, de 1,9 e 3,9 cm/s. Com base nos resultados obtidos pelas metodologias anteriores, se determinou os valores de campo elétrico adequados para essa etapa.

Foram empregados dois planejamentos fatoriais para avaliação do espaçamento entre placas, velocidade e campo elétrico com dois níveis e três fatores (2^3), considerando todos os testes realizados em triplicadas. Ambos avaliaram os mesmos valores dos fatores, alterando apenas o nível superior e inferior do campo elétrico, como observado na Tabela 5.

Para avaliação estatística da influência do espaçamento entre fios, espaçamento entre placas, velocidade e campo elétrico foi utilizado dois planejamentos fatoriais com dois níveis e quatro fatores (2^4), considerando todos os testes realizados em triplicadas. Ambos avaliaram os mesmos valores dos fatores, alterando apenas o nível inferior do espaçamento entre fios, como observado na Tabela 6.

Tabela 5. Planejamento fatorial para avaliação estatística da influência do espaçamento entre placas, velocidade e campo elétrico

| Fatores | Nível inferior (-1) | Nível superior (+1) |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| Velocidade (cm/s) | 1,9 | 3,9 |
| Campo elétrico (kV/cm) | 3,0 ou 4,0 | 4,0 ou 5,0 |
| Espaçamento entre placas (cm) | 4 | 6,5 |

Fonte: Autor.

Tabela 6. Planejamento fatorial para avaliação estatística da influência do espaçamento entre fios, espaçamento entre placas, velocidade e campo elétrico

| Fatores | Nível inferior (-1) | Nível superior (+1) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Velocidade (cm/s) | 1,9 | 3,9 |
| Campo elétrico (kV/cm) | 3,4 | 4,4 |
| Espaçamento entre placas (cm) | 4 | 6,5 |
| Espaçamento entre fios (cm) | 4 ou 6 | 12 |

Fonte: Autor.

Para verificar a influência dos fatores individuais e suas combinações na variável eficiência global de coleta de nanopartículas foi empregado a análise dos efeitos estimados, do erro padrão e da significância estatística (p-valor). O diagrama de Pareto foi montado para cada planejamento experimental e foi utilizado um intervalo de confiança de 95%. É importante salientar que os efeitos apresentam sinal positivo para o aumento do valor da variável de resposta (eficiência global) e negativo para sua diminuição.

Em seguida, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para comprovar se os modelos utilizados nas análises foram preditivos e se as variáveis apresentaram influência significativa com base no p-valor, valores de F, razão entre a variação entre as médias das amostras e a variação dentro das amostras (ANDRADE, 2020; MONTGOMERY; RUNGER, 2014).

A normalidade dos resíduos foi avaliada pelos gráficos de probabilidade normal dos resíduos a fim de verificar se os erros seguem uma distribuição normal com 95% dos erros padronizados no intervalo entre [-2, +2] (MONTGOMERY; RUNGER, 2014). O modelo também foi avaliado pelos gráficos dos valores observados e preditos para verificar se eles seguiram uma tendência linear e se houve ajuste do modelo aos dados experimentais. Por fim, os modelos foram utilizados para geração das superfícies de resposta para visualizar o comportamento da variável de resposta em função das variáveis independentes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa sessão, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das metodologias evidenciadas anteriormente e agrupadas conforme os subtópicos definidos nos procedimentos experimentais.

5.1. Testes preliminares

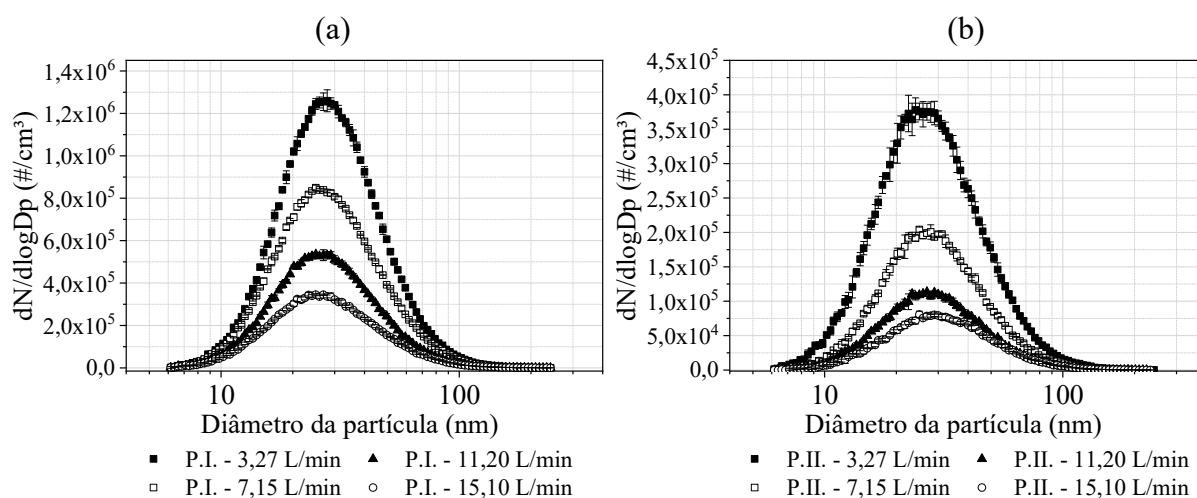
A seguir, será definido as variáveis de comparação entre os precipitadores com geometrias diferentes e as características do aerossol utilizados nos testes para verificar a influência entre os espaçamentos entre fios e espaçamentos entre placas.

5.1.1. Propriedades do aerossol

A verificação das propriedades do aerossol na entrada de cada equipamento avaliado nesse trabalho é importante para garantir uma boa comparação entre eles. Por mais que os trabalhos como de Andrade (2020), Oliveira e Guerra (2018), Yang, Kang e Zhong (2009) e Ning e colaboradores (2016) avaliam a velocidade, eles utilizam apenas um equipamento. Dessa forma, é interessante verificar, dentre vazão ou velocidade, qual é mais apropriado na comparação entre dois precipitadores.

As curvas de distribuição granulométrica do aerossol para os testes que avaliaram a mesma vazão em ambos os precipitadores eletrostáticos e a mesma vazão no gerador de nanopartículas são evidenciadas na Figura 29. Se observa que ocorre a diluição do aerossol ao se aumentar a vazão em ambos os precipitadores. Para o precipitador P.I., a concentração em número de partículas é 30,34%, 56,47% e 71,09% menor nas vazões de 7,15, 11,20 e 15,10 L/min em relação a vazão de 3,27 L/min. Analogamente, para o precipitador P.II., a concentração em número de partículas é 48,99%, 71,53% e 78,99% menor nas vazões de 7,15, 11,20 e 15,10 L/min em relação a vazão de 3,27 L/min.

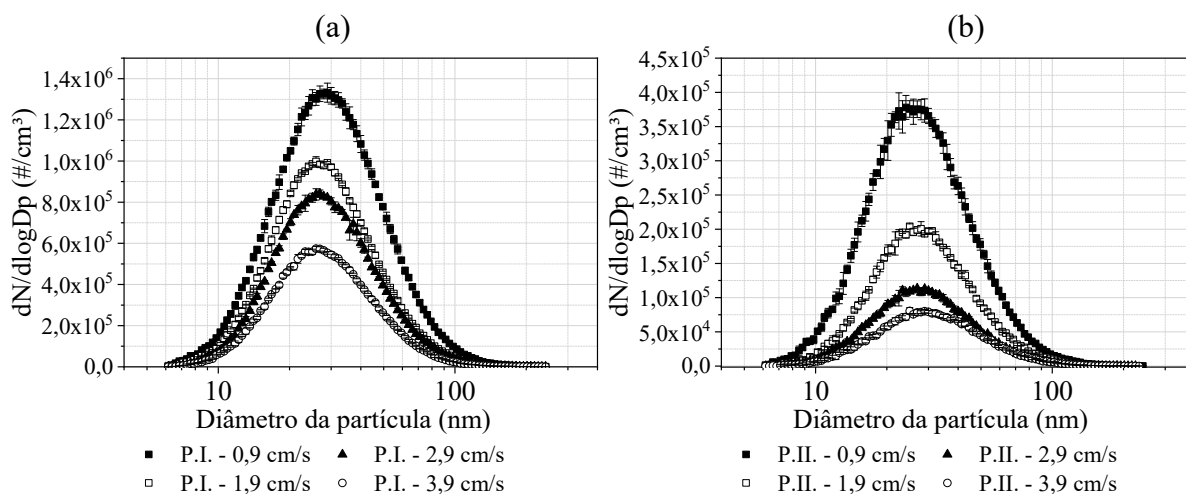
Figura 29. Distribuição granulométrica das nanopartículas na entrada do precipitador eletrostático para diferentes vazões onde: (a) P.I.; (b) P.II.



Fonte: Autor.

As curvas de distribuição granulométrica do aerossol, para os testes que avaliaram a mesma velocidade em ambos os precipitadores eletrostáticos e a mesma vazão no gerador de nanopartículas, estão evidenciadas na Figura 30.

Figura 30. Distribuição granulométrica das nanopartículas de aerossol na entrada do precipitador eletrostático para diferentes velocidades onde: (a) P.I.; (b) P.II.



Fonte: Autor.

Se observa que, de forma similar aos testes com vazão, também ocorre a diluição do

aerossol ao se aumentar a velocidade em ambos os precipitadores. Esses testes foram conduzidos de forma que a velocidade no precipitador P.I. fosse a mesma utilizada no precipitador P.II nos testes com a mesma vazão no gerador. Logo, as mesmas diminuições foram obtidas nesse último (48,99%, 71,53% e 78,99% menor nas velocidades de 1,9, 2,9 e 3,9 cm/s em relação a velocidade de 0,9 cm/s). Para o precipitador P.I., a concentração em número de partículas é 30,62%, 41,98% e 60,63% menor nas velocidades de 1,9, 2,9 e 2,9 cm/s em relação a velocidade de 0,9 cm/s.

Tanto a vazão quanto a velocidade do ar utilizada influenciam diretamente na concentração de partículas. Isso ocorre devido a vazão do gerador de nanopartículas ser a mesma em todos os testes, mas a vazão do ar de diluição ser diferente para atingir os valores desejados. Assim, menores valores de diluição foram obtidos nos testes em que ambos os precipitadores estão na mesma velocidade, principalmente para o precipitador P.I. A presença da diluição do aerossol também foi reportado em outros trabalhos, como os de Andrade (2020), Oliveira (2019), Kim e colaboradores (2010b), Morawska e colaboradores (2002) e Yang e colaboradores (2018b). No trabalho de Andrade (2020), utilizando a mesma concentração da solução para geração de nanopartículas (0,1 g/L), foi observado uma redução de até 60% na concentração do aerossol ao reduzir a velocidade pela metade. Além disso, esse fato comumente é negligenciado em diversos trabalhos, como nos de Kim e colaboradores (2010b), Liu e colaboradores (2016), Yang e colaboradores (2018b) e Zukeran, Sawano e Yasumoto (2019).

Segundo Oliveira e Guerra (2018), para avaliar a velocidade e, conseqüentemente, o tempo de residência das partículas, é importante evitar alterações na concentração das partículas. Isso é interessante porque o aumento da velocidade do gás, a uma taxa fixa de alimentação de particulados, apresenta efeitos na eficiência da coleta que podem estar relacionados não apenas ao tempo de residência, mas também a alterações na concentração dos aerossóis.

Como se observa pela Tabela 7, a umidade nos testes envolvendo as menores vazões e velocidades empregadas nesse estudo foram maiores que 20%. Segundo Nouri e colaboradores (2016), a umidade tem influência na coleta de partículas por precipitação eletrostática, principalmente pela presença de água adsorvida na superfície das partículas interferir na sua condutividade elétrica e coesividade, afetando seu carregamento e coleta. Para minimizar seu efeito foi determinado trabalhar sempre com umidades abaixo de 20%. Logo, tanto a vazão de 3,27 L/min quanto a velocidade de 0,9 cm/s foram evitadas nos demais testes desse estudo.

Tabela 7. Umidade relativa do gás (%) para as condições utilizadas de vazão e velocidade total

| Vazão (L/min) | P.I. | P.II. |
|--------------------------|-------------|--------------|
| 3,27 | 29,6 ± 0,7 | 25,6 ± 0,5 |
| 7,15 | 19,1 ± 0,5 | 14,1 ± 0,6 |
| 11,2 | 17,2 ± 0,3 | 12,5 ± 0,2 |
| 15,1 | 14,4 ± 0,3 | 11,5 ± 0,4 |
| Velocidade (cm/s) | P.I. | P.II. |
| 0,9 | 32,5 ± 0,8 | 25,6 ± 0,5 |
| 1,9 | 18,3 ± 0,3 | 14,1 ± 0,6 |
| 2,9 | 16,0 ± 0,6 | 12,5 ± 0,2 |
| 3,9 | 15,1 ± 0,2 | 11,5 ± 0,4 |

Fonte: Autor.

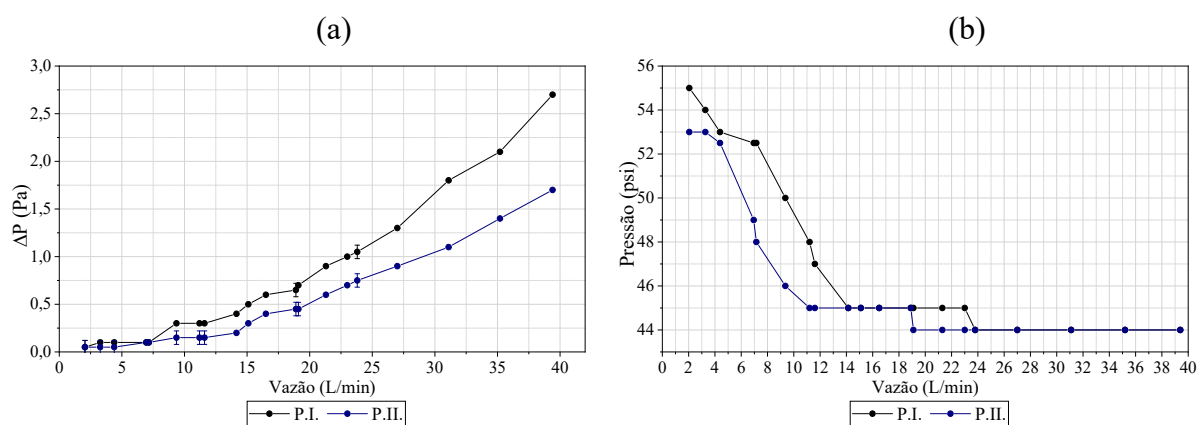
Outro ponto a destacar é a diferença na concentração de nanopartículas em cada precipitador. Nos testes envolvendo a mesma vazão em ambos, o precipitador P.II. apresentou concentrações até 79% menores que o precipitador P.I., na mesma velocidade. Isso não era esperado, já que buscou-se manter igual todas condições, incluindo a mesma vazão do gerador de nanopartículas. Já nos testes envolvendo a mesma velocidade, o precipitador P.II. apresentou concentrações até 86% menores que o precipitador P.I., na mesma velocidade. Por mais que, para se manter a mesma velocidade, foram utilizadas diferentes vazões de ar de diluição, os valores não foram tão diferentes que permitiriam explicar esse fato. Essas diferenças não podem ser associadas as áreas transversais diferentes entre os precipitadores (P.I. e P.II.), pois conforme demonstrado no tópico “4.1.7. Amostragem de partículas”, a amostragem da entrada é realizada na tubulação, em um ponto a 26 cm dos precipitadores.

Para entender melhor essas diferenças, foram levantadas curvas pressão em diferentes velocidades e vazões em ambos os precipitadores. Segundo Oliveira (2019) a contribuição da pressão do ar comprimido do gerador é baixa em relação àquela exercida pelo ar advindo do compressor. Com base nisso, foi levantada a pressão do manômetro no início da linha principal para verificar se existe diferenças na pressão do ar do compressor (Figura 31-b e Figura 32-b). Na Figura 31-a e 32-a são evidenciadas as curvas de queda de pressão utilizando a mesma vazão e velocidade, respectivamente, em ambos os precipitadores.

Observou-se uma queda de pressão muito pequena em ambos os equipamentos, com um maior distanciamento das curvas à medida que se aumenta a velocidade ou vazão. Devido aos pequenos valores, as diferenças das concentrações não podem ser associadas a queda de

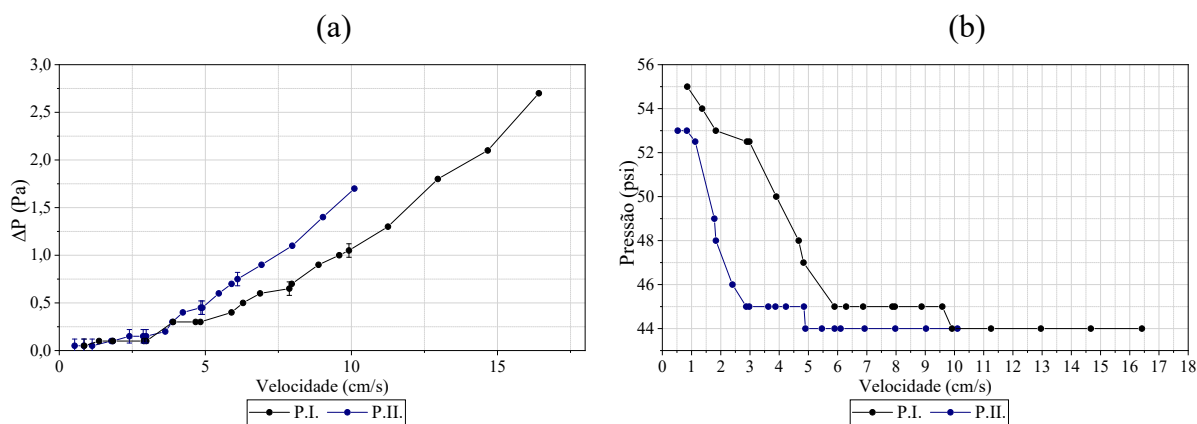
pressão. No entanto, a pressão no início da linha, do ar advindo do compressor, apresentou diferenças significativas. O compressor ajusta a pressão de acordo com a necessária para fornecer a vazão desejada de ar. Para fornecer a mesma vazão ou velocidade, o compressor forneceu ar com uma pressão maior para o precipitador P.I. do que para o precipitador P.II. Foi levantado a hipótese que o gerador de nanopartículas, para conseguir superar a pressão na linha principal, acaba fornecendo um aerossol em uma maior pressão, o que acarreta em uma maior concentração do aerossol na entrada. Devido a isso, a umidade ao se utilizar esse equipamento se mostrou maior que a umidade do precipitador P.II., como evidenciado na Tabela 7.

Figura 31. Curvas pressão em diferentes vazões onde: (a) queda de pressão; (b) pressão manométrica no início da linha principal.



Fonte: Autor.

Figura 32. Curvas pressão em diferentes velocidades onde: (a) queda de pressão; (b) pressão manométrica no início da linha principal.



Fonte: Autor.

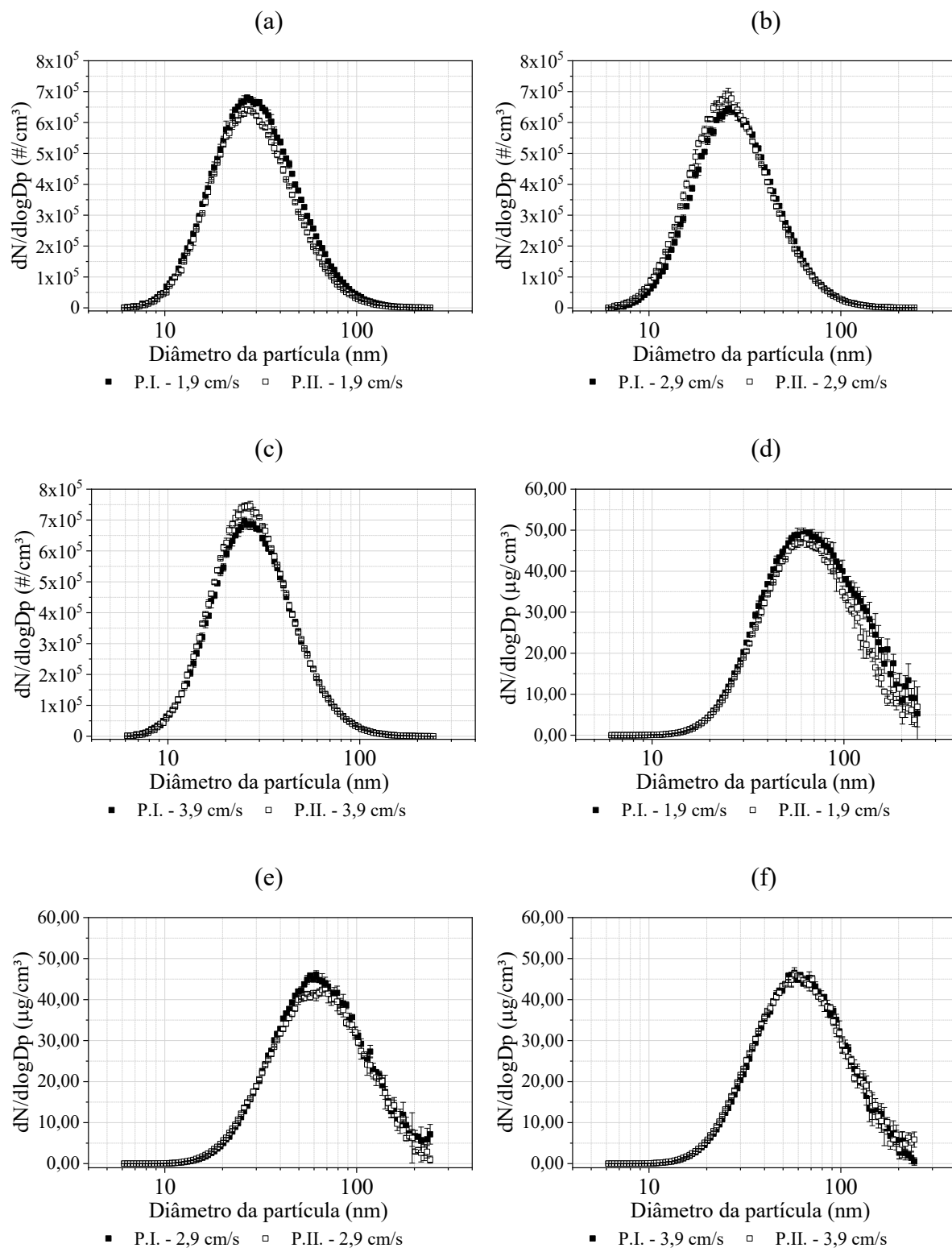
A metodologia sugerida por Oliveira e Guerra (2018) pode ser utilizada não somente para avaliar separadamente o tempo de residência, mas também para isolar o efeito de concentrações diferentes do aerossol na avaliação de dois precipitadores. Dessa forma, foram realizadas tentativas de se manter semelhante as concentrações de nanopartículas na entrada de ambos os precipitadores eletrostático, independente da vazão ou velocidade utilizadas. Foi observado, que os testes utilizando a mesma vazão em ambos os precipitadores se mostraram mais difíceis de manter a mesma concentração, além de que o aumento da vazão do gerador de nanopartículas acima de 290 L/h, proporcionou umidades acima de 20% na vazão de 7,15 L/min. Já os testes utilizando a mesma velocidade em ambos os precipitadores apresentaram uma maior facilidade em se obter a mesma concentração nos equipamentos.

Dessa forma, a velocidade foi escolhida como parâmetro de comparação entre os dois equipamentos, tanto por manter a mesma fluidodinâmica em ambos os precipitadores, como por evitar inconvenientes operacionais. As Figuras 33-a-b-c apresenta as distribuições granulométricas de ambos os precipitadores nas velocidades de 1,9, 2,9 e 3,9 cm/s. Como pode ser observado, as curvas apresentaram um comportamento muito semelhante, que pode ser comprovado a partir dos dados das concentrações em número de partículas, medianas e desvios padrões geométricos (σ) expostos na Tabela 8. O material particulado disperso no aerossol apresentou pequenas diferenças na mediana de no máximo 4 nm. Verificou-se diferenças de até 1 nm entre os precipitadores na mesma velocidade. Distribuições semelhantes foram obtidas, como se observa pelo desvio padrão geométrico com valores similares.

Além de avaliar a distribuição granulométrica por número de partículas também foi obtida as curvas em unidades mássicas para ambos os precipitadores nas velocidades de 1,9, 2,9 e 3,9 cm/s, evidenciadas nas Figuras 33-d-e-f. O comportamento semelhante entre as curvas se mantém e pode ser comprovado a partir dos dados das concentrações mássicas, medianas e desvios padrões geométricos (σ) expostos na Tabela 9. As diferenças em relação a distribuição por número de partículas se devem ao fato de partículas maiores apresentarem maior massa.

Em todos os testes, a maioria das partículas possuíam mediana próximas (entre 60 e 70 nm) e distribuições semelhantes, com desvio padrão geométrico em torno de 1,70. Nessa faixa de tamanho, o carregamento por difusão é preponderante e está ligado ao movimento browniano, que se intensifica com a diminuição do tamanho da partícula (ALONSO; ALGUACIL, 2002).

Figura 33. Distribuição granulométrica das nanopartículas na entrada do precipitador eletrostático nas velocidades de (a) 1,9 cm/s (em número); (b) 2,9 cm/s (em número); (c) 3,9 cm/s; (d) 1,9 cm/s (em massa); (e) 2,9 cm/s (em massa); (f) 3,9 cm/s (em massa).



Fonte: Autor.

Tabela 8. Concentração em número de partículas, mediana e desvio padrão geométrico (σ) da distribuição granulométrica de nanopartículas na entrada dos precipitadores em diferentes velocidades

| Velocidade: 1,9 cm/s | | |
|--|---------------|---------------|
| Parâmetros | P.I. | P.II |
| Concentração (partículas/cm ³) | 371894 ± 5363 | 334781 ± 1892 |
| Mediana (nm) | 29,03 ± 0,14 | 28,18 ± 0,03 |
| σ (nm) | 1,65 ± 0,00 | 1,62 ± 0,002 |
| Velocidade: 2,9 cm/s | | |
| Parâmetros | P.I. | P.II |
| Concentração (partículas/cm ³) | 336092 ± 2539 | 354751 ± 4259 |
| Mediana (nm) | 27,68 ± 0,33 | 26,26 ± 0,02 |
| σ (nm) | 1,62 ± 0,003 | 1,63 ± 0,002 |
| Velocidade: 3,9 cm/s | | |
| Parâmetros | P.I. | P.II |
| Concentração (partículas/cm ³) | 359754 ± 2339 | 378032±2317 |
| Mediana (nm) | 27,29 ± 0,03 | 26,92 ± 0,05 |
| σ (nm) | 1,62 ± 0,00 | 1,61 ± 0,002 |

Fonte: Autor.

Tabela 9. Concentração mássica de partículas, mediana e desvio padrão geométrico (σ) da distribuição granulométrica de nanopartículas na entrada dos precipitadores em diferentes velocidades

| Velocidade: 1,9 cm/s | | |
|--|--------------|--------------|
| Parâmetros | P.I. | P.II |
| Concentração (partículas/cm ³) | 27,12 ± 0,08 | 28,90 ± 0,18 |
| Mediana (nm) | 68,39 ± 0,33 | 64,19 ± 0,23 |
| σ (nm) | 1,72 ± 0,006 | 1,72 ± 0,009 |
| Velocidade: 2,9 cm/s | | |
| Parâmetros | P.I. | P.II |
| Concentração (partículas/cm ³) | 27,64 ± 0,21 | 26,25 ± 0,06 |
| Mediana (nm) | 63,24 ± 0,33 | 62,59 ± 0,50 |
| σ (nm) | 1,73 ± 0,005 | 1,72 ± 0,009 |
| Velocidade: 3,9 cm/s | | |
| Parâmetros | P.I. | P.II |
| Concentração (partículas/cm ³) | 27,51 ± 0,16 | 27,97 ± 0,13 |
| Mediana (nm) | 61,18 ± 0,35 | 60,88 ± 0,14 |
| σ (nm) | 1,70 ± 0,003 | 1,73 ± 0,006 |

Fonte: Autor.

De forma geral, na precipitação eletrostática, a descarga corona, criada pelos eletrodos de descarga, carrega as partículas suspensas no ar, distorce sua trajetória com o campo elétrico induzido em direção ao eletrodo de coleta e as intercepta na placa coletora (HE; DASS, 2018). No entanto, no caso do carregamento por difusão, o campo elétrico não é o fator predominante na coleta, apesar de auxiliar no carregamento das partículas. Nesse caso, as partículas dependem principalmente das colisões randômicas oriundas do processo de difusão, que se torna mais difícil para partículas da ordem nanométrica (ANDRADE, 2020; WHITE, 1963).

Um ponto importante a destacar é que por mais que se buscou manter as concentrações próximas em todos os testes, se observou variações nos valores dependendo de variáveis que não foram possíveis controlar, como a temperatura ambiente, umidade e o próprio gerador de nanopartículas. Com isso, nesse estudo foram aceitadas variações de até 40% entre os testes, mantendo a concentração em número de partículas entre $2,8 \times 10^5$ e $4,8 \times 10^5$ partículas/cm³ e concentrações mássicas entre 26 e 43 µg/m³.

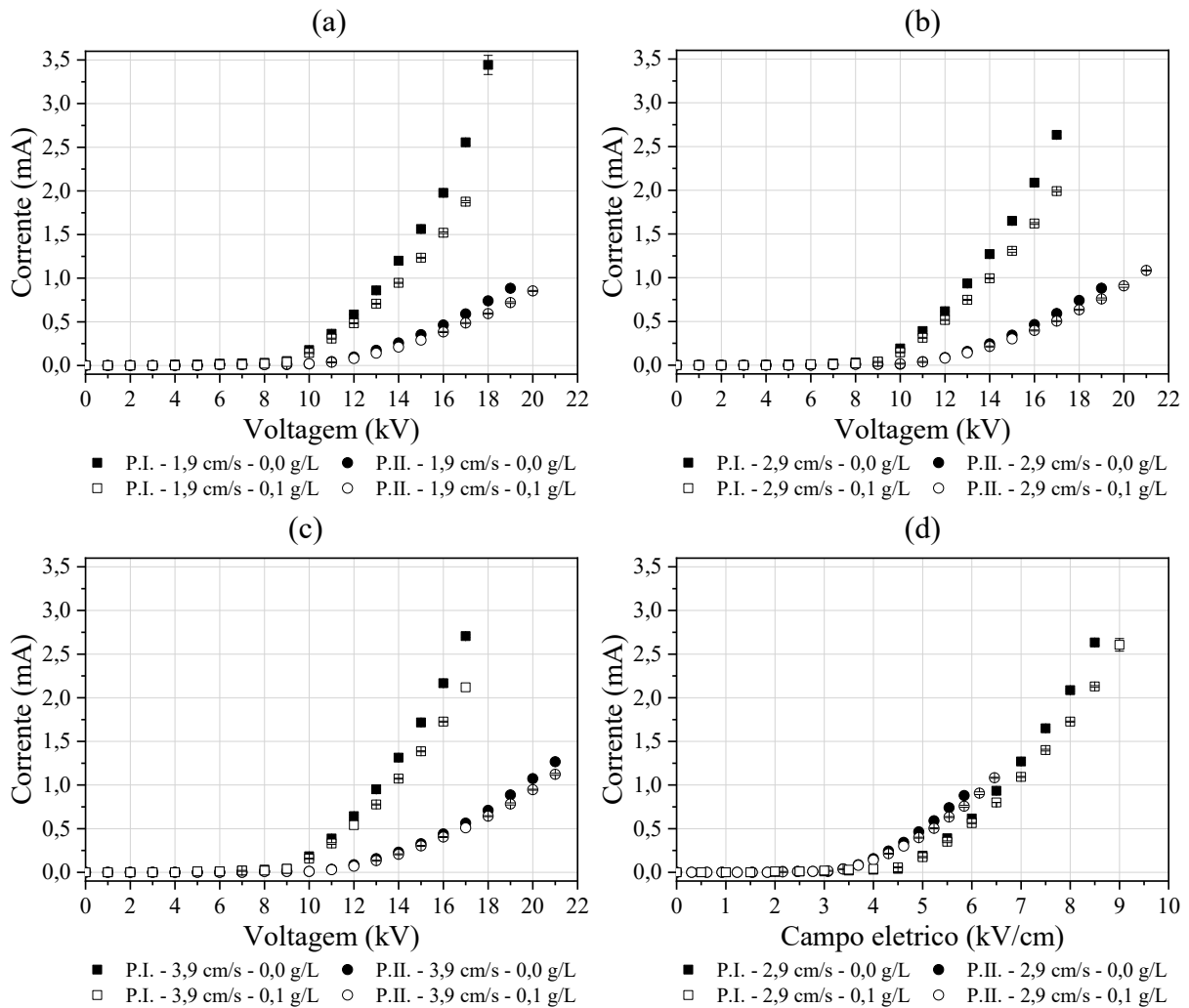
5.1.2. Parâmetros elétricos

As curvas corrente-tensão obtidas para cada equipamento em diferentes velocidades estão mostradas na Figura 34. Deve-se salientar que esses testes foram conduzidos utilizando 5 eletrodos de descarga. A Figura 34-d demonstra os mesmos dados da velocidade intermediária de 2,9 cm/s na forma de corrente por campo elétrico. As discussões referentes aos diferentes espaçamentos entre placas serão realizadas no tópico “5.2. Avaliação da influência do espaçamento entre placas”, específico para esse fato. No presente momento será avaliado apenas a questão do parâmetro adequado para avaliar os dois equipamentos.

Conforme esperado, todas as curvas apresentaram um aumento da corrente com o aumento da voltagem aplicada, assim como reportado nos trabalhos de Kherbouche e colaboradores (2016), Kim e colaboradores (2017) e Nouri e colaboradores (2016). Além disso, a variação da velocidade alterou minimamente os valores de corrente obtidos. No entanto, pode-se verificar que o aumento da velocidade do gás de 1,9 cm/s para 3,9 cm/s aumentou a corrente corona, sendo que o aumento da corrente entre 2,9 cm/s para 3,9 cm/s foi sutil. Na literatura, é relatada a redução da corrente com aumento da velocidade (MORAWSKA *et al.*, 2002; ZHUANG *et al.*, 2000), associando esse fato a redução do tempo de residência dos íons

formados, diminuindo o tempo para que estes atinjam as placas coletoras.

Figura 34. Curvas corrente-tensão para diferentes velocidades onde: (a) 1,9 cm/s; (b) 2,9 cm/s; (c) 3,9 cm/s; (d) 2,9 cm/s (corrente-campo elétrico).



Fonte: Autor.

No entanto, conforme relatado por Oliveira e Guerra (2018), é possível que houvesse tempo de residência suficiente para que as partículas fossem carregadas e coletadas pelas placas, ocasionando a proeminência da influência do fluxo secundário ou vento iônico. Conforme evidenciado na Tabela 10, próximo ao início da corona, onde a fonte de alta tensão detectou correntes de 0,01 mA, os valores da razão N_{EHD}/Re^2 é maior que 1, indicando uma forte influência do fluxo secundário ou vento iônico (PODLÍNSKI *et al.*, 2006). Dessa forma, a força elétrica é preponderante em relação às outras forças, ou seja, uma predominância de influência da força elétrica sobre o padrão de fluxo em relação às forças viscosas e inerciais. Além disso,

verificou-se que o aumento da velocidade do gás proporcionou uma diminuição nos valores dessa razão. A ocorrência desse fenômeno era esperada, pois o aumento da velocidade, mesmo em velocidades baixas, proporciona um aumento no número de Reynolds e diminui a influência do vento iônico (FUJISHIMA *et al.*, 2006). No entanto, os valores continuam altos o suficiente para manter uma forte influência do campo elétrico a despeito de variações na velocidade (OLIVEIRA; GUERRA, 2018).

Tabela 10. Voltagem e corrente de início da corona e relação entre número eletrohidrodinâmico e número de Reynolds (N_{EHD}/Re^2)

| Precipitador | Velocidade (cm/s) | Voltagem (kV) | Corrente (mA) | N_{EHD}/Re^2 |
|--------------|-------------------|---------------|---------------|----------------|
| P.I. | 1,9 | 8,0 | 0,01 | 73,28 |
| | 2,9 | 8,0 | 0,01 | 31,45 |
| | 3,9 | 8,0 | 0,01 | 17,39 |
| P.II. | 1,9 | 11,0 | 0,01 | 119,08 |
| | 2,9 | 11,0 | 0,01 | 51,12 |
| | 3,9 | 11,0 | 0,01 | 28,26 |

Fonte: Autor.

Outro ponto a destacar é o comportamento dos dados quando plotados por corrente-tensão ou corrente-campo elétrico, dados nas Figuras 34-b e 34-d, respectivamente. Observa-se uma diferença significativa entre os precipitadores no primeiro gráfico e as curvas semelhantes no segundo. Além disso, deve-se salientar que em uma mesma voltagem ambos os precipitadores apresentam diferentes campos elétricos, causados pelos diferentes espaçamentos entre placas. Tentando diminuir a influência de variáveis na comparação entre os precipitadores, se adotou o campo elétrico como variável nesse estudo.

5.1.3. Testes de eficiência de coleta

Mesmo entendendo que o campo elétrico é o parâmetro mais apropriado na comparação entre os precipitadores, testes de eficiência foram conduzidos utilizando o mesmo campo elétrico e a mesma voltagem em ambos os equipamentos buscando entender como cada variável

afeta o processo e as diferenças que ocorrem na coleta de nanopartículas.

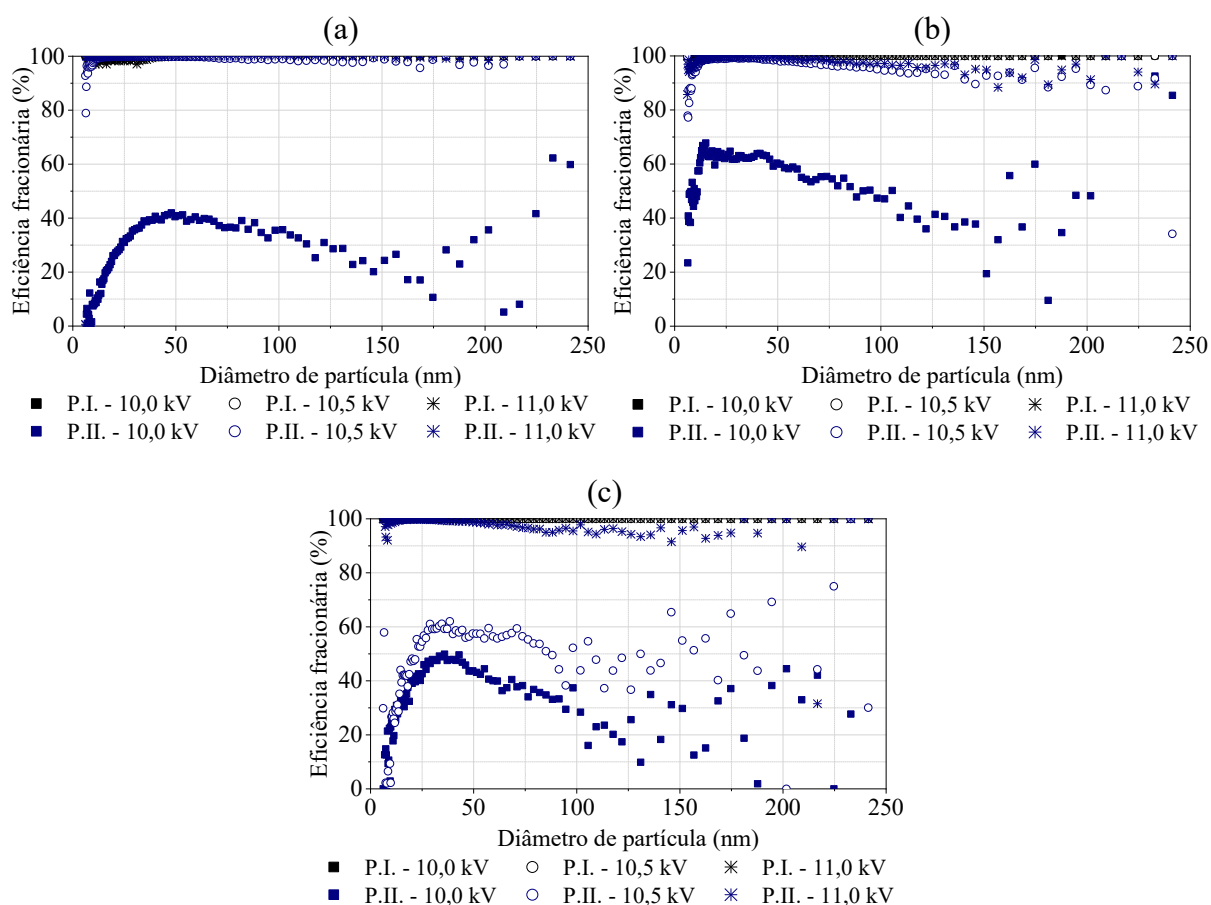
Foram escolhidos valores de voltagem de 10,0 kV, 10,5 kV e 11,0 kV e campos elétricos de 3,08 kV/cm, 3,23 kV/cm e 3,38 kV/cm, também utilizados no trabalho de Andrade (2020). Esses valores foram determinados com base nas curvas corrente-tensão do precipitador P.II. e corresponde ao início da corona para esse equipamento, região bastante instável onde pequenas alterações nas condições operacionais modificam significativamente as curvas de eficiência de coleta. Valores mais altos que esses tenderiam a eficiência a valores acima de 90% e as variações não poderiam ser associadas unicamente a influência dos parâmetros, mas também a erros experimentais.

A Figuras 35 apresenta as curvas de eficiência fracionária correspondentes aos testes onde se aplicou a mesma voltagem em diferentes velocidades. Se observa que independente da voltagem aplicada, o precipitador P.I. apresentou elevada eficiência, acima de 99%, em todas as velocidades. Já para o precipitador P.II., o aumento da voltagem aplicada ao precipitador eletrostático aumentou significativamente a eficiência de coleta. Entretanto, aumentos menos significativos foram observados nas voltagens de 10,5 e 11 kV, nas velocidades de 1,9 e 2,9 cm/s.

À medida que se aumenta a voltagem, favorece o carregamento das partículas e sua coleta pelas placas coletoras. No entanto, partir de certo valor, a voltagem já está suficientemente forte para garantir um bom carregamento e eficiência nas coletas. Para todos as voltagens aplicadas, há uma queda na eficiência para diâmetros de partículas maiores que 125 nm, sendo mais evidente quanto menor a voltagem aplicada. Isso foi atribuído à intensidade da tensão não ser forte o suficiente para promover o carregamento de partículas, devido à baixa mobilidade elétrica e baixo número de cargas adquiridas pelas partículas nessa faixa (OLIVEIRA; GUERRA, 2018). Além disso, as tendências das curvas também demonstram o efeito da força elétrica na eficiência da coleta. De fato, as maiores relações entre o número eletro-hidrodinâmico e o número de Reynolds ocorrem na maior tensão utilizada, as quais permitiram uma maior coleta de partículas nessa faixa.

Um ponto de máxima eficiência foi observado em torno de 40 nm, principalmente nas menores voltagens aplicadas. Isso ocorre devido a carência do carregamento dessas partículas muito pequenas (<40 nm) (ZHUANG *et al.*, 2000), pelo balanço entre a mobilidade elétrica e o número de cargas adquiridas não favorecer a coleta, melhor explicado posteriormente.

Figura 35. Eficiência fracionária para ambos os precipitadores em diferentes voltagens nas velocidades de: (a) 1,09 cm/s, (b) 2,09 cm/s e (c) 3,09 cm/s.



Fonte: Autor.

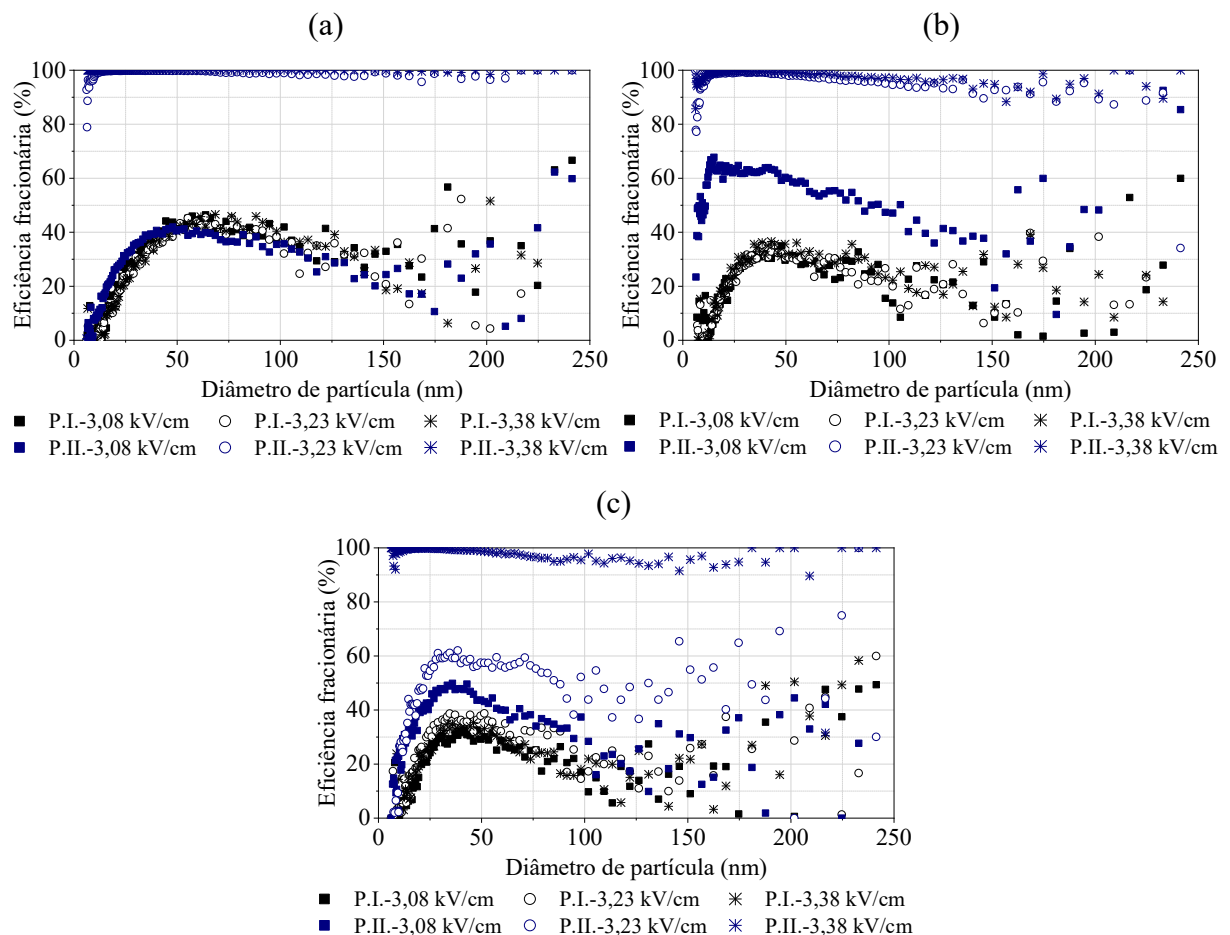
Além disso, houve uma redução da remoção de nanopartículas com o aumento da velocidade, principalmente para maiores diâmetros. Entretanto, eficiências maiores foram obtidas para partículas menores que 50 nm à medida que se aumentou a velocidade de 1,9 para 2,9 cm/s. Esse fenômeno foi mais evidente na menor voltagem aplicada (10 kV) e também foi observado por Oliveira e Guerra (2018). Nesse trabalho, os autores associaram esse aumento com a relação entre o tamanho da partícula e a quantidade de cargas adquiridas. Com a diminuição do tempo de residência, a velocidade do gás proporciona uma maior energia as partículas e se torna relevante nessa faixa de tamanho.

Um ponto importante a ser destacado é que o carregamento por difusão é preponderante para partículas menores que 100 nm. Dessa forma, existe a possibilidade do aumento das colisões e outras perturbações que também acarretam colisões randômicas aumentarem com o

aumento da velocidade. Já para partículas maiores que 100 nm isso não ocorre ou ocorre de forma bem menos intensa, levando a explicação anterior sobre mobilidade elétrica e cargas adquiridas.

A Figura 36 apresenta as curvas de eficiência fracionária correspondentes aos testes onde se aplicou o mesmo campo elétrico em diferentes velocidades. Um comportamento oposto é obtido para o precipitador P.I. em relação aos testes anteriores. Verifica-se que independente do campo elétrico aplicado, baixas eficiências foram obtidas, em todas as velocidades. Além disso, as curvas de eficiência fracionária são bastantes semelhantes, com eficiências globais em todos os testes ser em torno de 25%. Para o precipitador P.II. as explicações anteriores ainda se aplicam.

Figura 36. Eficiência fracionária para ambos os precipitadores em diferentes campos elétricos nas velocidades de: (a) 1,09 cm/s, (b) 2,09 cm/s e (c) 3,09 cm/s.



Fonte: Autor.

Como cada equipamento apresenta um espaçamento entre placas e isso influencia diretamente no campo elétrico aplicado, se torna complicado estabelecer valores específicos para determinar a influência desse parâmetro geométrico. Nos testes envolvendo a mesma voltagem, o precipitador P.I. se mostrou muito eficiente, podendo inferir que o menor espaçamento entre placas favorece a coleta de nanopartículas. No entanto, nos testes envolvendo o mesmo campo elétrico, o precipitador P.I. não se mostrou eficiente e poderia levar a conclusão que espaçamentos maiores favorecem o processo.

Devido a dualidade das informações obtidas e a fim de evitar conclusões errôneas a respeito da influência do espaçamento entre placas, foi realizado uma varredura com diversos valores de campo elétrico. Isso permite tirar conclusões mais precisas na comparação entre os equipamentos e verificar como se comporta a eficiência de coleta de nanopartículas em diferentes espaçamentos entre placas.

5.2. Avaliação da influência do espaçamento entre placas

Nessa subseção serão apresentados os resultados dos testes de avaliação do espaçamento entre placas, onde serão discutidas as características das curvas corrente-tensão, o comportamento do número eletro-hidrodinâmico e os resultados das eficiências de coleta.

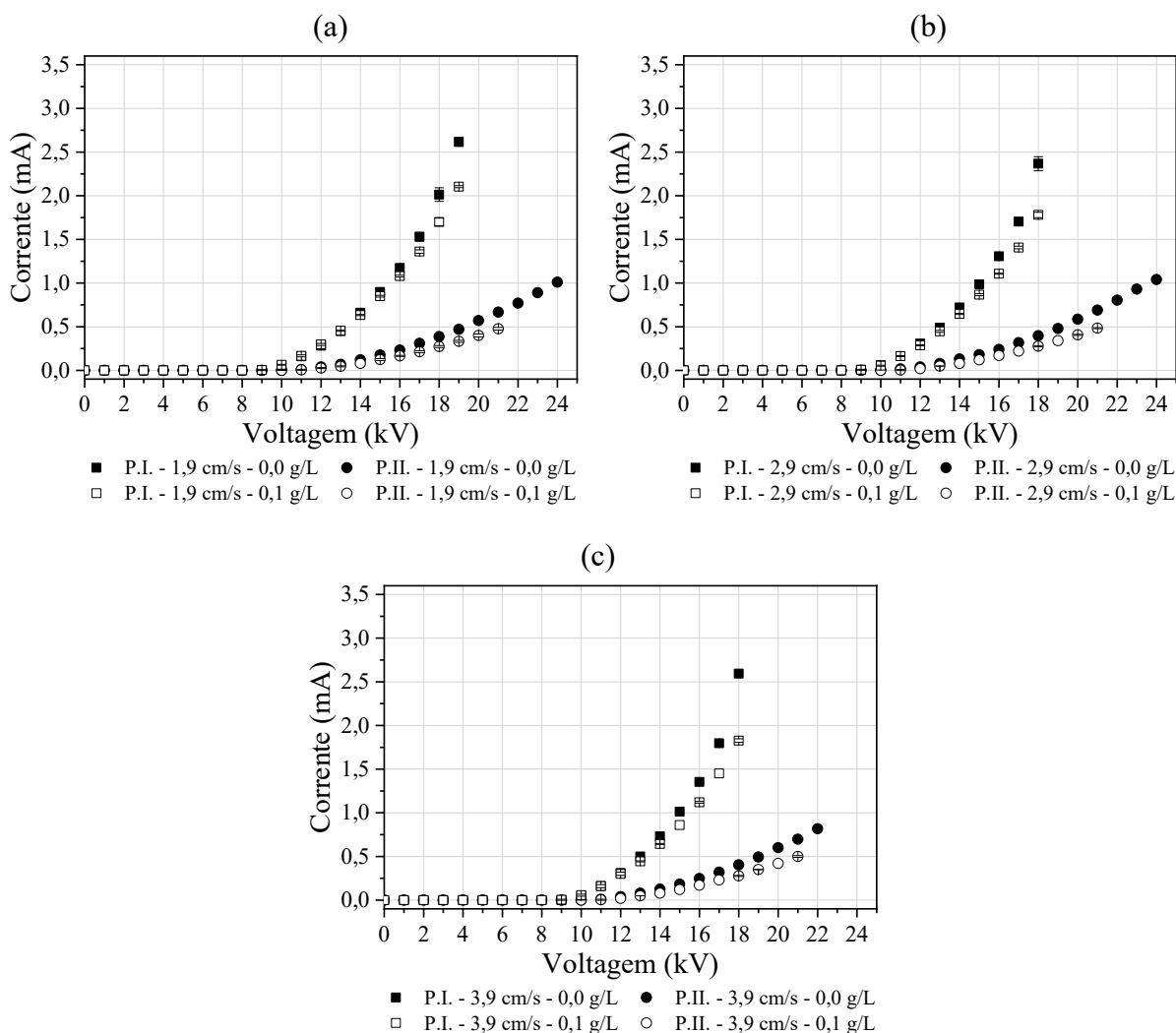
5.2.1. Curvas corrente-tensão

As curvas corrente-tensão obtidas para cada espaçamento entre placas (4 e 6 cm) em diferentes velocidades estão mostradas na Figura 37. Deve-se salientar que esses testes foram conduzidos utilizando 3 eletrodos de descarga com espaçamento de 6 cm.

O mesmo comportamento apresentado anteriormente foi obtido, ou seja, ocorre um aumento da corrente com o aumento da voltagem aplicada. Verifica-se que uma corrente maior é obtida quando se utiliza o precipitador com menor espaçamento entre placas (P.I., 4 cm). De fato, Oliveira e Guerra (2018) utilizaram um precipitador com espaçamento de 4 cm e também obtiveram correntes acima de 1 mA, enquanto Andrade (2020) utilizou um precipitador com espaçamento de 6,5 cm e também obteve correntes abaixo de 1 mA. No entanto, ao se avaliar

pelo campo elétrico, o precipitador P.II. apresentou uma maior corrente, assim como demonstrado por Najafabadi e colaboradores (2014).

Figura 37. Curvas corrente-tensão para diferentes espaçamentos entre placas e nas velocidades de: (a) 1,9 cm/s; (b) 2,9 cm/s; (c) 3,9 cm/s.



Fonte: Autor.

O aumento do espaçamento entre placas aumentou a voltagem de início da corona, sendo de 9 kV ao se utilizar o espaçamento de 4 cm (P.I.) e de 11 kV ao se utilizar o espaçamento de 6,5 cm (P.II.). Esse fato corrobora com os trabalhos de Najafabadi e colaboradores (2014) e El Dein e Usama (2014), que também observaram essa alteração. Outro ponto é o aumento da voltagem em que ocorre a ruptura dielétrica do ar com o aumento do espaçamento, também observado nos trabalhos desses autores. Isso ocorre porque o aumento do espaçamento diminui

a resultante do campo elétrico ao longo das linhas de fluxo, entre os fios e placas, com a diminuição subsequente da corrente corona sob a mesma tensão aplicada.

A presença de partículas no aerossol ocasionou uma diminuição na corrente obtida em todas as voltagens, devido a diminuição da corrente corona pelo efeito da carga espacial das partículas, devido a probabilidade de colisão entre elas e os íons (WHITE, 1963; ZHUANG *et al.*, 2000). No entanto, ao se utilizar o espaçamento de 6,5 cm, a presença de nanopartículas diminuiu a voltagem em que ocorreu a ruptura dielétrica cerca de 3 kV nas velocidades de 1,9 e 2,9 cm/s e de 1 kV na velocidade de 3,9 cm/s.

A variação da velocidade alterou minimamente os valores de corrente obtidos. No entanto, pode-se verificar que o aumento da velocidade do gás de 1,9 cm/s para 3,9 cm/s aumentou a corrente corona, sendo que o aumento da corrente entre 2,9 cm/s para 3,9 cm/s foi muito pequeno. Na literatura, é relatada a redução da corrente com aumento da velocidade é relatada na literatura (MORAWSKA *et al.*, 2002; ZHUANG *et al.*, 2000), associando esse fato a redução do tempo de residência dos íons formados, diminuindo o tempo para que estes atinjam as placas coletoras. Segundo Oliveira e Guerra (2018), com a corrente de 0,01 mA, havia uma grande disponibilidade de íons para o carregamento das partículas, favorecendo o carregamento por difusão.

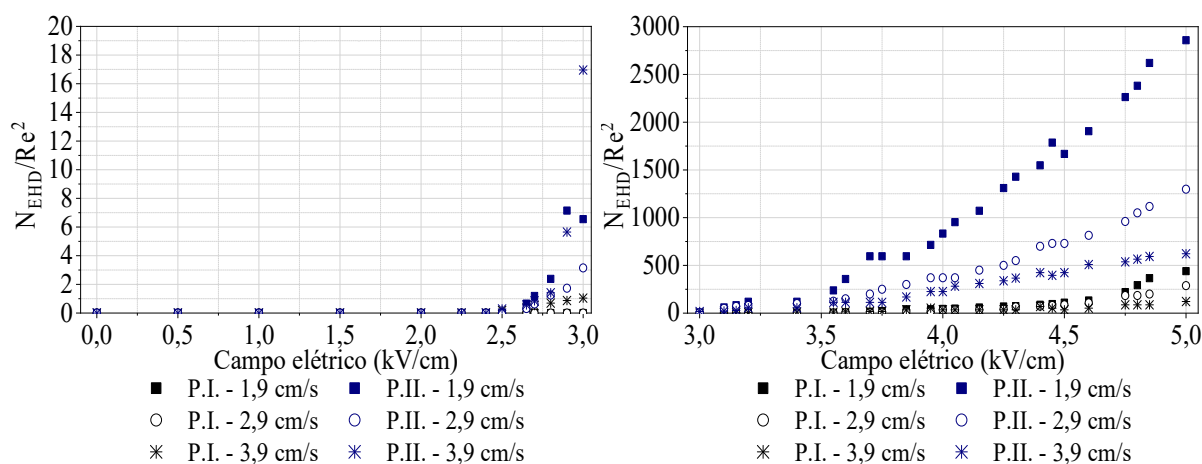
Também com base nas curvas corrente-tensão, o aumento da velocidade apresentou pequenos aumentos na corrente, assim como observado nos Testes Preliminares. A explicação se mantém a mesma, ou seja, tempo de residência suficiente para que as partículas fossem carregadas e coletadas pelas placas, proeminência da influência do fluxo secundário ou vento iônico de forma que o campo elétrico exerceu forte influência em relação as variações na velocidade (FUJISHIMA *et al.*, 2006; OLIVEIRA; GUERRA, 2018). Segundo Kim e colaboradores (2010a) e Zhuang e colaboradores (2000), campos elétricos de 4 kV/cm são suficiente para coletar nanopartículas com moderada eficiência. Nesse trabalho esse fato foi observado nos Testes de Eficiência de Coleta que esse campo é obtido quando se aplicam voltagens de 8,0 kV para precipitadores com espaçamento de 4 cm e 13 kV para o espaçamento de 6,5 cm, o considerando pseudo-homogêneo.

5.2.2. Número eletro-hidrodinâmico

Para verificar a influência do fluxo primário ou secundário no processo, o valor do N_{EHD}/Re^2 foi calculado de acordo com as Equações 20 e 21 e apresentado na Figura 38. Deve-se notar que para precipitadores eletrostáticos do tipo placa-fio, valores superiores a 1 indicam uma forte influência do fluxo secundário ou vento iônico (PODLIŃSKI *et al.*, 2006). Os valores de corrente abaixo de 0,01 mA foram estimados pelo ajuste da curva dado pela Equação 17.

Como se observa pela Figura 38, a partir do início da corona, os valores dessa razão são muito maiores que 1, o que significa que a força elétrica é altamente suficiente em relação às outras forças, ou seja, uma predominância de influência da força elétrica sobre o padrão de fluxo em relação às forças viscosas e inerciais.

Figura 38. Valores de N_{EHD}/Re^2 para diferentes espaçamentos entre placas e velocidades onde: (a) campos elétricos até 3,0 kV/cm; (b) campos elétricos entre 3,0 e 5,0 kV/cm.



Fonte: Autor.

Verificou-se que o aumento da velocidade do gás proporcionou uma diminuição nos valores dessa razão. A ocorrência desse fenômeno era esperada, pois o aumento da velocidade, mesmo em velocidades baixas, proporciona um aumento no número de Reynolds e diminui a influência do vento iônico (FUJISHIMA *et al.*, 2006). Além disso, houve um aumento considerável com o aumento da tensão aplicada, devido ao maior campo elétrico entre os

eletrodos de descarga e coleta, causando maior formação de vórtice e turbulência devido à influência do campo elétrico no padrão de fluxo (CHUN *et al.*, 2007; NING *et al.*, 2016).

Analisando o comportamento do N_{EHD}/Re^2 em relação ao espaçamento entre placas, verifica-se que, espaçamentos maiores proporcionam maiores valores dessa razão em um mesmo campo elétrico e velocidade. De fato, como demonstrado, espaçamentos maiores fornecem maiores valores de corrente, o que aumenta o valor de N_{EHD} . Além disso, N_{EHD} é influenciado ao cubo pelo espaçamento, enquanto o número de Reynolds é diretamente proporcional. Logo, espaçamentos maiores aumentam N_{EHD} e Re^2 , ou seja, variar essa geometria aumenta a influência das forças elétricas e altera a direção e velocidade do fluxo. Partículas muito finas e submicrométricas tendem a seguir as linhas de fluxo quando não é turbulento. Porém, com o aumento da turbulência causada pelo vento iônico, as partículas têm potencial para se mover aleatoriamente, levando a uma menor possibilidade de seguir o fluxo original, favorecendo o carregamento por difusão e sua coleta (NING *et al.*, 2016).

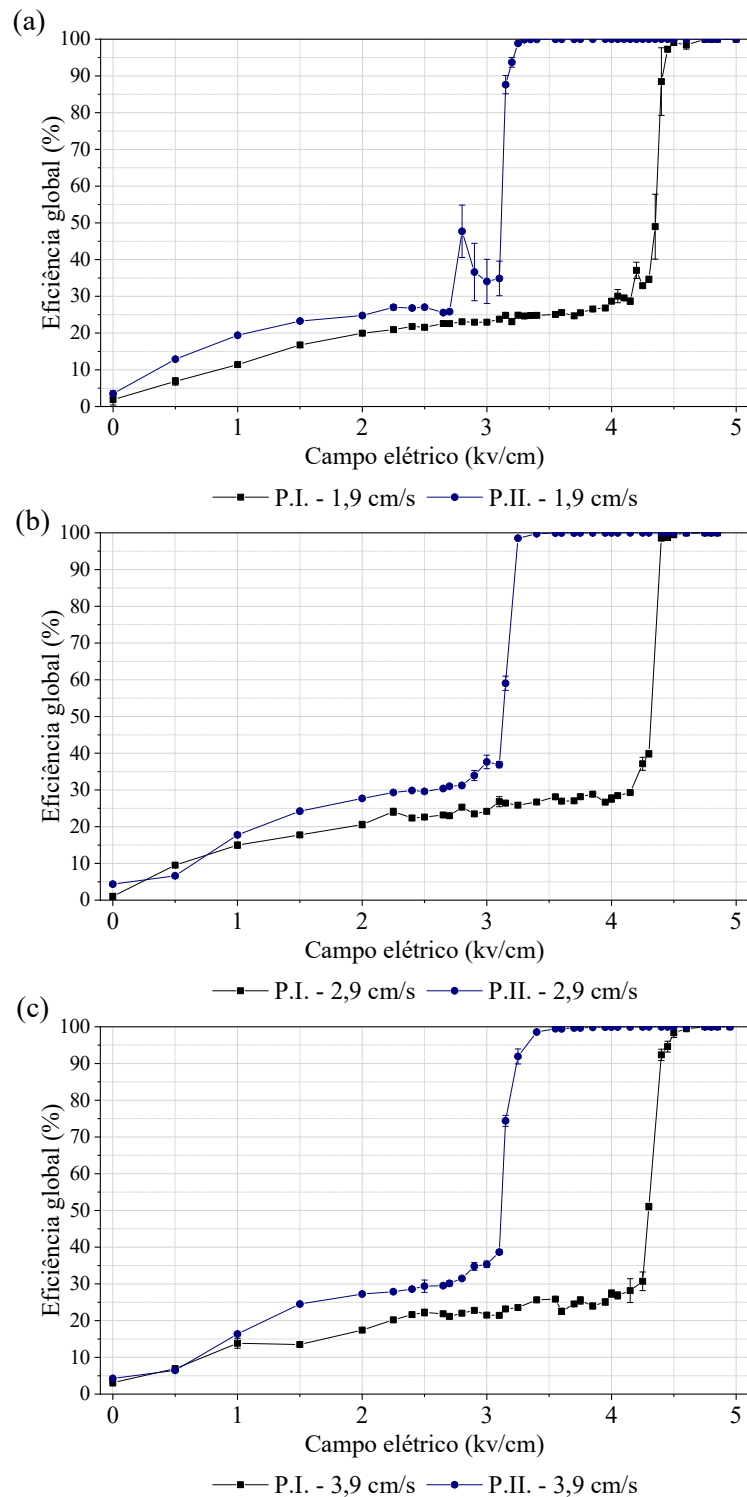
Maiores diferenças nas curvas, para diferentes velocidades, foram obtidas ao se utilizar o precipitador com espaçamento de 6,5 cm (P.II.), principalmente em maiores campos elétricos. Isso ocorre porque um maior espaçamento afeta diretamente o tempo de residência das partículas no interior do equipamento, que juntamente com o campo favorece o seu carregamento. No caso do precipitador mais espaçado, isso tende a diminuir a influência do fluxo primário e favorece o secundário.

5.2.3. Testes de eficiência de coleta

Com o intuito de verificar o comportamento da eficiência de coleta com a variação do campo elétrico e velocidade, foram levantadas curvas para os espaçamentos entre placas de 4 e 6,5 cm, apresentadas na Figura 39. As curvas apresentaram um comportamento sigmoide, com a maior taxa de aumento de crescimento ocorrendo no campo elétrico que se inicia a corrente corona. Com uma variação em torno de 0,4 kV/cm, a eficiência global foi de aproximadamente 28% para valores acima de 99% ao se utilizar o espaçamento de 4 cm, enquanto para o de 6,5 cm aumentou de valores próximos a 35% para 99%. Além disso, essa região se mostrou bastante instável, com pequenas variações no campo elétrico causando grandes mudanças na eficiência, além do aumento no desvio padrão. Verificou-se que quando se obtém correntes próximas a

0,02 mA, eficiências acima de 90% são obtidas para ambos os espaçamentos entre placa e nas três velocidades avaliadas.

Figura 39. Varredura da eficiência global pelo campo elétrico para diferentes espaçamentos entre placas nas velocidades de: (a) 1,9 cm/s; (b) 2,9 cm/s; (c) 3,9 cm/s.



Fonte: Autor.

Em todos os campos elétricos avaliados, o precipitador que possuía maior espaçamento, de 6,5 cm demonstrou maiores eficiências de coleta. Além disso, eficiências acima de 99% foram observadas em qualquer campo elétrico acima de 3,5 kV/cm, enquanto para o precipitador com espaçamento de 4 cm isso ocorre apenas quando se aplica um campo elétrico de 4,5 kV/cm. A diferença é causada pelo campo elétrico onde se inicia o efeito corona, que apresentou uma diminuição com o aumento do espaçamento entre placas.

O melhor desempenho na coleta de nanopartículas ao se aumentar o espaçamento entre placas, em um mesmo campo elétrico, também foi observado nos trabalhos de Falaguasta (2005), Najafabadi e colaboradores (2014) e Yang, Kang e Zhong (2009). Segundo Yang, Kang e Zhong (2009), as diferenças na eficiência tornam-se menores com espaçamentos muito grandes. Logo, o aumento do espaçamento é benéfico até certo valor, a partir do qual o campo elétrico aplicado deveria ser muito grande para garantir a ionização do gás. Segundo Najafabadi e colaboradores (2014), as distribuições de corrente e campo elétrico em dutos estreitos são mais desiguais do que em dutos largos. Porém, percebe-se que com o aumento da densidade média de corrente na placa coletora, o duto estreito tem efeito inverso na eficiência do ESP e torna mais benéfico. Os autores chamaram isso de ponto de alteração, no qual em determinado valor o efeito do espaçamento entre placas na eficiência de ESP é revertido. Como observado pela Figura 39, esse ponto não foi alcançado nesse trabalho.

Chang e Bai (2000), Najafabadi e colaboradores (2014) e Yang, Kang e Zhong (2009) evidenciaram que o aumento do espaçamento entre fios produz uma distribuição mais uniforme do campo elétrico e uma operação mais estável, devido ao aumento do intervalo entre a voltagem do início da corona e a voltagem que ocorre o rompimento dielétrico do ar. Além disso, dutos mais largos levam a menor tensão de cisalhamento de gás e favorecem a coleta. Isso corrobora com os dados obtidos com a razão N_{EHD}/Re^2 , onde valores maiores foram obtidos para o duto mais largo. Dessa forma, a predominância das forças elétricas em relação as viscosas e inerciais são mais preponderantes no maior espaçamento aplicado. Isso favorece o carregamento das partículas e conseqüentemente as partículas são coletadas mais rapidamente. Como os espaçamentos maiores tem maiores tempos de residência, uma maior quantidade de partículas pode ser ionizada, carregadas e coletadas.

Esse aumento da eficiência com o espaçamento entre placas contraria o modelo de Deutsch e não foi observado por El Dein e Usama (2014), onde o aumento do espaçamento entre os eletrodos de coleta afetou negativamente o desempenho do precipitador e levou à

diminuição da corrente corona e ao aumento da voltagem de início da corona, sob a mesma tensão aplicada e diâmetro do fio. De fato, as curvas corrente-tensão evidenciadas anteriormente demonstraram que esse fenômeno ocorreu, mas nesse trabalho isso foi benéfico a coleta de nanopartículas. Segundo Falaguasta (2005), essa melhor performance em precipitadores mais largos, ao contrário do que diz o modelo de Deutsch, foi atribuída ao aumento na intensidade do campo devido ao efeito dos íons e partículas carregadas.

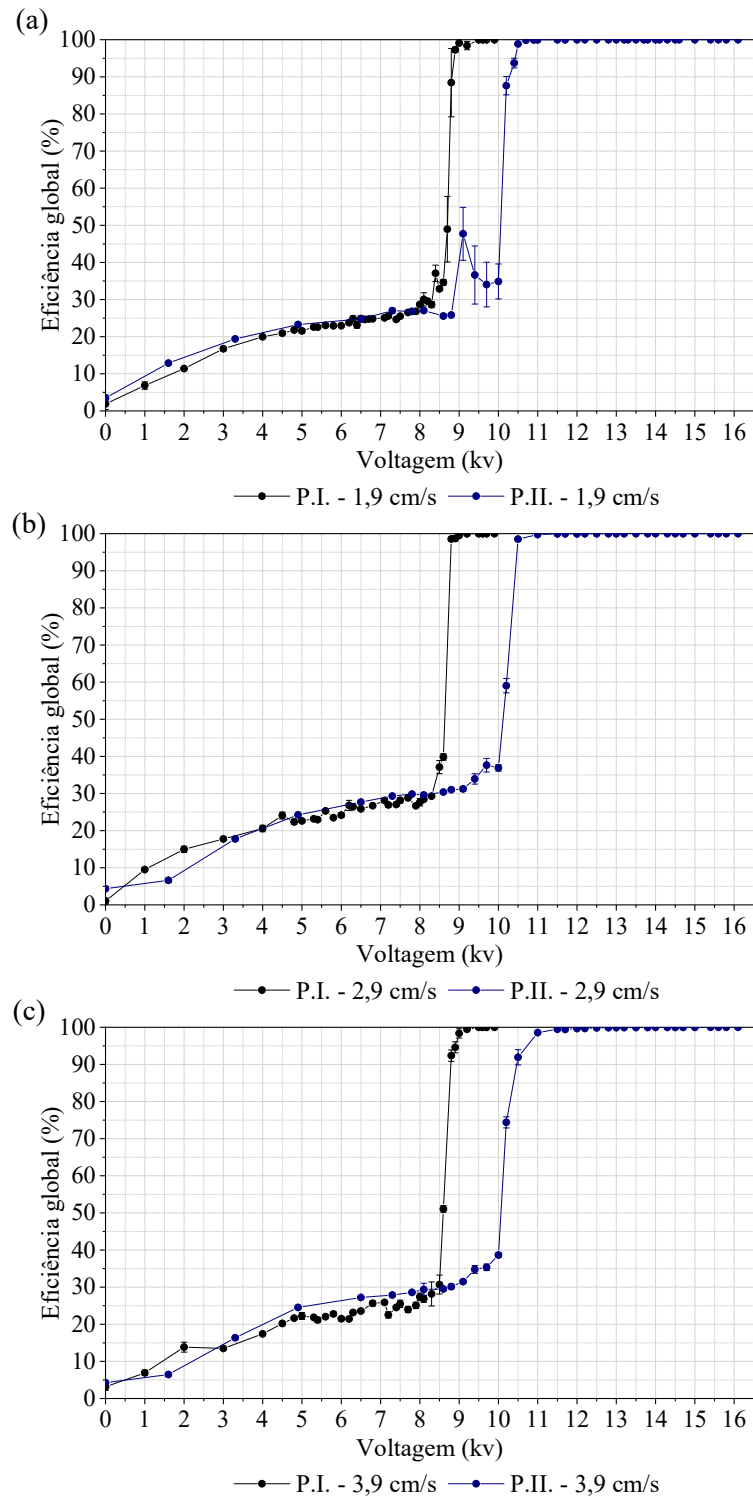
Navarrete e colaboradores (1997) observaram a melhora na eficiência de coleta com o aumento do espaçamento em partículas com elevada resistividade, principalmente pela limitação do aparecimento de corona reversa ao aplicar menores espaçamentos. Os autores obtiveram o mesmo comportamento observado por El Dein e Usama (2014), mas para partículas com menor resistividade. Yang, Kang e Zhong (2009) sugerem que existem valores de projeto ideais que variam com a intensidade do campo elétrico e com as características da partícula. A alteração nessa geometria modifica o arranjo espacial do campo elétrico entre os fios e as placas, não havendo dúvidas que isso causa influência na eficiência da coleta.

A melhora na eficiência também foi observada por outros pesquisadores, principalmente para partículas de elevada resistividade. Chang e Bai (2000) chamou esse fenômeno de não deutschiano e apontaram que, ao se utilizar a intensidade da voltagem aplicada como referência, o aumento do espaçamento entre placas melhora a performance do ESP. No entanto, pela taxa de penetração das partículas, tendências regulares não foram observadas se a intensidade do campo elétrico for usada como base de comparação. Além disso, maiores espaçamentos requerem um alto consumo de energia para atingir a mesma penetração, devido a necessidade de se aplicar uma maior voltagem para manter o mesmo campo corona. Logo, mais energia também é consumida para aumentar a velocidade de migração das partículas para compensar o aumento do caminho de transporte.

Como resultado, embora a configuração de um espaçamento amplo possa economizar custos de instalação inicial devido a menos placas e eletrodos, os custos de operação podem aumentar devido ao alto consumo de energia. Para se ter uma ideia, a Figura 40 demonstra os mesmos dados da Figura 39 plotados na forma de eficiência global por voltagem. Observa-se que mesmo o precipitador com espaçamento de 6,5 cm se apresentando mais eficiente em todos os campos elétricos, ao se avaliar pela voltagem na Figura 40 se verifica que uma eficiência de 99,9% pode ser obtida em uma tensão menor no precipitador com espaçamento de 4 cm. Por isso, a utilização de espaçamentos menores pode ser vantajosa no ponto de vista econômico,

diminuindo a potência necessária na operação do equipamento para se obter altas eficiências.

Figura 40. Varredura da eficiência global pela voltagem para diferentes espaçamentos entre placas nas velocidades de: (a) 1,9 cm/s; (b) 2,9 cm/s; (c) 3,9 cm/s.



Uma complexa relação é observada na tomada de decisão entre o uso de espaçamentos maiores ou menores. Isso porque à mudança no espaçamento tem influência na intensidade média do campo elétrico, na eletro-hidrodinâmica e na condição de fluxo em desenvolvimento simultaneamente, pelo comprimento de entrada hidrodinâmica (região acelerada dentro do duto de coleta). O espaçamento menor aumenta a intensidade do campo elétrico, em uma mesma voltagem aplicada, mas se apresenta mais instável e com possibilidade de corona reversa (NAJAFABADI *et al.*, 2014).

Valores de eficiência de coleta praticamente constantes são observados em ambos os espaçamentos utilizados e ocorreram antes da detecção de corrente pela fonte de alta tensão. Isso foi associado a baixos valores de corrente elétrica que não puderam ser detectados pela fonte de alta tensão devido a precisão. De fato, ao se utilizar uma fonte de alta tensão da Eletroteste, modelo HP5432, que apresentava correntes de até 1 μA , foram obtidos valores em 7,5 kV para P.I. e 9,5 kV para P.II. Além disso, devido ao carregamento por difusão ocorrer devido ao movimento aleatório das partículas, fatores como velocidade do gás (energia cinética) e temperatura também podem auxiliar no carregamento e posterior coleta de nanopartículas. Deve-se salientar que esses valores não podem ser associados a vazamento ou deposição de partículas na tubulação ou equipamento, pois quando o campo elétrico ou voltagem tenderam a zero a eficiência tendeu a zero, conforme Figura 39 e Figura 40.

De forma a verificar a existência ou alteração nas cargas elétricas das partículas nessa região de valores de eficiência de coleta praticamente constantes, foram realizados testes utilizando um eletrômetro, conforme metodologia demonstrada no tópico “4.3.3. Avaliação da influência do espaçamento entre placas”. Foram aplicadas voltagens nos valores de 5,0 e 8,0 kV, que correspondem, em geral, ao início e fim dessa região. Na Tabela 11, além da corrente elétrica média calculada a partir de medições a cada 1 segundo durante 5 minutos, estão a estimativa das cargas elétricas médias das partículas para cada condição, segundo a Equação 22. Para estimar as cargas elétricas das partículas, \bar{q} , o valor de corrente medido pelo eletrômetro com a utilização de um filtro HEPA na amostragem do equipamento ($I_{\text{HEPA}}=0,59 \pm 0,08$) foi descontado das correntes médias calculadas em cada condição, \bar{I} .

Pode-se observar pela tabela, que ocorreu uma alteração no sinal da corrente gerada pelo aerossol entre os testes sem e com a aplicação de tensão no precipitador. Dessa forma, mesmo não sendo detectado corrente pela fonte de alta tensão, há de fato um carregamento das partículas nessas voltagens e campos elétricos mais baixos. Em modulo a carga obtida pelo

aerossol sem aplicação de tensão é maior, no entanto com sinal contrário como evidenciado pela corrente. Isso comprova que as partículas que passaram pelo precipitador sem serem coletadas carregavam cargas elétricas quando havia aplicação de tensão no precipitador, devido a mudança no sinal da corrente. Além disso, quanto maior a tensão aplicada, maior a carga residual das partículas na saída do precipitador. Fato também observado com a velocidade, ou seja, aumentando a velocidade e consequentemente submetendo o aerossol a uma maior energia cinética, ocorre um aumento da carga elétrica média das partículas.

Tabela 11. Correntes elétricas medidas do aerossol após a passagem pelo precipitador eletrostático e estimativa da carga elétrica média das partículas

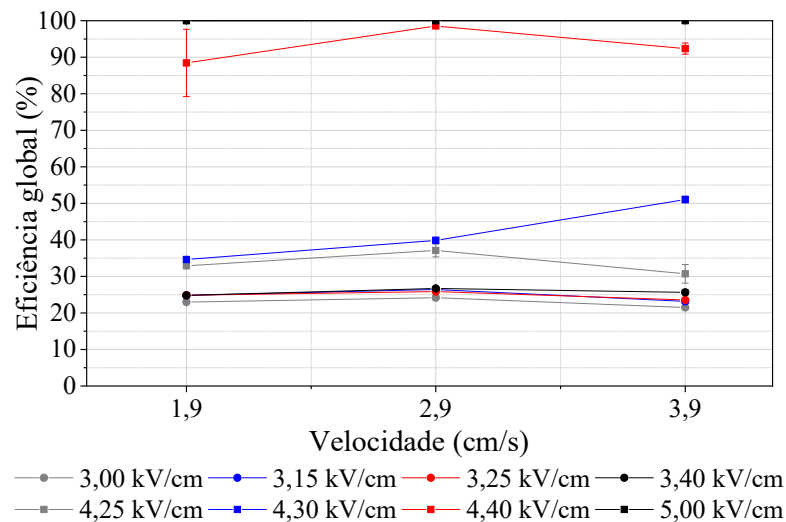
| Precipitador | Velocidade (cm/s) | Voltagem (kV) | \bar{I} (fA) | $ \bar{q} (\cdot 10^{-4} e)$ |
|--------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------------------|
| P.I. | 1,9 | 0,0 | $-20,87 \pm 1,99$ | 76,57 |
| | | -5,0 | $3,98 \pm 0,12$ | 12,07 |
| | | -8,0 | $4,81 \pm 0,37$ | 15,03 |
| | 2,9 | 0,0 | $-17,26 \pm 0,55$ | 63,67 |
| | | -5,0 | $4,18 \pm 0,10$ | 12,79 |
| | | -8,0 | $4,75 \pm 0,11$ | 14,82 |
| | 3,9 | 0,0 | $-16,99 \pm 1,22$ | 62,71 |
| | | -5,0 | $4,36 \pm 0,09$ | 13,44 |
| | | -8,0 | $4,80 \pm 0,08$ | 15,00 |
| P.II. | 1,9 | 0,0 | $-11,26 \pm 0,21$ | 42,27 |
| | | -5,0 | $2,13 \pm 0,11$ | 5,49 |
| | | -8,0 | $3,33 \pm 0,11$ | 9,77 |
| | 2,9 | 0,0 | $-9,85 \pm 1,75$ | 37,26 |
| | | -5,0 | $2,35 \pm 0,03$ | 6,26 |
| | | -8,0 | $3,05 \pm 0,15$ | 8,77 |
| | 3,9 | 0,0 | $-10,26 \pm 0,92$ | 38,71 |
| | | -5,0 | $2,43 \pm 0,15$ | 6,56 |
| | | -8,0 | $3,39 \pm 0,09$ | 9,95 |

Fonte: Autor.

Na verificação da influência da velocidade e do comportamento da eficiência fracionária, foram escolhidos 8 valores de campo elétrico de 3,0 kV/cm, 3,15 kV/cm, 3,25 kV/cm, 3,4 kV/cm, 4,25 kV/cm, 4,3 kV/cm, 4,4 kV/cm e 5,0 kV/cm, demonstrados nas

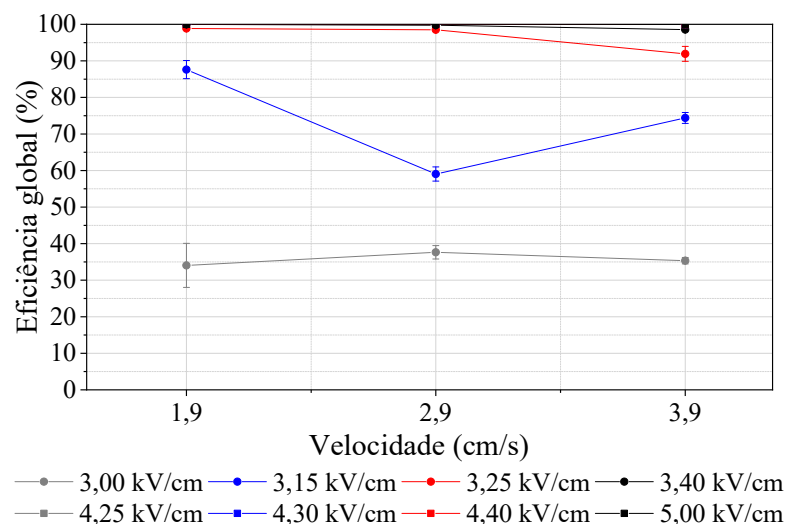
Figuras 41 e 42. Esses valores foram escolhidos de forma a evidenciar as diferenças onde ocorre o aumento brusco de eficiência em ambos os precipitadores (Figura 39).

Figura 41. Variação da eficiência global pela velocidade utilizando o precipitador com espaçamento de 4 cm (P.I.).



Fonte: Autor.

Figura 42. Variação da eficiência global pela velocidade utilizando o precipitador com espaçamento de 6,5 cm (P.II.).



Fonte: Autor.

Não foi observado um comportamento bem definido com o aumento da velocidade em todos os campos elétricos. Esperava-se que o aumento da velocidade e consequente diminuição

do tempo de residência, afetasse negativamente a eficiência global em ambos os precipitadores. Diferenças mais significativas foram observadas ao se aplicar o campo elétrico de 4,30 e 4,40 kV/cm para o precipitador P.I. e de 3,15 e 3,25 kV/cm para o precipitador P.II., justamente os valores dispostos no aumento brusco de eficiência e pouco acima do início do efeito corona. Como foi evidenciado anteriormente, essa região é bastante instável e pequenas variações alteram drasticamente a eficiência. Para o campo elétrico de 5,00 kV/cm, eficiências de 99,99% foram obtidas em todas as três velocidades.

Um comportamento de aumento da eficiência ao aumentar a velocidade de 1,9 para 2,9 cm/s e decréscimo ao aumentar a velocidade para 3,9 cm/s é observado em todos campos elétricos com exceção de 4,30 e 5,00 kV/cm para espaçamentos de 4 cm. Já para 6,5 cm, isso é observado apenas para o campo elétrico de 3,00 kV/cm.

Para o campo elétrico de 4,30 kV/cm aplicado no precipitador P.I., o aumento da eficiência é observado em todas as velocidades empregadas. Ao se utilizar o valor de 3,15 kV/cm e para o precipitador P.II, um decréscimo na eficiência é observado ao se aumentar a velocidade de 1,9 para 2,9 cm/s. No entanto, o aumento para 3,9 cm/s novamente aumentou a eficiência de coleta. Andrade (2020) realizou estudos em um precipitador com o mesmo espaçamento entre placas e velocidades semelhantes (1,03 a 4,08 cm/s) e observou o comportamento típico de decréscimo na eficiência com a diminuição do tempo de residência das partículas no interior do equipamento, em todos os campos elétricos avaliados. No entanto, variáveis como espaçamento entre fios, número de fios e concentração de partículas foram diferentes.

Já Oliveira (2019) observou o aumento da eficiência ao se aumentar a velocidade de 1,7 para 3,3 cm/s. O autor salientou que efeitos de turbulência não seriam plausíveis neste caso devido aos números de Reynolds caracterizarem todos em regimes laminares. No entanto, os altos valores de N_{EHD}/Re^2 , assim como obtido nesse estudo, indicaram uma forte influência das forças elétricas sobre o escoamento e a consequente formação de vórtices e turbulências locais. Além disso, a complexidade do processo de precipitação eletrostática torna difícil a comparação de estudos diversos nesta área, pois múltiplas variáveis operacionais e geométricas podem afetar o processo.

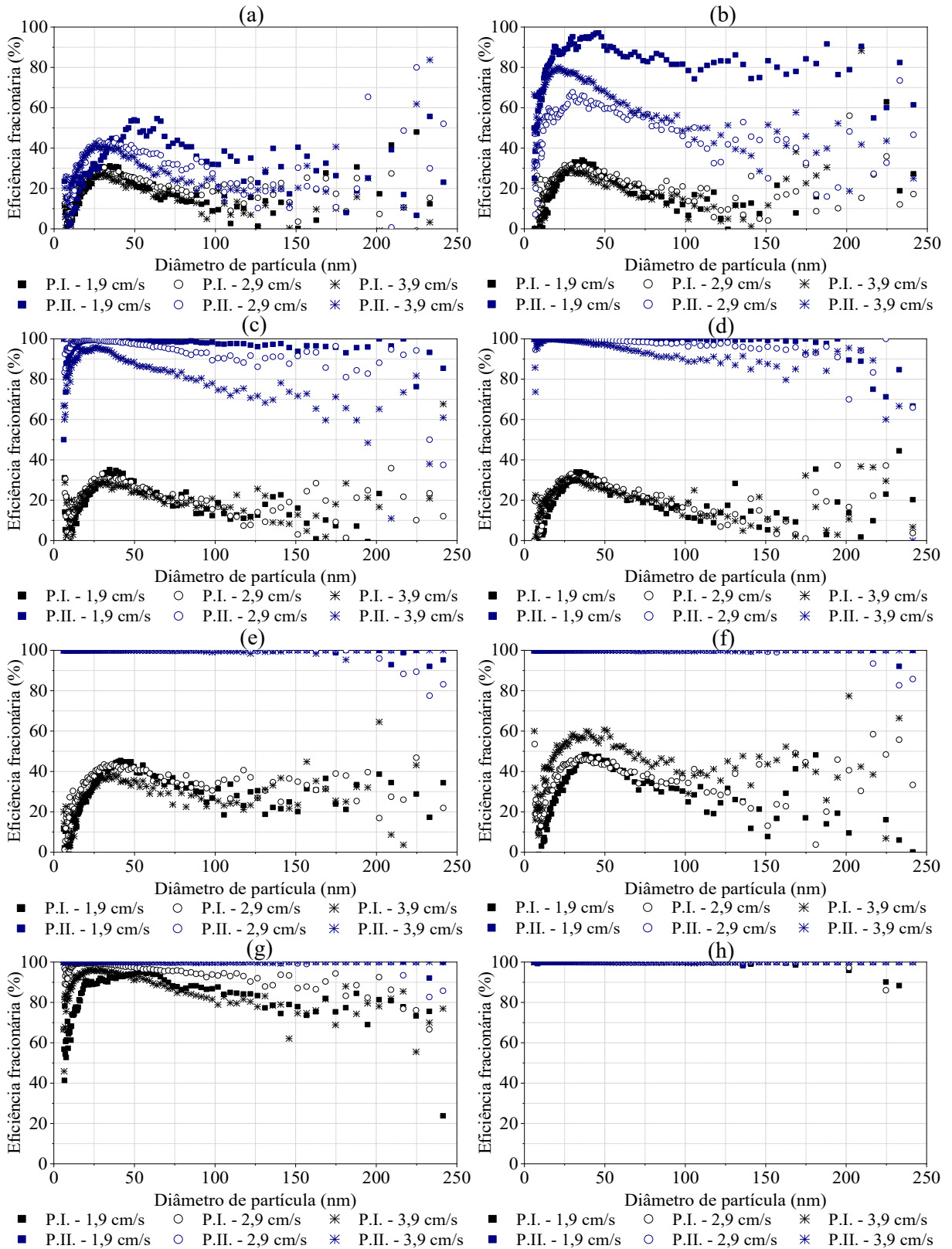
Deve salientar que as baixas velocidades empregadas nesse estudo garantem o escoamento laminar e evita influência de forças viscosas e inerciais na coleta de partículas. A

preponderância das forças elétricas pode explicar parcialmente os comportamentos anômalos da velocidade. Como evidenciado anteriormente, valores praticamente constantes foram observados em diferentes campos elétricos. Ao se observar a Figura 41 e Figura 42, verifica que isso também ocorreu para a velocidade, ou seja, em um mesmo campo elétrico, como de 3,00 a 3,40 kV/cm para P.I. e 3,00 kV/cm para P.II., valores de eficiência praticamente constante foram obtidos, indicando que as forças elétricas influenciaram mais o processo a despeito do tempo de residência.

A Figura 43 explicita as eficiências fracionárias para ambos os espaçamentos de placas ao se utilizar os 8 campos elétricos mencionados anteriormente e nas três velocidades. Um comportamento semelhante ocorre em todas as curvas: inicialmente elas apresentam um máximo de eficiência na região onde se encontra a mediana em número de partículas (em torno de 30 nm) e grande dispersão dos dados acima de 100 nm. À medida que se aumentou o campo elétrico, os dados foram se mantendo mais constantes até atingir altas eficiências no campo elétrico de 5,0 kV/cm.

Para o campo elétrico de 3,0 kV/cm, a curva referente ao precipitador P.II. para a velocidade de 1,9 cm/s apresentou um comportamento que destoou dos demais, com o máximo de eficiência ocorrendo em torno de 57 nm. Na realidade, se observa dois picos ocorrendo em 47 e 65 nm. Comportamento anômalo também foi evidenciado em 3,15 kV/cm nessa mesma velocidade, principalmente em 20 e 47 nm. Como evidenciado anteriormente na Figura 38, a razão N_{EHD}/Re^2 é bem menor em relação aos valores obtidos nos outros testes. Mesmo as forças elétricas sendo preponderante sobre as inerciais e viscosas, seu efeito não é tão pronunciado como nos outros testes. Com isso, o maior tempo de residência das partículas no interior do equipamento, juntamente com o campo elétrico fraco que leva a carência do carregamento, pode ter levado a choques entre partículas, transferindo a carga para outras partículas (ZHUANG *et al.*, 2000). Essa transferência de carga pode estar associada ao balanço entre a mobilidade elétrica e o número de cargas adquiridas pelas partículas, menor quanto menor o diâmetro, favorece o carregamento das partículas maiores (OLIVEIRA; GUERRA, 2018). A mobilidade elétrica é definida como a razão entre a velocidade de migração e o módulo do campo elétrico e descreve a capacidade da partícula de se mover através de um campo elétrico (HINDS, 1999). À medida que o campo elétrico teve um pequeno aumento, para 3,15 kV/cm, esse fenômeno continua ocorrendo, mas, como a maioria das partículas estão em torno 30 nm, a probabilidade e colisão entre elas com outras partículas é maior e permite que as partículas menores (20 nm) possam ser carregadas e coletadas.

Figura 43. Eficiências fracionárias para ambos os precipitadores e diferentes velocidades ao se aplicar o campo elétrico de: (a) 3,0 kV/cm; (b) 3,15 kV/cm; (c) 3,25 kV/cm; (d) 3,4 kV/cm; (e) 4,25 kV/cm; (f) 4,3 kV/cm; (g) 4,4 kV/cm; (h) 5,0 kV/cm.



Fonte: Autor.

Nesse mesmo campo elétrico, o precipitador com menor espaçamento entre placas manteve eficiências e comportamento semelhantes. Se observou que as curvas para o precipitador mais largo começaram a apresentar diferentes eficiências de acordo com a velocidade empregada. Deve salientar que em 2,9 cm/s o máximo de eficiência ocorreu em 30 nm, já para 3,9 cm/s ocorreu em 20 nm, com eficiências superiores. A maior energia cinética na maior velocidade pode ter transferido energia suficiente para que essas partículas fossem carregadas, principalmente nos diâmetros menores que 70 nm, aumentando a colisão dessas partículas. Por mais que o campo elétrico favoreça o carregamento por difusão, ele não é o fator crucial para ele ocorrer nessa faixa de tamanho (RIEHLE, 1997b; SCHMATLOCH; RAUCH, 2005). De fato, esse fenômeno é muito complexo e a influência da energia cinética pode contribuir para o carregamento da partícula, como observado por Oliveira e Guerra (2018), assim como outras variáveis que não foram controladas, como a temperatura do gás.

Em 3,25 e 3,4 kV/cm, as eficiências aumentaram para o precipitador P.II enquanto se mantiveram com valores semelhantes para o precipitador P.I. De fato, nesses dois campos elétricos as quedas na eficiência ocorrem à medida que se aumenta o diâmetro, mas o máximo de eficiência só é observado na Figura 43-d na velocidade de 3,25 kV/cm.

Alterações na eficiência somente ocorre para o precipitador P.I. no campo elétrico de 4,3 kV/cm (Figura 43-f). Na Figura 43-g, na voltagem de 4,4 kV/cm e velocidade de 1,9 cm/s, a curva de eficiência fracionária também apresentou um comportamento anômalo em relação as demais, com máximo de eficiência ocorrendo em torno de 20 e 60 nm. As demais curvas para esse equipamento apresentaram esse fenômeno em torno de 20 nm.

A dispersão dos dados que ocorre para partículas maiores que 100 nm pode ser explicada pela quantidade de partículas nessa faixa é bem pequena, como demonstrado anteriormente a mediana em número de partículas foi em torno de 30 nm e a mediana em relação a massa das partículas foi em torno de 60 nm. Já a queda na eficiência observada para os menores campos elétricos aplicados pode ser explicada de três formas. Primeiro, esses menores campos não foram fortes o suficiente para garantir o carregamento das partículas.

Segundo, o carregamento por difusão tem efeito preponderante para partículas menores que 100 nm (RIEHLE, 1997b). Analogamente com filtros mangas, ocorre uma região de transição do mecanismo por difusão para o por campo, onde as partículas não apresentam alta mobilidade elétrica para serem carregadas preferencialmente por campo. A competição entre

os mecanismos acaba por diminuir a eficiência até um ponto de mínimo, não alcançado por esse trabalho ter avaliado partículas até 241,4 nm. Essa queda também foi observada por Morawska e colaboradores (2002) que avaliaram partículas na faixa de 18-1200 nm.

Terceiro, ao balanço entre a quantidade máxima de cargas elétricas possíveis de serem adquiridas por uma partícula e sua mobilidade elétrica. O efeito do diâmetro das partículas nessas propriedades é alto e o acréscimo de ambas as propriedades influencia positivamente o processo de coleta por precipitação eletrostática (OLIVEIRA, 2019). Um aumento no diâmetro de uma partícula carregada corresponde a uma diminuição em sua mobilidade elétrica. Assim, as partículas com diâmetros maiores percorrerão distâncias mais curtas no mesmo período de tempo, do que as partículas de diâmetro menor, quando sob a influência de um campo elétrico. Dessa forma, pode não ter tempo suficiente algumas partículas maiores atravessarem o campo e se depositar nas placas coletoras (MORAWSKA *et al.*, 2002).

O máximo de eficiência obtido na faixa de nanopartículas apresentam diversas explicações na literatura. Falaguasta (2005), Yoo, Lee e Oh (1997) e Zhuang e colaboradores (2000) também verificaram esse máximo nas curvas de eficiência fracionaria para partículas menores que 80 nm e associaram o fenômeno à ineficiência de carregamento.

Outros autores como Guo, Yo e Jun Guo (2014), Kherbouche e colaboradores (2016) e Schmatloch e Rauch (2005) associaram este efeito a área superficial ser muito grande resultar uma grande densidade de carga superficial devido ao mecanismo de carga de difusão e ao pequeno arrasto que ocorre na interface quando o tamanho de partícula é comparável ao caminho livre médio das moléculas de gás.

Oliveira e Guerra (2018) e Morawska e colaboradores (2002) fizeram uma análise considerando a mobilidade elétrica das partículas. A queda na eficiência de partículas extremamente pequenas pode ser atribuída às limitações de carregamento das partículas e suas altas mobilidades elétricas. Assim, como elas tem maior mobilidade elétrica, menor a probabilidade de ocorrer colisões, bem como seu tamanho pequeno diminuir a carga que essas partículas podem adquirir.

De toda forma, ambos os precipitadores eletrostáticos apresentaram altas eficiências no campo elétrico de 5 kV/cm para todos os diâmetros avaliados. Pequenas quedas na eficiência para alguns dos maiores diâmetros ocorreram para o precipitador P.I. (Figura 43-h), mas que foram associados a pequena quantidade de partículas nessas faixas de tamanho, levando a

oscilações nos dados. Com isso, é evidente que os precipitadores eletrostáticos, nas condições utilizadas, têm potencial para coletarem eficientemente partículas na faixa nanométrica.

5.3. Avaliação da influência do espaçamento entre fios

Nessa subseção serão apresentados os resultados dos testes de avaliação do espaçamento entre fios, onde serão discutidas as características das curvas corrente-tensão, o comportamento do número eletro-hidrodinâmico e os resultados das eficiências de coleta.

5.3.1. Curvas corrente-tensão

As curvas corrente-tensão obtidas para cada espaçamento entre fios (4, 6 e 12 cm) em diferentes velocidades estão mostradas na Figura 44 para o precipitador P.I. e Figura 45 para o precipitador P.II. Deve-se salientar que as curvas para o espaçamento de 6 cm já foram evidenciadas anteriormente e estão dispostas novamente para comparação com os valores de 4 e 12 cm.

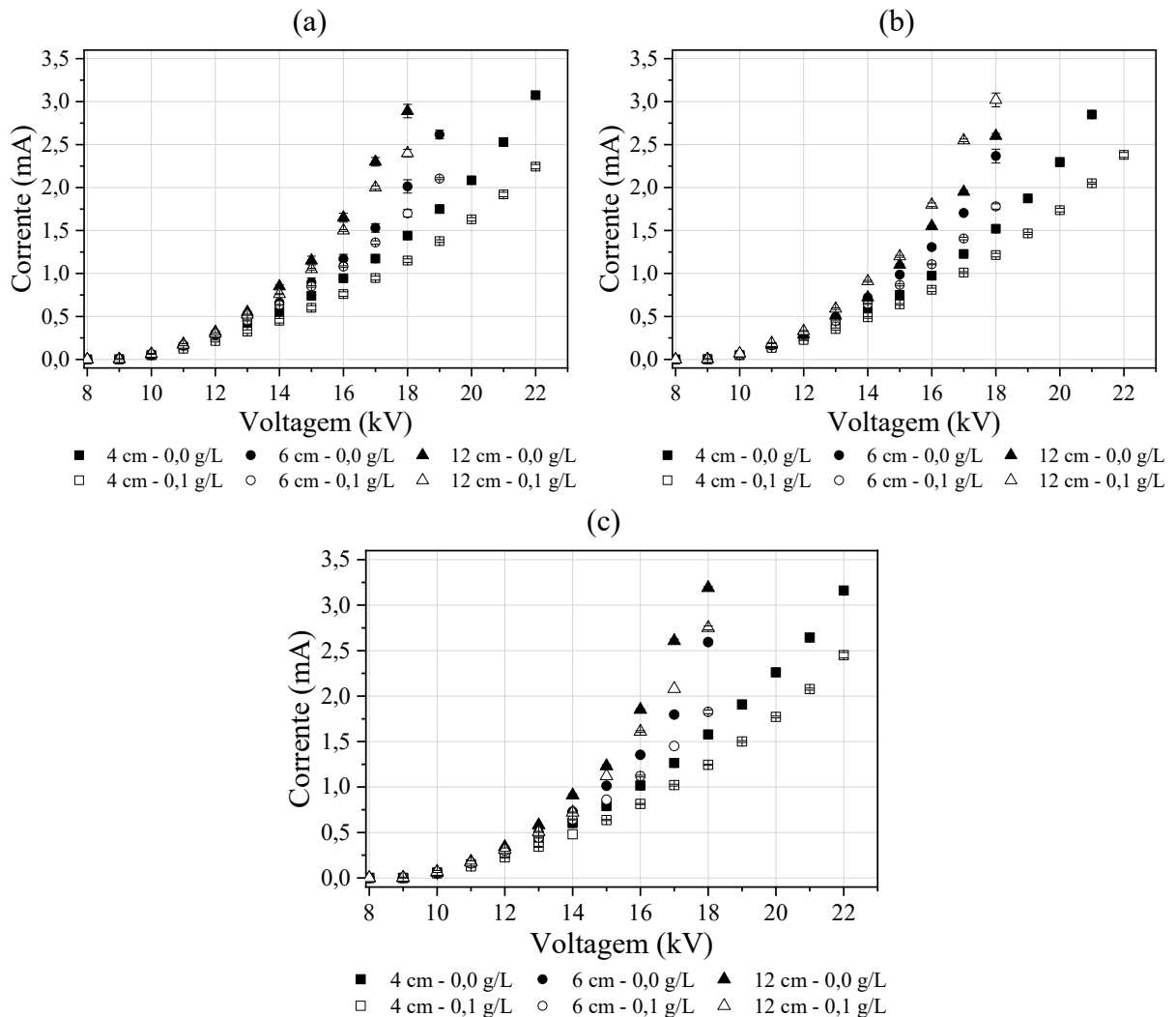
O mesmo comportamento apresentado anteriormente foi obtido, ou seja, ocorre um aumento da corrente com o aumento da voltagem aplicada, a presença de partículas no aerossol ocasionou uma diminuição na corrente e o aumento da velocidade alterou minimamente os valores de corrente obtidos. O precipitador P.I. evidenciou maiores correntes em relação ao precipitador P.II. para todos os espaçamentos entre fios utilizados. Em geral, não ocorreu mudanças significativas na voltagem do início da corona e da ruptura dielétrica do ar nos três espaçamentos entre eletrodos de descarga. Essa observação foi diferente de El Dein e Usama (2014), que obteve maiores voltagens de ruptura dielétrica ao se aumentar o espaçamento entre fios.

Observa-se o aumento da corrente com o espaçamento do fio, principalmente para tensões superiores a 14 kV para o precipitador P.I. e superiores a 16 kV para o precipitador P.II. Para tensões mais baixas, as diferenças na corrente foram mais sutis. Esse fato também foi observado por Kasdi (2016), El Dein e Usama e Yang, Kang e Zhong (2009), no entanto Chang

e Bai (2000) salientam que em altas voltagens a eficiência de coleta de partículas não apresenta uma grande variação. Isso será abordado no tópico “Testes de eficiência de coleta”.

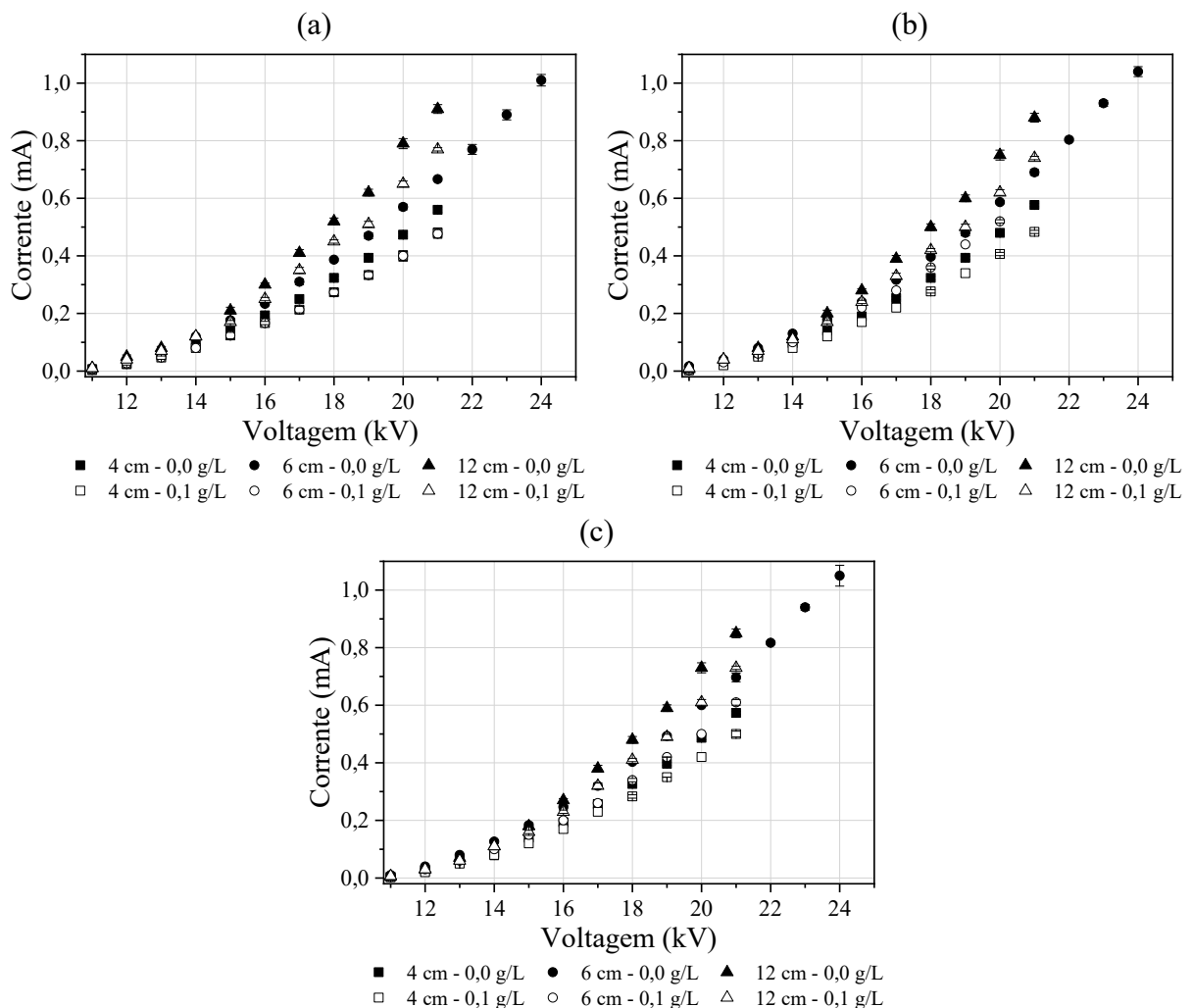
Esse aumento da corrente foi maior no precipitador com duto menor em relação ao duto mais largo. Para o precipitador P.I., na voltagem que ocorreu a ruptura do dielétrico do ar no espaçamento de 12 cm (18 kV), a corrente foi cerca de duas vezes maior que a obtida ao se utilizar o espaçamento de 4 cm. Realizando a mesma análise para o precipitador P.II. na voltagem de 21 kV, o aumento foi cerca de 1,6 vezes.

Figura 44. Curvas corrente-tensão para o precipitador P.I. com diferentes espaçamentos entre fios e nas velocidades de: (a) 1,9 cm/s; (b) 2,9 cm/s; (c) 3,9 cm/s.



Fonte: Autor.

Figura 45. Curvas corrente-tensão para o precipitador P.II. com espaçamentos entre fios e nas velocidades de: (a) 1,9 cm/s; (b) 2,9 cm/s; (c) 3,9 cm/s.



Fonte: Autor.

Esse fenômeno esteve associado à redução da blindagem eletrostática, ou seja, a diminuição da interferência das linhas de campo foi causada pelo aumento do espaçamento (PARKER, 2003; WHITE, 1963). Além disso, devido ao aumento progressivo da corrente, pela diminuição da supressão da corona, pode-se inferir que o maior espaçamento ainda ocorre antes do ponto de máxima corrente, a partir do qual a corrente total específica diminui (PARKER, 2003). Segundo Lu e colaboradores (2017), para partículas entre 0,2 e 15 μm , um aumento ocorre na corrente e na eficiência até espaçamentos de 100 mm, após isso diminuindo com o aumento do espaçamento. Deve-se salientar que o aumento na corrente no precipitador P.II foi menor em relação ao precipitador P.I. justamente pela presença do fenômeno de blindagem

eletrostática ser mais pronunciado no menor duto, onde a densidade de linhas de campo é maior.

O campo elétrico ocorre entre os eletrodos de descarga e os eletrodos de coleta e a configuração que estão dispostos afetam diretamente as linhas de campo. Com as linhas em posição de interferência, fenômeno chamado de blindagem eletrostática, ocorre uma restrição na voltagem. Isso leva a diminuição da concentração de íons no interior do equipamento. Com espaçamentos pequenos, há uma densidade grande de linhas de campo e, além da blindagem, também pode ocorrer instabilidades na formação do campo elétrico (EL DEIN; USAMA, 2014; LU *et al.*, 2017).

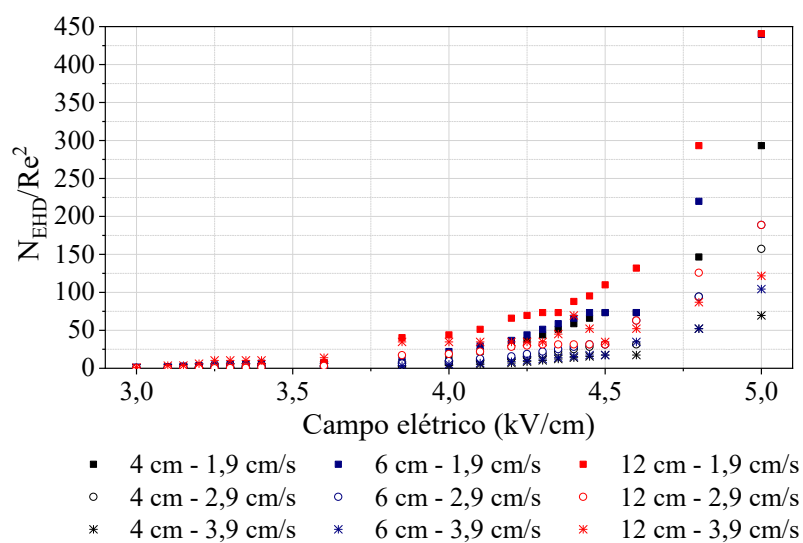
He e Dass (2018) verificaram que as densidades de corrente nos fios centrais são mais baixas do que nas dos dois fios externos, o que é mais evidente em uma tensão aplicada mais alta, corroborando com os resultados obtidos nas Figuras 44 e 45. Logo, os fios centrais podem ser blindados pelos outros fios com um aumento subsequente das tensões de início da corona e uma diminuição do campo elétrico em suas superfícies. Kasdi (2016) evidenciou o efeito de blindagem exercido por cada fio no outro, chegando a mesma conclusão: fios das extremidades são menos expostos aos fios internos. Como resultado, a corrente de emissão de corona em lados opostos de dois fios adjacentes é reduzida. Este efeito aumenta com a diminuição do espaçamento dos fios, reduzindo a corrente de descarga de cada fio e, como consequência, a corrente total é menor.

5.3.2. Número eletro-hidrodinâmico

Para verificar a influência do fluxo primário ou secundário no processo, o valor do N_{EHD}/Re^2 foi calculado e apresentado na Figura 46 para o precipitador P.I. e Figura 47 para o precipitador P.II.

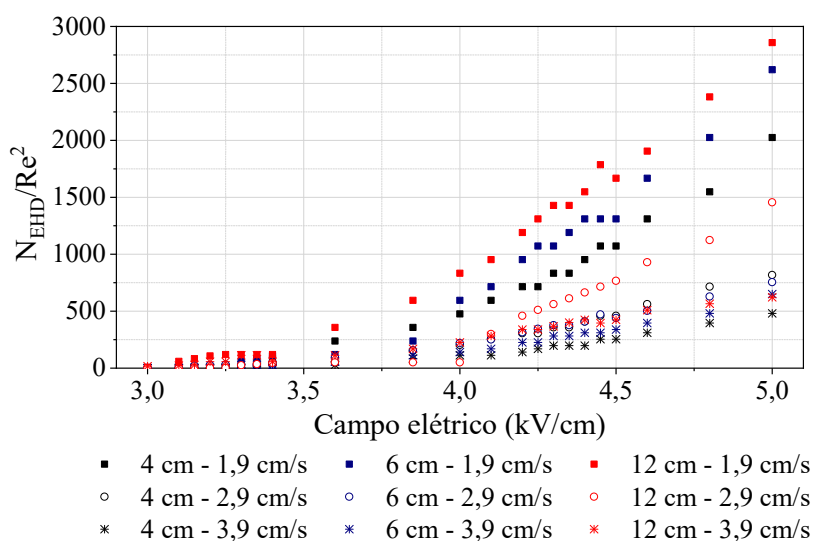
Como se observa pelas figuras, a partir do início da corona, os valores dessa razão são muito maiores que 1, o que significa que as forças elétricas são preponderantes sobre as viscosas e inerciais. Como demonstrado anteriormente, o aumento da velocidade do gás proporcionou uma diminuição nos valores dessa razão, enquanto o campo elétrico aumenta significativamente e proporciona maior efeito sobre o padrão de fluxo.

Figura 46. Valores de N_{EHD}/Re^2 obtidos para o precipitador P.I. com diferentes espaçamentos entre fios e velocidades.



Fonte: Autor.

Figura 47. Valores de N_{EHD}/Re^2 obtidos para o precipitador P.II. com diferentes espaçamentos entre fios e velocidades.



Fonte: Autor.

Analisando o comportamento em relação ao espaçamento entre fios, verifica-se que, espaçamentos maiores proporcionam maiores valores dessa razão em um mesmo campo elétrico e velocidade. As diferenças não são tão grandes quanto as obtidas ao se variar o espaçamento entre placas, indicando que o espaçamento entre fios tem uma influência menor no número eletro-hidrodinâmico, causado principalmente pelas alterações na corrente corona.

Andrade (2020) também verificou a predominância das forças elétricas e sua intensificação com o aumento do espaçamento entre os fios, por conta da redução do efeito de blindagem eletrostática. Segundo Ning e colaboradores (2016), o aumento dessa razão causa uma maior alteração no padrão de fluxo e turbulências, favorecendo a coleta de partículas finas.

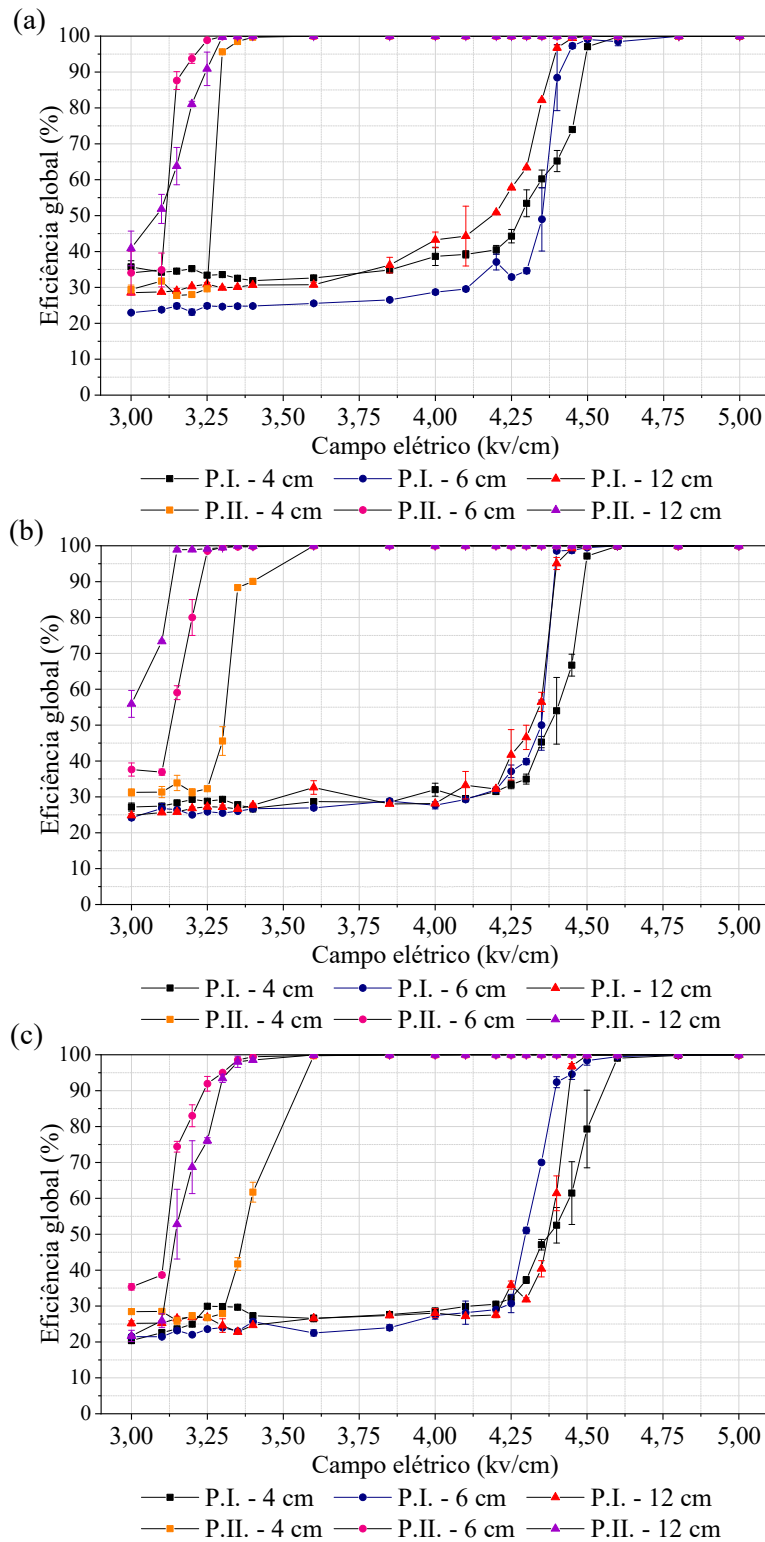
5.3.3. Testes de eficiência de coleta

A Figura 48 demonstra as curvas de eficiência de coleta com a variação do campo elétrico para diferentes velocidades e nos três espaçamentos entre fios utilizados nesse trabalho (4, 6 e 12 cm). Como as eficiências se mostraram baixas em valores de campo elétrico menores que 3,0 kV/cm anteriormente, foram empregados valores entre 3,0 e 5,0 kV/cm.

Novamente, para todos os espaçamentos utilizados, as curvas de eficiência global pelo campo elétrico apresentaram um comportamento sigmoide, com a maior taxa de aumento de crescimento ocorrendo no campo elétrico que se inicia a corrente corona. Não foi observado um comportamento bem definido da eficiência global ao se aumentar o espaçamento entre fios. Em geral, o espaçamento de 4 cm apresentou o pior desempenho em relação ao de 6 e 12 cm, sendo que esses dois últimos apresentaram melhores desempenhos dependendo do espaçamento entre placas e velocidade utilizada. De fato, Chang e Bai (2000) demonstraram que existe um espaçamento entre fios ótimo, no qual a eficiência é máxima. Najafabadi e colaboradores (2014) também chegaram a mesma conclusão e incluíram que as condições operacionais tem influência no valor que esse ponto adquire.

Pelas inclinações das curvas de eficiência pelo campo elétrico, verifica-se que o aumento do espaçamento aumentou essas inclinações, menos evidente nos espaçamentos de 6 e 12 cm. Em geral, a faixa de campo elétrico que a eficiência aumenta de valores baixos e praticamente constantes para acima de 99% não apresentou diferenças significativas. No entanto, o espaçamento de 4 cm teve a menor taxa de aumento na eficiência. Isso pode ser associado ao efeito de blindagem eletrostática, discutido anteriormente, que reduziu a corrente corona e a influência das forças elétricas em todos os campos elétricos aplicados. Logo, as eficiências tenderam a diminuir na região próxima ao início da corona, onde ocorre uma maior carência de carregamento e instabilidade. No entanto, nos maiores campos elétricos aplicados essa diferença foi pouco significativa, fato também observado por Chang e Bai (2000).

Figura 48. Varredura da eficiência global pelo campo elétrico para os precipitadores P.I. e P.II. com diferentes espaçamentos entre fios e nas velocidades de: (a) 1,9 cm/s; (b) 2,9 cm/s; (c) 3,9 cm/s.



Fonte: Autor.

O comportamento mais definido foi evidenciado na velocidade de 2,9 cm/s para ambos os precipitadores, ou seja, o aumento do espaçamento entre fios favoreceu a coleta de nanopartículas, principalmente na região que ocorre o aumento brusco de eficiência. Na velocidade de 1,9 cm/s (Figura 48-a), o espaçamento de 12 cm apresentou melhores eficiências a partir de 4 kV/cm para P.I. Nos campos elétricos mais baixos, o espaçamento de 4 cm evidenciou melhor performance e esse mesmo espaçamento somente teve seu desempenho superado pelo de 6 cm a partir de 4,45 kV/cm. Comportamento foi diferente no precipitador P.II., que como demonstrado anteriormente apresenta menor influência da blindagem eletrostática. O espaçamento de 4 cm apresentou menores eficiências e o espaçamento de 6 cm coletou mais partículas a partir de 3,2 kV/cm.

O espaçamento de 12 cm utilizado em P.I. apresentou melhor desempenho, com o aumento brusco na eficiência ocorre antes que os demais. Nesse caso, a redução da blindagem eletrostática, mais evidente nesse equipamento com menor duto, juntamente com o alto tempo de residência favoreceu a coleta das partículas.

Pela Figura 48-c, a combinação da velocidade de 3,9 cm/s com o espaçamento de 6 cm, apresentou melhores desempenhos em ambos os precipitadores (P.I. e P.II.). Como evidenciado anteriormente, Najafabadi e colaboradores (2014) menciona que os parâmetros operacionais, como essa alta velocidade, pode ter ocasionado o ponto de máximo eficiência no espaçamento de 6 cm, para essa velocidade. Além disso, uma queda na eficiência mais significativa ocorre no espaçamento de 4 cm para o precipitador P.II., já que o baixo tempo de residência e a supressão da corona pela blindagem não favorece a coleta de partículas (PARKER, 2003)

Chang e Bai (2000) verificaram que o efeito do espaçamento entre fios não é significativo quando a força do campo elétrico é usada como parâmetro de operação. De fato, Andrade (2020), ao avaliar os espaçamentos de 6,5 e 12 cm verificou estatisticamente a pequena influência desse parâmetro na coleta de nanopartículas. Yang, Kang e Zhong (2009) chegaram à conclusão que as tendências da eficiência de coleta com a mudança do espaçamento são consideravelmente complexas, devendo levar em consideração vários fatores como faixa de tensão de operação, retorno de partículas, supressão da corona e consumo de energia. Em relação a esse último, os resultados obtidos por Chang e Bai (2000) indicaram que sob a mesma eficiência de projeto, um ESP com um espaçamento entre fios maior requer mais energia para manter seu efeito corona.

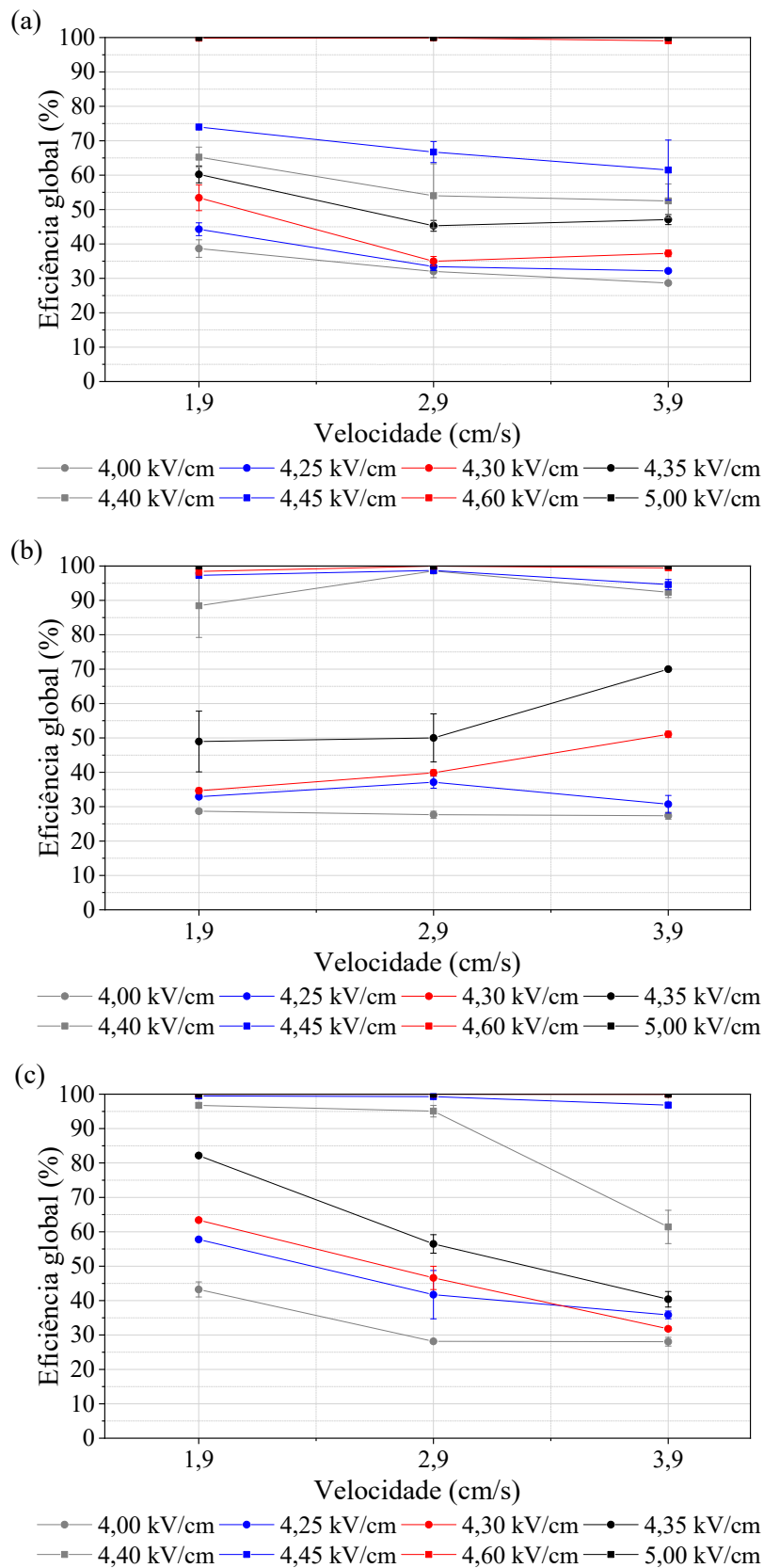
Na verificação da influência da velocidade para o precipitador P.I., foram escolhidos 8 valores de campo elétrico de 4,0 kV/cm, 4,25 kV/cm, 4,3 kV/cm, 4,35 kV/cm, 4,4 kV/cm, 4,45 kV/cm, 4,6 kV/cm e 5,0 kV/cm, dispostos na Figura 49. Esses valores foram escolhidos de forma a evidenciar as diferenças onde ocorre o aumento brusco de eficiência.

Pelas figuras, observa-se um comportamento bem definido com o aumento da velocidade para os espaçamentos de 4 e 12 cm, onde o aumento da velocidade e consequente diminuição do tempo de residência, afeta negativamente a eficiência global em ambos os precipitadores. No entanto, conforme evidenciado anteriormente, o espaçamento de 6 cm não seguiu esse padrão.

O espaçamento de 4 cm apresentou diferenças menos significativas com o aumento da velocidade, apresentando alterações sutis ao aumentar a velocidade de 2,9 para 3,9 cm/s. No entanto, o aumento da velocidade afetou fortemente o desempenho do precipitador P.I. ao se utilizar o espaçamento de 12 cm, com diminuição de até 32% na eficiência global ao se aumentar a velocidade de 1,9 cm/s para 2,9 cm/s no campo elétrico de 4,35 kV/cm e de 35% ao aumentar a velocidade de 2,9 cm/s para 3,9 cm/s no campo elétrico de 4,40 kV/cm. A influência de condições operacionais, como a velocidade, foi mais evidente ao aumentar o espaçamento. De fato, a razão N_{EHD}/Re^2 apresenta maiores variações com a velocidade no espaçamento de 12 cm do que no de 4 cm. Com isso, a blindagem eletrostática que ocorre no espaçamento de 4 cm gerou valores de corrente corona mais próximos entre as velocidades do que quando se utilizou 12 cm.

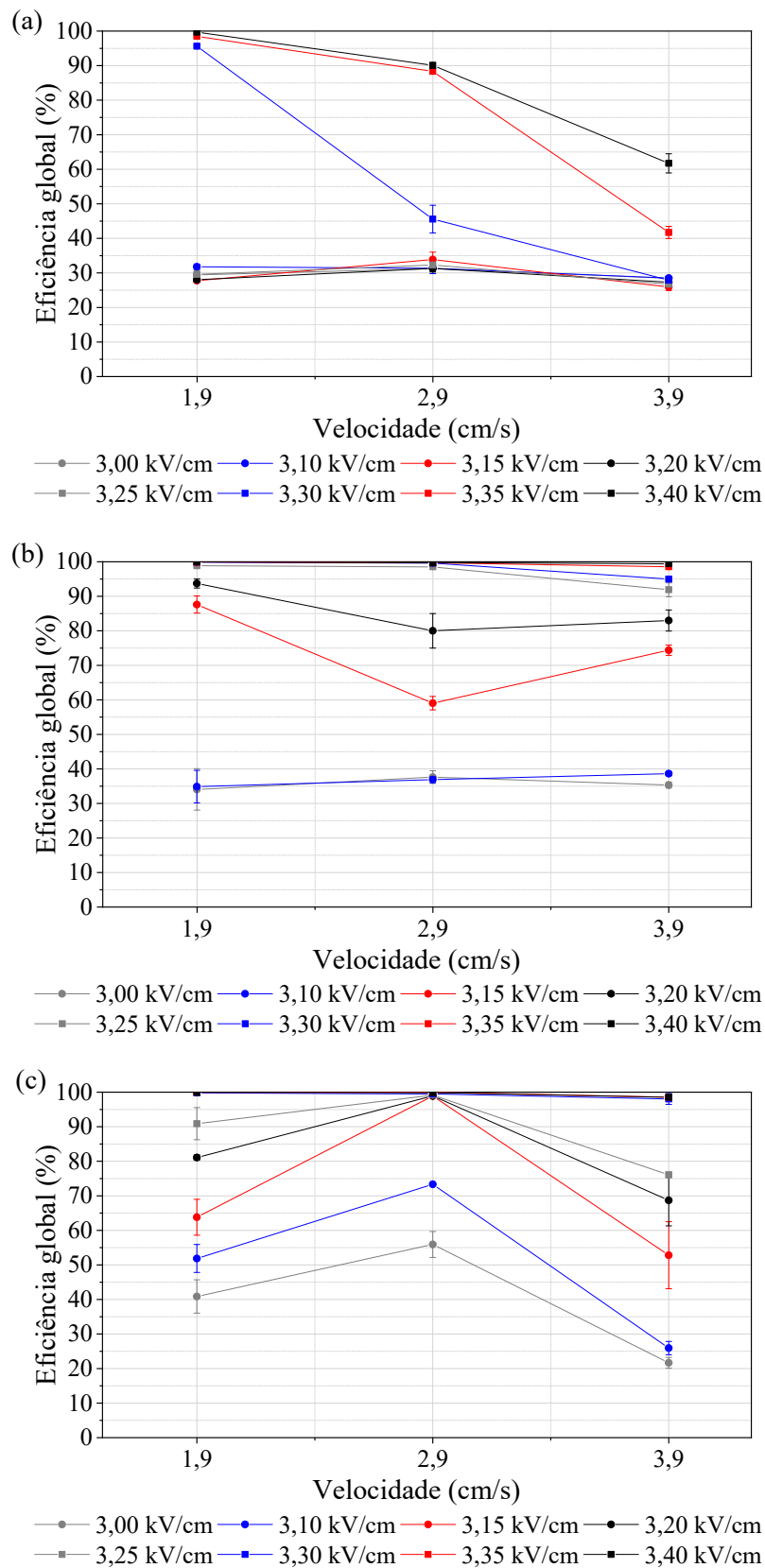
Realizando a mesma análise para o precipitador P.II., será utilizado os campos elétricos de 3,0 kV/cm, 3,1 kV/cm, 3,15 kV/cm, 3,20 kV/cm, 3,25 kV/cm, 3,3 kV/cm, 3,35 kV/cm e 3,4 kV/cm na verificação da influência da velocidade, dispostos na Figura 50. Novamente não foi observado um comportamento bem definido com o aumento da velocidade para os espaçamentos de 6 e 12 cm. Somente os testes realizados com espaçamento de 4 cm apresentou o comportamento típico de diminuição da eficiência com aumento da velocidade. Nesse espaçamento, os campos elétricos de 3,0 e 3,1 kV/cm apresentaram aumento da eficiência. No entanto, as diferenças foram sutis e podem estar relacionadas a esses campos não serem fortes o suficiente para carregar as partículas de modo que o tempo de residência pudesse afetar o processo.

Figura 49. Variação da eficiência global pela velocidade utilizando o precipitador com espaçamento de 4 cm (P.I.) com espaçamentos entre fios de: (a) 4 cm; (b) 6 cm; (c) 12 cm.



Fonte: Autor.

Figura 50. Variação da eficiência global pela velocidade utilizando o precipitador com espaçamento de 6,5 cm (P.II.) com espaçamentos entre fios de: (a) 4 cm; (b) 6 cm; (c) 12 cm.



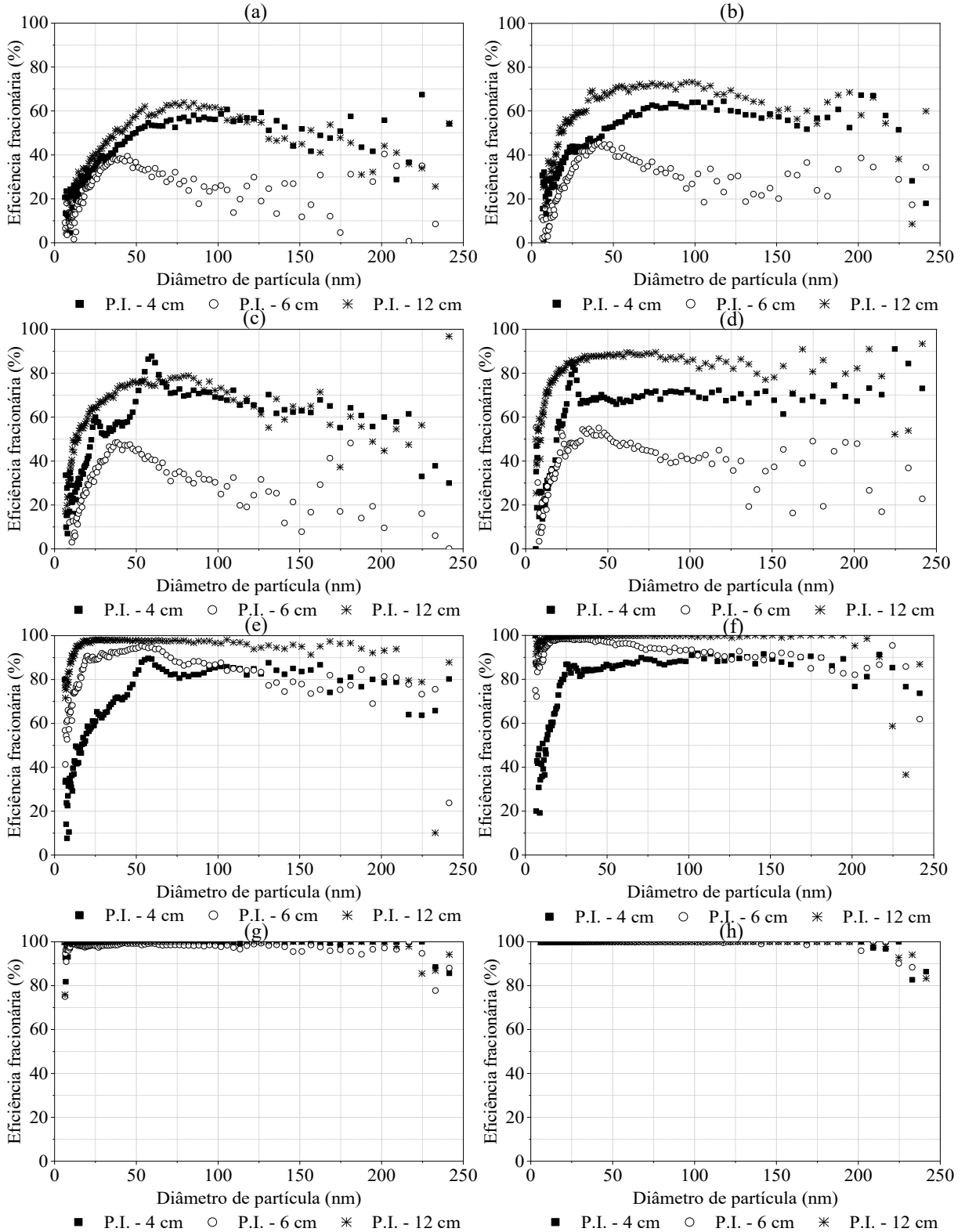
Fonte: Autor.

As explicações para as diferenças no espaçamento de 6 cm foram evidenciadas anteriormente no tópico referente aos espaçamentos entre placas. O comportamento anômalo apresentado por 12 cm evidenciou um aumento na eficiência com o aumento da velocidade de 1,9 para 2,9 cm/s, com uma grande queda ao aumentar novamente para 3,9 cm/s. Esse aumento da eficiência na coleta de partículas nanométricas também foi observado por Oliveira (2019), como evidenciado anteriormente. Com isso, a combinação desse parâmetro com a velocidade de 2,9 cm/s pode ter contribuído na coleta de nanopartículas no sentido do tempo de residência não ser baixo a ponto de não permitir o carregamento completo das partículas, nem alto o suficiente a ponto de haver reentrada de partículas (RIEHLE, 1997b).

As Figura 51, 52 e 53 explicita as eficiências fracionárias para os três espaçamentos entre fios no precipitador P.I. ao se utilizar os 8 campos elétricos mencionados anteriormente e nas velocidades de 1,9 cm/s, 2,9 cm/s e 3,9 cm/s, respectivamente. Nos menores valores de campo elétrico verifica-se a ocorrência de pontos de máxima eficiência, com posterior queda nos valores acima de 100 nm e aumento da dispersão dos dados. À medida que o campo elétrico se torna forte o suficiente as eficiências tendem a 100% com quedas nos menores e maiores diâmetros avaliados. Essa tendência das curvas também demonstram o efeito das forças elétricas na eficiência de coleta. De fato, os maiores valores da razão N_{EHD}/Re^2 ocorre nos maiores campos elétricos usados. Com isso, o aumento dessas forças permite carregar e coletar de forma eficiente inclusive as partículas maiores (OLIVEIRA; GUERRA, 2018).

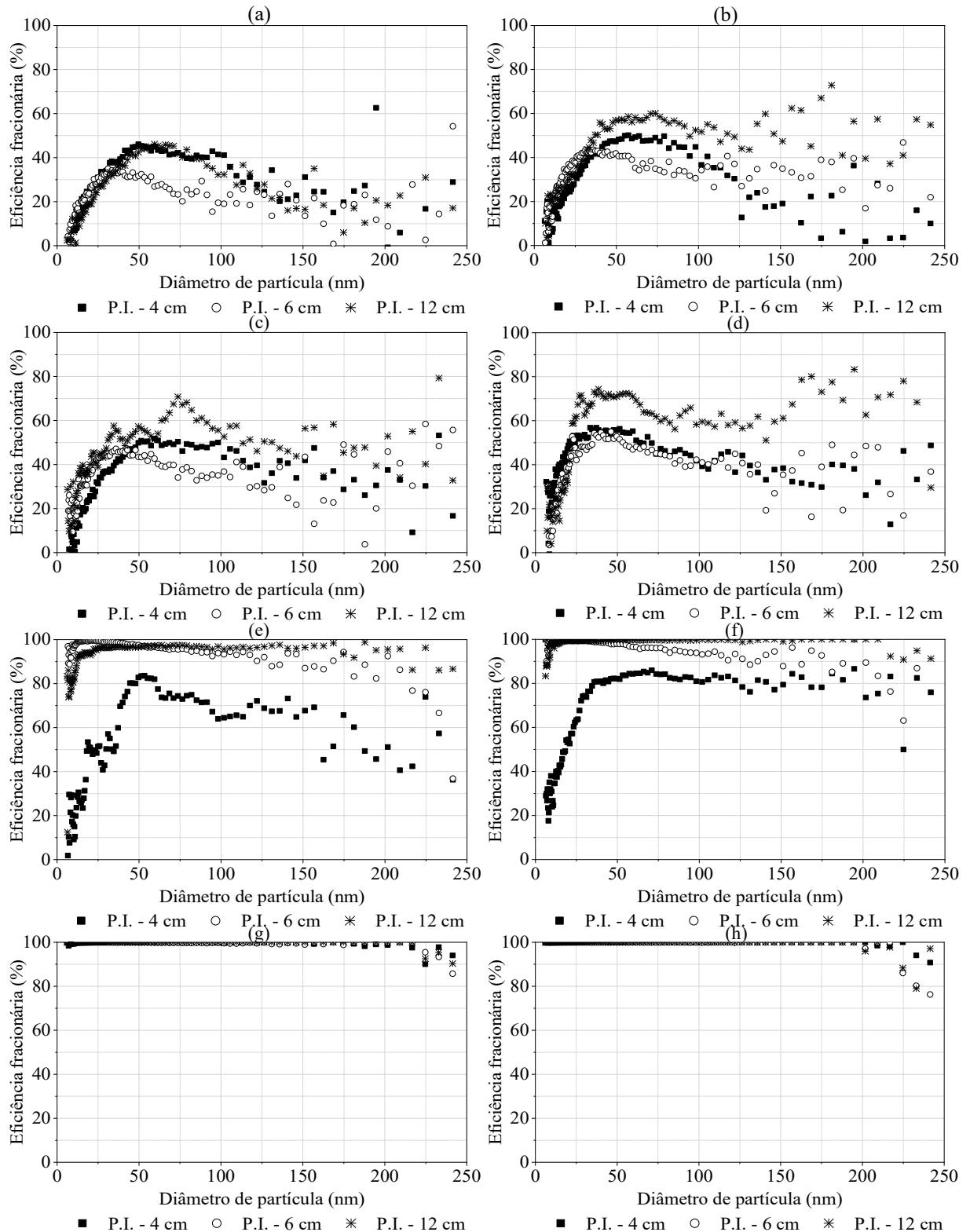
Diferentes pontos de máxima eficiência foram observados ao se variar o espaçamento entre fios, especialmente nas menores voltagens. A influência das forças elétricas em relação as viscosas (evidentes por N_{EHD}/Re^2) podem ser associados a esse fenômeno. Para o campo elétrico de 4,0 kV/cm, a utilização de espaçamentos de 6 cm proporcionou uma menor eficiência de coleta, com máximo de eficiência ocorrendo em 40, 33 e 29 nm nas velocidades de 1,9 cm/s, 2,9 cm/s e 3,9 cm/s, respectivamente. Como observado na Figura 51-a, Figura 52-a e Figura 53-a, esse ponto ocorreu em diâmetros de partículas menores em relação aos espaçamentos de 4 e 12 cm. Para esses dois valores, as eficiências fracionárias foram similares, com melhor performance do espaçamento de 12 cm na velocidade de 1,9 cm/s e acima de 50 nm ao aplicar a velocidade de 3,9 cm/s. Comportamentos similares, mas com aumento nas eficiências fracionárias, foram obtidos no campo elétrico de 4,25 kV/cm. Isso ocorre pela diminuição da blindagem (que como demonstrado anteriormente depende de fatores geométricos e operacionais) permitir a obtenção de campos elétricos que favoreçam a coleta de partículas menores que 20 nm e maiores que 100 nm.

Figura 51. Eficiências fracionárias para o precipitador P.I. com espaçamentos entre fios de 4, 6 e 12 cm ao se utilizar a velocidade de 1,9 cm/s e campos elétricos de: (a) 4,0 kV/cm; (b) 4,25 kV/cm; (c) 4,3 kV/cm; (d) 4,35 kV/cm; (e) 4,4 kV/cm; (f) 4,45 kV/cm; (g) 4,6 kV/cm; (h) 5,0 kV/cm.



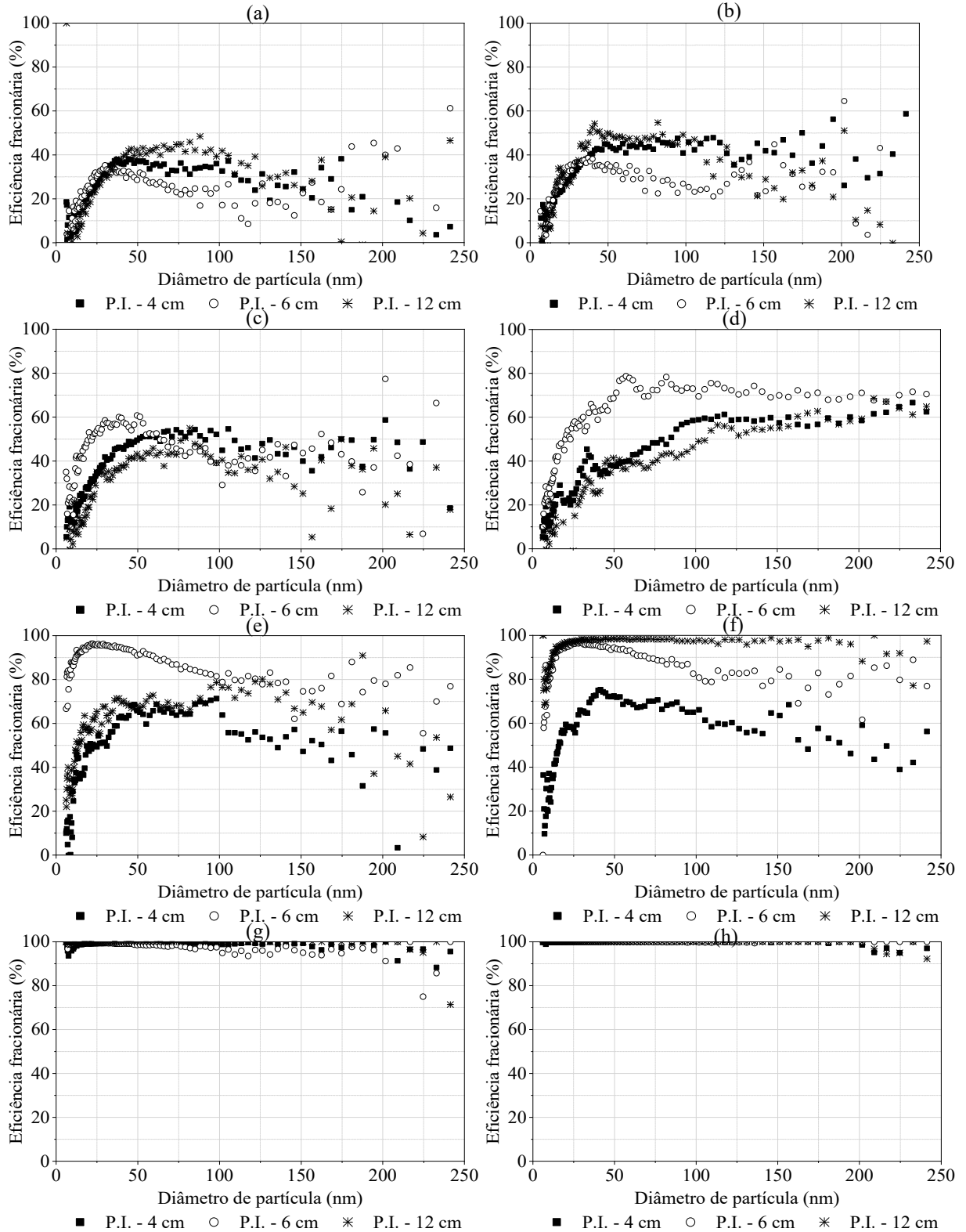
Fonte: Autor.

Figura 52. Eficiências fracionárias para o precipitador P.I. com espaçamentos entre fios de 4, 6 e 12 cm ao se utilizar a velocidade de 2,9 cm/s e campos elétricos de: (a) 4,0 kV/cm; (b) 4,25 kV/cm; (c) 4,3 kV/cm; (d) 4,35 kV/cm; (e) 4,4 kV/cm; (f) 4,45 kV/cm; (g) 4,6 kV/cm; (h) 5,0 kV/cm.



Fonte: Autor.

Figura 53. Eficiências fracionárias para o precipitador P.I. com espaçamentos entre fios de 4, 6 e 12 cm ao se utilizar a velocidade de 3,9 cm/s e campos elétricos de: (a) 4,0 kV/cm; (b) 4,25 kV/cm; (c) 4,3 kV/cm; (d) 4,35 kV/cm; (e) 4,4 kV/cm; (f) 4,45 kV/cm; (g) 4,6 kV/cm; (h) 5,0 kV/cm.



Fonte: Autor.

Dessa forma, diferente dos espaçamentos entre fios de 4 e 12 cm, o uso do espaçamento de 6 cm aliado a baixos valores de campo elétrico e ao efeito da blindagem eletrostática, não proporcionou forças suficientes para carregarem as partículas maiores, observado pela rápida queda na eficiência a partir do ponto de máximo nessas curvas. Esse é um comportamento interessante, já que se esperava que o espaçamento de 4 cm tivesse uma maior influência da blindagem.

Verificou-se tendências anômalas nas curvas de eficiência fracionária, com vários pontos de máxima eficiência ao se aplicar campos elétricos entre 4,3 e 4,4 kV/cm nas velocidades de 1,9 e 2,9 cm/s, enquanto para velocidade de 3,9 cm/s apenas em 4,4 kV/cm. O espaçamento de 4 cm, na velocidade de 1,9 cm/s, apresentou picos elevados em 25 e 58 nm em 4,3 kV/cm, 29 nm em 4,35 kV/cm e 57 nm para 4,4 kV/cm com um segundo pico menor em 37 nm. Em contraste, o espaçamento de 6 cm seguiu a tendência esperada e o de 12 cm evidenciou altas eficiências. Na velocidade de 2,9 cm/s, o espaçamento de 12 cm demonstrou essas anomalias nas Figuras 52-c e Figura 52-d, com até três picos em 35, 50 e 73 nm no campo elétrico de 4,3 kV/cm e diminuição dessa tendência em 4,4 cm/s. Já na velocidade de 3,9 cm, o espaçamento de 6 cm apresentou formações de picos em 4,35 kV/cm (Figura 53-d), com até quatro máximos locais em 56, 82, 109 e 135 nm. É possível que os vórtices locais formados devido à interação entre o fluxo de íons e o fluxo de gás, associados ao efeito do tamanho das partículas na mobilidade elétrica e no número de cargas adquiridas em seu volume, tenham levado a esses resultados nestas configurações e condições operacionais (OLIVEIRA, 2019).

De qualquer forma, nos maiores campos elétricos demonstrados, obteve-se alta eficiência para a maioria dos diâmetros de partículas avaliados neste estudo. Uma queda na eficiência é observada para partículas menores que 10 nm e para partículas superiores a 120 nm. Isso está associado a um pequeno número de partículas nessas faixas, como evidenciado anteriormente.

Estudos envolvendo a influência do espaçamento de fios na eficiência da coleta de ESP geralmente avaliam micropartículas ou um tamanho que varia de nano a micropartículas ((EL DEIN; USAMA, 2014; KASDI, 2016; LU *et al.*, 2017). Assim, a investigação apenas na faixa nanométrica é necessária, uma vez que o carregamento das partículas ocorre de forma diferente para partículas maiores. Isso permite escolher espaçamentos de fios (como os 12 cm) que proporcionam eficiência tão boa quanto usar espaçamentos menores ou verificar qual condição forneceria menores custos operacionais. Demais explicações sobre os pontos de máxima

eficiência e quedas a partir de 120 nm já foram realizadas anteriormente.

Para o precipitador P.II., as Figuras 54, 55 e 56 explicita as eficiências fracionárias para os três espaçamentos entre placas no precipitador P.I. ao se utilizar os 8 campos elétricos mencionados anteriormente e nas velocidades de 1,9 cm/s, 2,9 cm/s e 3,9 cm/s, respectivamente.

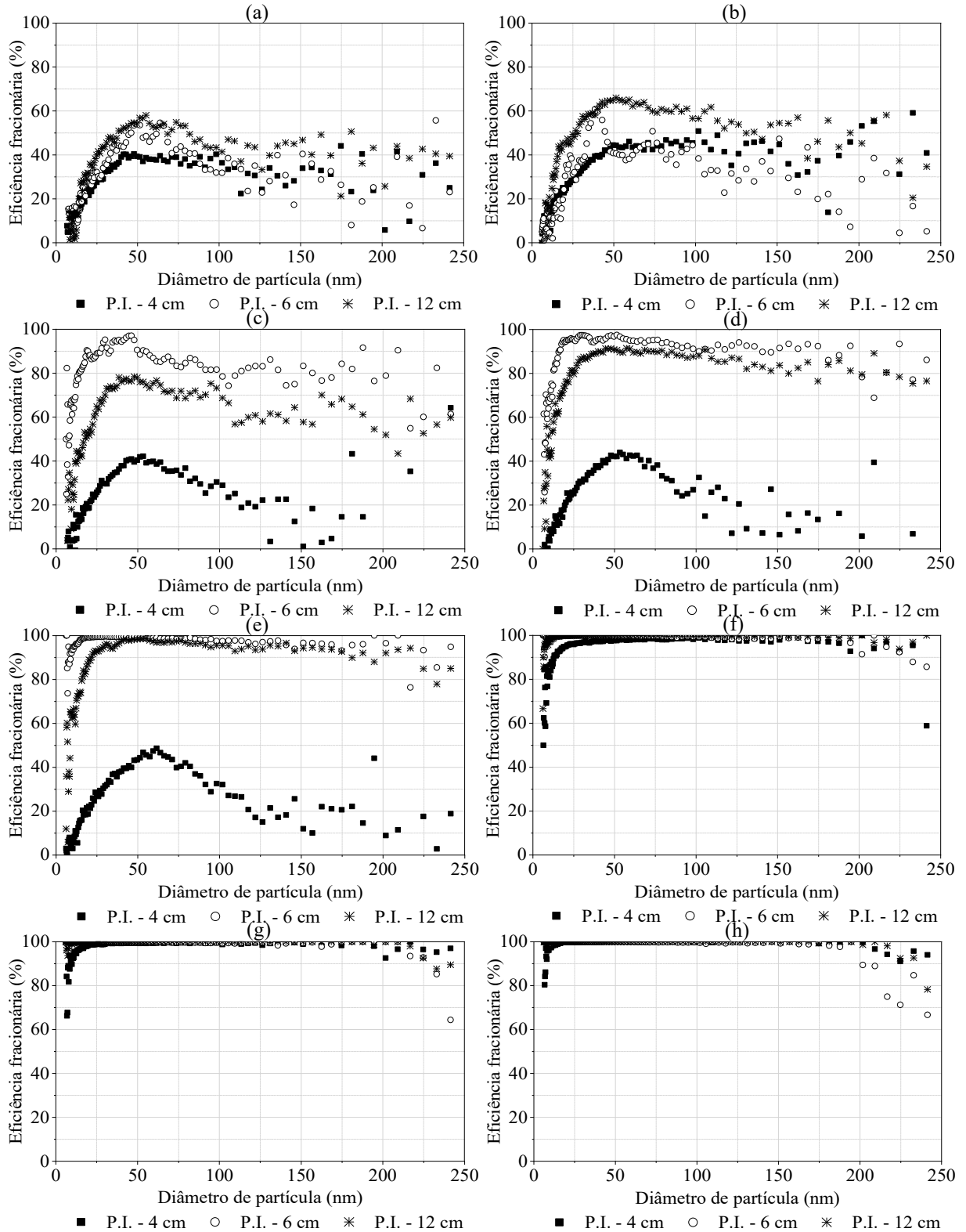
Assim como para o precipitador P.I., o P.II. também apresentou máximos de eficiência em torno de 40 nm e queda com dispersão dos dados a partir de 100 nm. No entanto, o espaçamento de 6 cm demonstrou esses picos em 20 nm em 3,20 kV/cm em todas as velocidades. Outros campos elétricos, principalmente em 3,9 cm/s, também demonstraram esse comportamento, como em 3,15 kV/cm, 3,25 kV/cm e 3,3 kV/cm.

Tendências anômalas nas curvas de eficiência fracionária também foram evidenciadas. Na velocidade de 1,9 cm/s, espaçamento de 6 cm e campo elétrico de 3,15 kV/cm (Figura 54-c), observou-se picos em 19 e 45 nm. Já para 2,9 cm/s e 3,1 kV/cm, um grande pico foi demonstrado em torno de 30 nm no espaçamento de 12 cm. Isso também foi observado em torno de 18 nm para o espaçamento de 6 cm na velocidade de 3,9 cm/s e 3,2 kV/cm (Figura 56-d).

É importante salientar que as curvas tendem a apresentar maiores diferenças com o aumento do campo elétrico aplicado, devido a campos baixos serem insuficiente para promover um carregamento eficiente e a medida que se aplica uma maior tensão, o carregamento e os efeitos da blindagem eletrostática ficam mais evidentes.

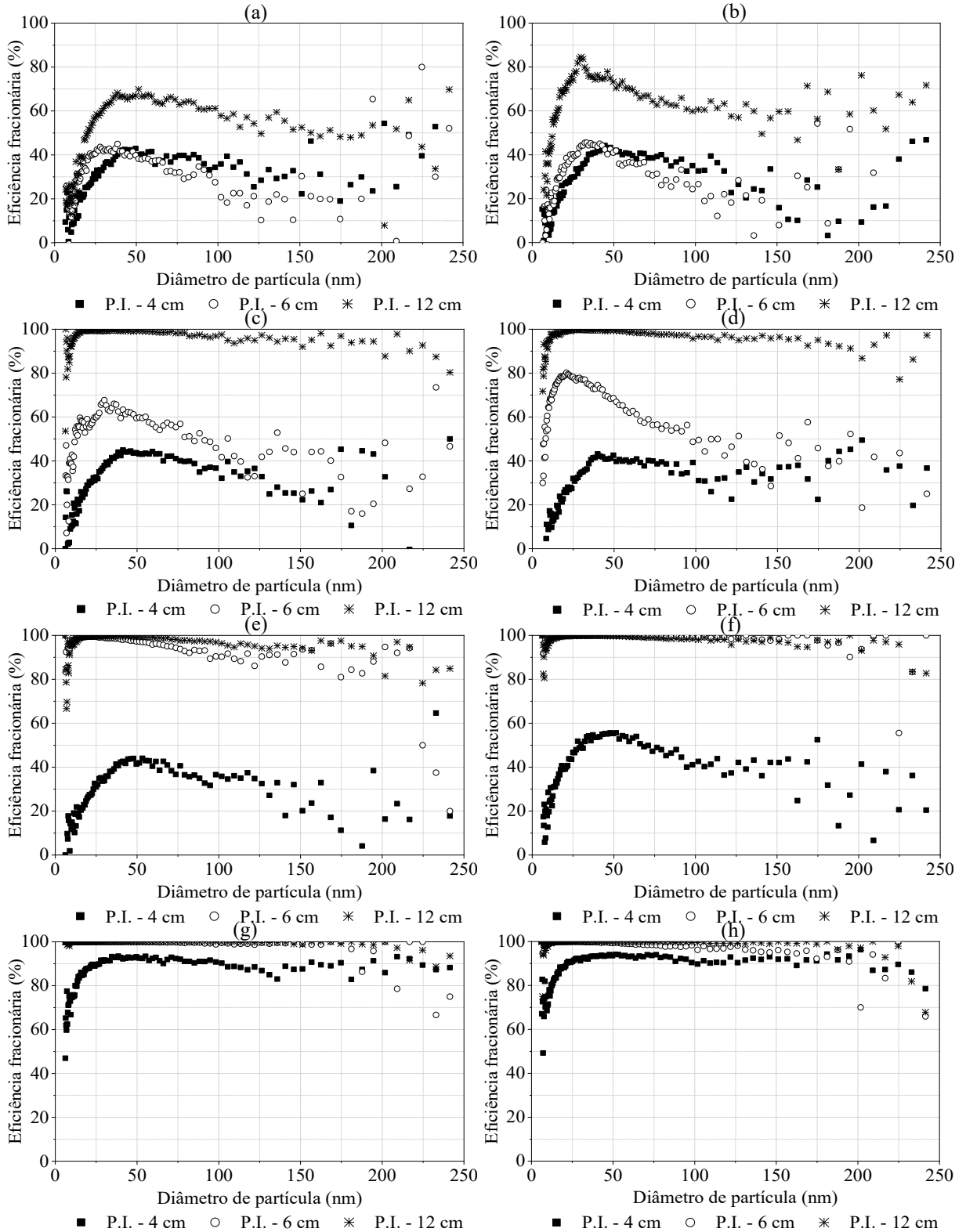
Em geral, maiores espaçamentos demonstraram melhores eficiências na faixa de tamanho avaliada, com diferenças mais significativas na velocidade de 3,9 cm/s. Andrade (2020) também avaliou um precipitador com espaçamento entre placas de 6,5 cm com espaçamentos entre fios de 6,5 e 12 cm. Assim como observado nesse trabalho, nos menores campos elétricos o aumento dos valores desse parâmetro geométrico não alterou significativamente as eficiências obtidas. No entanto, para os campos elétricos de 3,23 e 3,38 kV/cm, favoreceu a coleta de partículas. Além disso, como demonstrado por Chang e Bai (2000), em maiores campos elétricos, as eficiências tendem a valores acima de 99%, e o aumento do espaçamento não se apresenta significante.

Figura 54. Eficiências fracionárias para o precipitador P.II. com espaçamentos entre fios de 4, 6 e 12 cm ao se utilizar a velocidade de 1,9 cm/s e campos elétricos de: (a) 3,0 kV/cm; (b) 3,1 kV/cm; (c) 3,15 kV/cm; (d) 3,20 kV/cm; (e) 3,25 kV/cm; (f) 3,3 kV/cm; (g) 3,35 kV/cm; (h) 3,4 kV/cm.



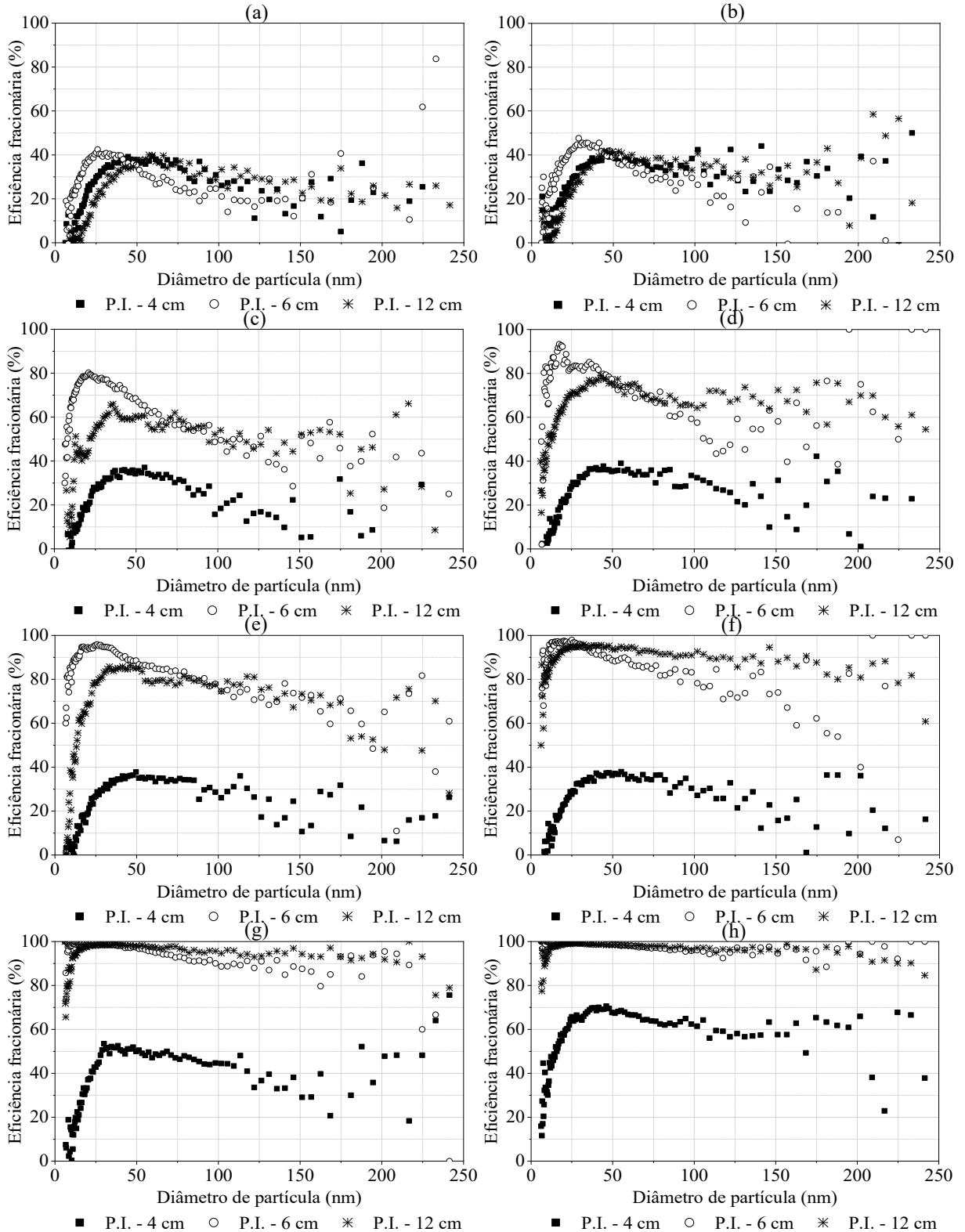
Fonte: Autor.

Figura 55. Eficiências fracionárias para o precipitador P.II. com espaçamentos entre fios de 4, 6 e 12 cm ao se utilizar a velocidade de 2,9 cm/s e campos elétricos de: (a) 3,0 kV/cm; (b) 3,1 kV/cm; (c) 3,15 kV/cm; (d) 3,20 kV/cm; (e) 3,25 kV/cm; (f) 3,3 kV/cm; (g) 3,35 kV/cm; (h) 3,4 kV/cm.



Fonte: Autor.

Figura 56. Eficiências fracionárias para o precipitador P.II. com espaçamentos entre fios de 4, 6 e 12 cm ao se utilizar a velocidade de 3,9 cm/s e campos elétricos de: (a) 3,0 kV/cm; (b) 3,1 kV/cm; (c) 3,15 kV/cm; (d) 3,20 kV/cm; (e) 3,25 kV/cm; (f) 3,3 kV/cm; (g) 3,35 kV/cm; (h) 3,4 kV/cm.



Fonte: Autor.

5.4. Análise estatística

Nessa subseção serão apresentados os resultados da análise estatística referente os testes de avaliação do espaçamento entre placas e espaçamento entre fios, onde serão discutidas as influências dos parâmetros individuais e suas interações. Para cada etapa de estudo foram escolhidas as condições operacionais e geométricas para a realização da análise estatística, que serão descritas em suas respectivas subseções.

5.4.1. Avaliação do espaçamento entre placas, velocidade e campo elétrico

Para avaliação estatística foi realizado um planejamento fatorial com dois níveis e três fatores (2^3), considerando os testes realizados em triplicadas. Conforme metodologia simplificada na Tabela 5, o espaçamento entre placas foi decisivo nessa escolha, já que é necessário que os fatores possuam o mesmo número de níveis e foram avaliados apenas dois nesse fator (4 e 6,5 cm). Os extremos das velocidades avaliadas nesse estudo foram empregados, ou seja, de 1,9 e 3,9 cm/s. Para se avaliar ambas regiões que ocorre o aumento brusco de eficiência, explicado no tópico “5.2. Avaliação da influência do espaçamento entre placas”, foram realizados dois planejamentos. O primeiro avaliando o campo elétrico entre 3,0 e 4,0 kV/cm e o segundo avaliando entre 4,0 e 5,0 kV/cm.

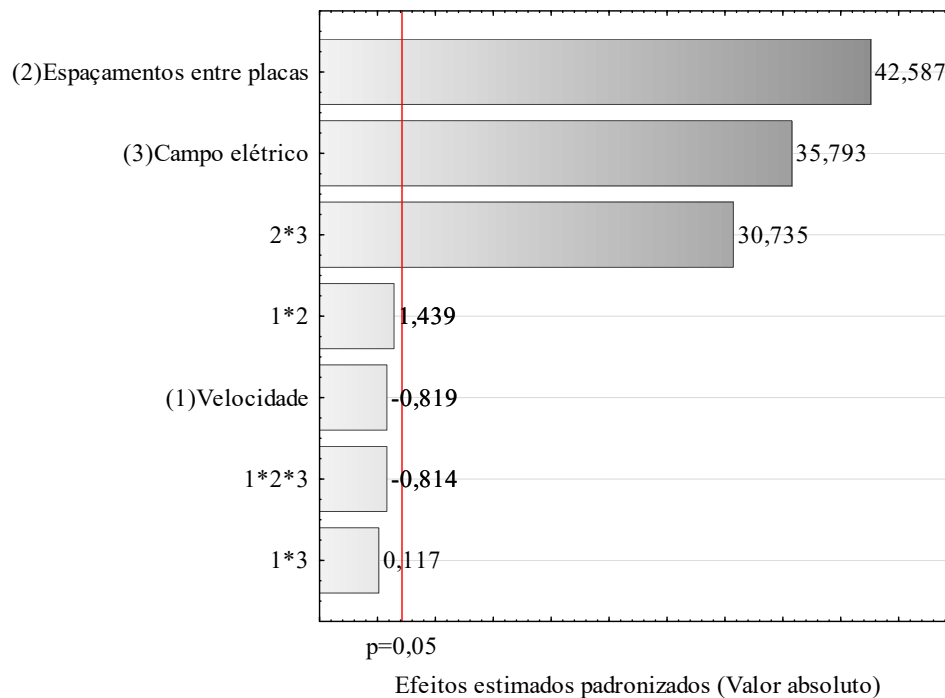
A Tabela 12 demonstra os valores para os efeitos estimados para cada fator analisado bem como os efeitos combinados entre os fatores. É importante salientar que um parâmetro foi considerado estatisticamente significativo quando os valores de p (grau de significância estatística) são menores que 0,05. Isso é obtido pela decisão de se utilizar um grau de confiança de 95% nesse estudo. Os dados em vermelho são referentes aos valores considerados significativos, ou seja, o espaçamento entre placas e campo elétrico foram considerados influentes na eficiência global de coleta, bem como o efeito combinado entre eles ($2*3$). Além disso, a velocidade não foi estatisticamente significativa como esperado pelas análises anteriores, sendo esse fato associado a pequena faixa de velocidade e aos baixos valores empregados nesse estudo. Essas informações podem ser melhor visualizadas pelo diagrama de Pareto na Figura 57, onde efeitos significativos são os que ultrapassam a reta de $p=0,05$.

Tabela 12. Efeito estimado, erro padrão, valor de t e grau de significância estatística (p) para o planejamento fatorial com campo elétrico de 3,0 e 4,0 kV/cm

| Fatores | Efeito | Erro Padrão | t (16) | p |
|-------------------------------|----------|-------------|----------|----------|
| Média | 46,43474 | 0,490487 | 94,67075 | 0,000000 |
| (1) Velocidade | -0,80361 | 0,980973 | -0,81920 | 0,424709 |
| (2) Espaçamentos entre placas | 41,77695 | 0,980973 | 42,58724 | 0,000000 |
| (3) Campo elétrico | 35,11198 | 0,980973 | 35,79300 | 0,000000 |
| 1*2 | 1,41243 | 0,980973 | 1,43982 | 0,169196 |
| 1*3 | 0,11508 | 0,980973 | 0,11731 | 0,908073 |
| 2*3 | 30,15017 | 0,980973 | 30,73496 | 0,000000 |
| 1*2*3 | -0,79869 | 0,980973 | -0,81418 | 0,427494 |

Fonte: Autor.

Figura 57. Diagrama de Pareto referente aos resultados do planejamento fatorial com campo elétrico de 3,0 e 4,0 kV/cm.



Fonte: Autor.

Analisando os efeitos obtidos para cada fator, tem-se que o aumento do espaçamento entre placas proporciona um aumento de cerca de 42%, quando se utiliza espaçamento entre fios de 6 cm e campos elétricos entre 3,0 e 4,0 kV/cm. Esse aumento da tensão aplicada pode

proporcionar um aumento de cerca de 35% na eficiência global. Por fim, o efeito combinado entre o espaçamento entre placas e o campo elétrico proporcionou um efeito significativo sob a eficiência de coleta de nanopartículas, ocorrendo o aumento de quase 30% nesse processo.

Para avaliar se o modelo obtido é preditivo, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com os dados obtidos para esse planejamento experimental (Tabela 13). Para avaliar a adequação de um modelo deve-se levar em consideração principalmente os erros gerados entre os valores preditos e observados. Além disso, deve-se assumir que as variáveis são aleatórias com média zero, variância constante e distribuição normal (MONTGOMERY; RUNGER, 2014). Para contribuir com a análise, o termo falta de ajuste foi calculado pela diferença entre os valores da regressão dos fatores, o erro puro e a soma quadrática total. Como esse termo apresentou valor nulo, pode-se dizer que os fatores foram preditos corretamente, com um valor de R^2 de 0,99606 e média quadrática residual de 5,77.

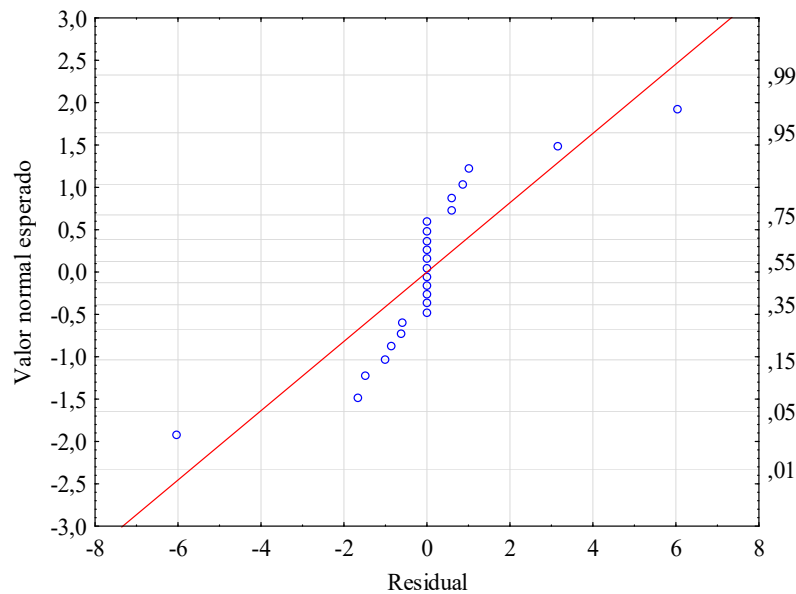
Tabela 13. Análise de variância do modelo ajustado para o planejamento fatorial com campo elétrico de 3,0 e 4,0 kV/cm

| Fator | Soma Quadrática | Graus de Liberdade | Média Quadrática | F | p |
|-------------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|----------|----------|
| (1) Velocidade | 3,87 | 1 | 3,87 | 0,671 | 0,424709 |
| (2) Espaçamentos entre placas | 10471,88 | 1 | 10471,88 | 1813,673 | 0,000000 |
| (3) Campo elétrico | 7397,11 | 1 | 7397,11 | 1281,139 | 0,000000 |
| 1*2 | 11,97 | 1 | 11,97 | 2,073 | 0,169196 |
| 1*3 | 0,08 | 1 | 0,08 | 0,014 | 0,908073 |
| 2*3 | 5454,20 | 1 | 5454,20 | 944,638 | 0,000000 |
| 1*2*3 | 3,83 | 1 | 3,83 | 0,663 | 0,427494 |
| Falta de ajuste | 0 | 0 | 0 | | |
| Erro | 92,38 | 16 | 5,77 | - | - |
| Soma quadrática total | 23435,32 | 23 | - | - | - |

Fonte: Autor.

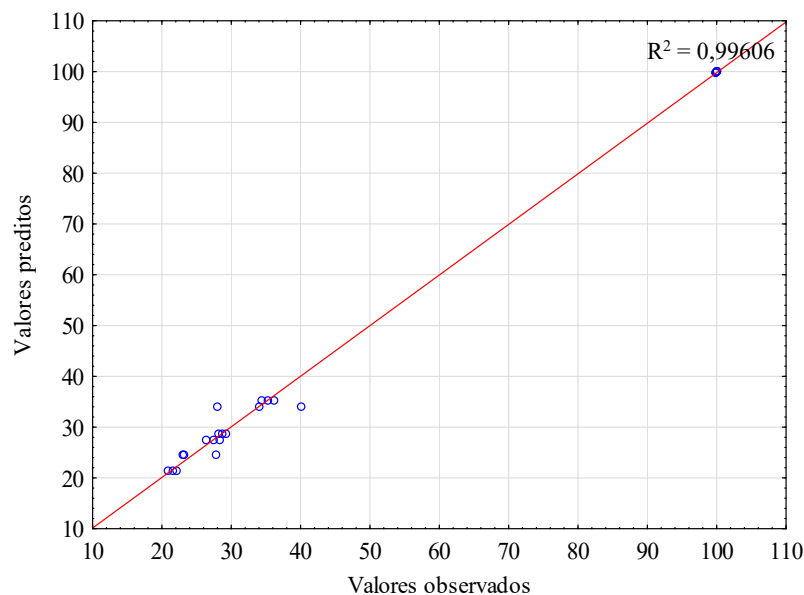
Para observar a normalidade dos resíduos é importante avaliar o gráfico de probabilidade normal dos resíduos (Figura 58) a fim de verificar se os erros seguem uma distribuição normal com 95% dos erros padronizados no intervalo entre [-2, +2] (MONTGOMERY; RUNGER, 2014).

Figura 58. Gráfico de probabilidade normal dos resíduos referente aos resultados do planejamento fatorial com campo elétrico de 3,0 e 4,0 kV/cm.



Fonte: Autor.

Figura 59. Valores de eficiência preditos versus observados para planejamento fatorial com campo elétrico de 3,0 e 4,0 kV/cm.



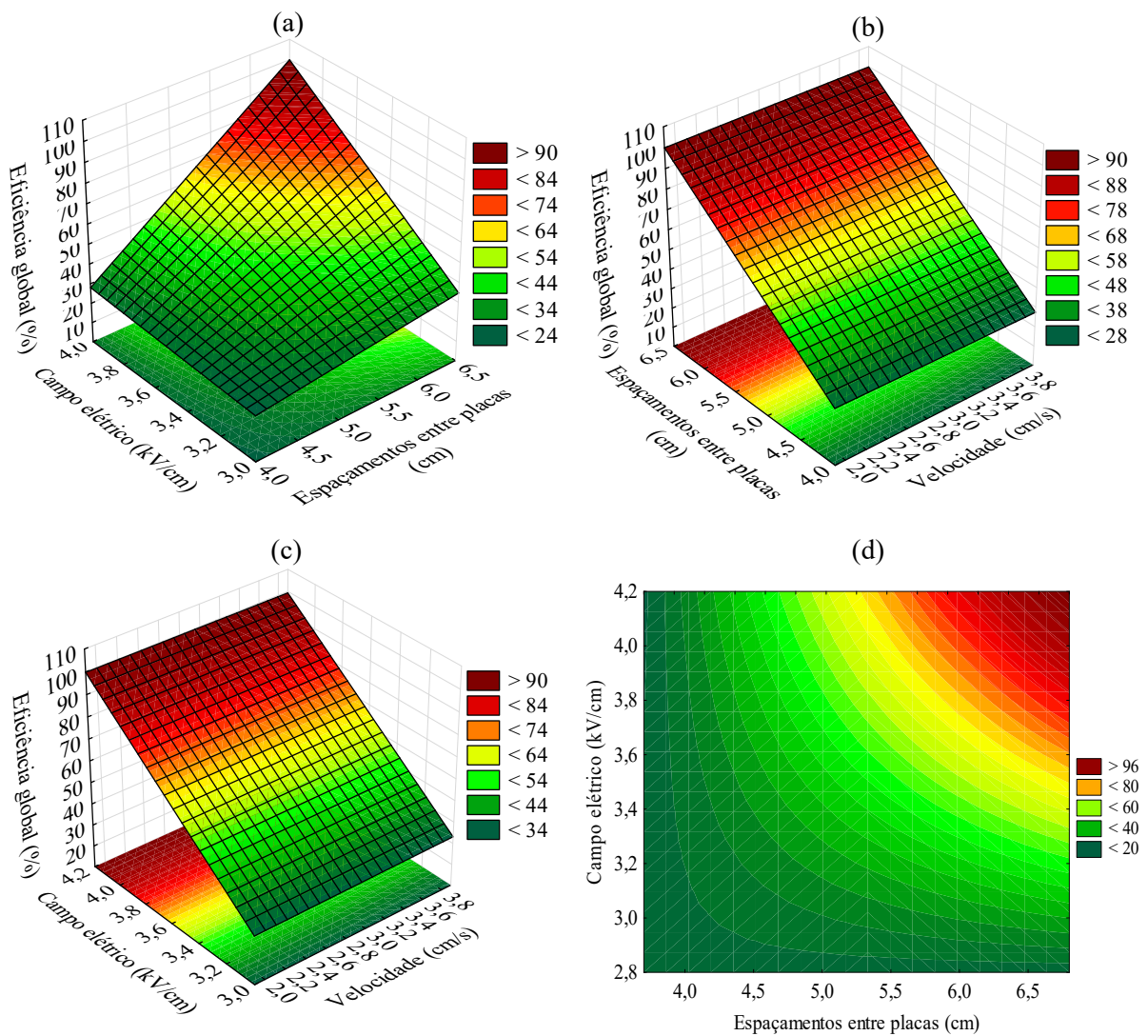
Fonte: Autor.

Observa-se que a maioria dos resíduos se manteve no valor zero, não seguindo a linha normal. No entanto, ao se observar o gráfico dos valores observados e preditos (Figura 59), verifica-se que eles seguem uma tendência linear, como previsto pelo modelo, resultando em

um ajuste satisfatório aos dados experimentais.

Dessa forma, foi possível plotar a superfície de resposta em função do espaçamento entre placas e campo elétrico (Figura 60). Como a velocidade não foi estatisticamente significativa, a superfície de resposta não foi discutida nessa análise e apenas demonstradas para conhecimento. Para verificar melhor o comportamento das variáveis espaçamento entre placas e campo elétrico, também plotou-se um gráfico de contorno (Figura 60-d).

Figura 60. Superfícies de resposta referentes aos resultados do planejamento fatorial com campo elétrico de 3,0 e 4,0 kV/cm em função de: (a) campo elétrico e espaçamento entre placas; (b) velocidade e espaçamento entre placas; (c) campo elétrico e velocidade; (d) gráfico de contorno para campo elétrico e espaçamento entre placas.



Fonte: Autor.

De forma mais clara, percebe-se que nos menores espaçamentos entre placas e campos elétricos a eficiência apresenta valores baixos. Devido ao efeito combinado entre esses parâmetros, verifica-se um comportamento curvo na superfície de resposta e gráfico de contornos. Com altos valores de campo elétrico e quando o gráfico tende ao espaçamento de 6,5 cm, observa-se que a eficiência se mantém alta, com valores acima de 96%, como demonstrado nos tópicos anteriores.

A mesma análise foi realizada no segundo planejamento, mas utilizando como menor e maior níveis de campos elétricos, respectivamente, 4,0 e 5,0 kV/cm. A Tabela 14 demonstra os valores para os efeitos estimados para cada fator analisado bem como os efeitos combinados entre os fatores.

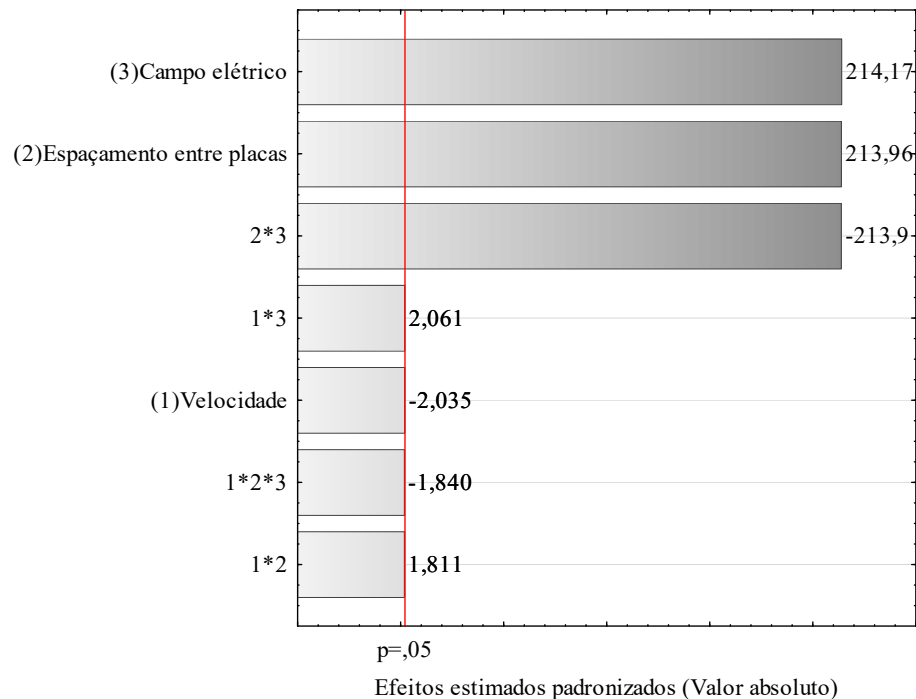
Tabela 14. Efeito estimado, erro padrão, valor de t e grau de significância estatística (p) para o planejamento fatorial com campo elétrico de 4,0 e 5,0 kV/cm

| Fatores | Efeito | Erro Padrão | t (16) | p |
|-------------------------------|---------------|--------------------|---------------|----------|
| Média | 81,9918 | 0,084049 | 975,529 | 0,000000 |
| (1) Velocidade | -0,3421 | 0,168097 | -2,035 | 0,058767 |
| (2) Espaçamentos entre placas | 35,9670 | 0,168097 | 213,965 | 0,000000 |
| (3) Campo elétrico | 36,0022 | 0,168097 | 214,175 | 0,000000 |
| 1*2 | 0,3044 | 0,168097 | 1,811 | 0,089011 |
| 1*3 | 0,3465 | 0,168097 | 2,061 | 0,055941 |
| 2*3 | -35,9602 | 0,168097 | -213,925 | 0,000000 |
| 1*2*3 | -0,3094 | 0,168097 | -1,840 | 0,084327 |

Fonte: Autor.

A influência positiva do aumento do espaçamento entre placas e campo elétrico também foram observadas na eficiência global de coleta de nanopartículas, bem como o efeito combinado entre eles (2*3). No entanto, diferente do primeiro planejamento, o efeito foi negativo nesse caso. Novamente, a velocidade não foi estatisticamente significativa, com efeito ainda menor nessa faixa de campo elétrico ao se comparar com a análise anterior. O diagrama de Pareto, na Figura 61, permite melhor visualização dos efeitos estatisticamente significativos, ou seja, os que ultrapassam o valor da reta de $p=0,05$.

Figura 61. Diagrama de Pareto referente aos resultados do planejamento fatorial com campo elétrico de 4,0 e 5,0 kV/cm.



Fonte: Autor.

Analisando os efeitos obtidos para cada fator, tem-se que o aumento do espaçamento entre placas proporcionou um aumento de cerca de 35%, quando se utiliza espaçamento entre fios de 6 cm e campos elétricos entre 4,0 e 5,0 kV/cm. Esse aumento da tensão aplicada pode proporcionar um aumento de cerca de 36% na eficiência global. A influência do espaçamento entre placas foi menor devido a avaliação de uma maior faixa de campo elétrico. Isso ocorre porque a tensão aplicada começa a ser forte o suficiente para permitir um bom carregamento das partículas, em ambos os espaçamentos entre placas utilizados. Por fim, o efeito combinado entre o espaçamento entre placas e o campo elétrico proporcionou um efeito significativo sob a eficiência de coleta de nanopartículas, ocorrendo um decréscimo de cerca de 35% nesse processo. Essa alteração estatística na influência desses parâmetros combinados será melhor avaliada posteriormente, com base na superfície de resposta.

Para avaliar se o modelo obtido é preditivo, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com os dados obtidos para esse planejamento experimental (Tabela 15). Como a falta de ajuste apresentou valor nulo, pode-se dizer que os fatores foram preditos corretamente, com um valor de R^2 de 0,99988 e média quadrática residual de 0,1695.

Tabela 15. Análise de variância do modelo ajustado para o planejamento fatorial com campo elétrico de 4,0 e 5,0 kV/cm

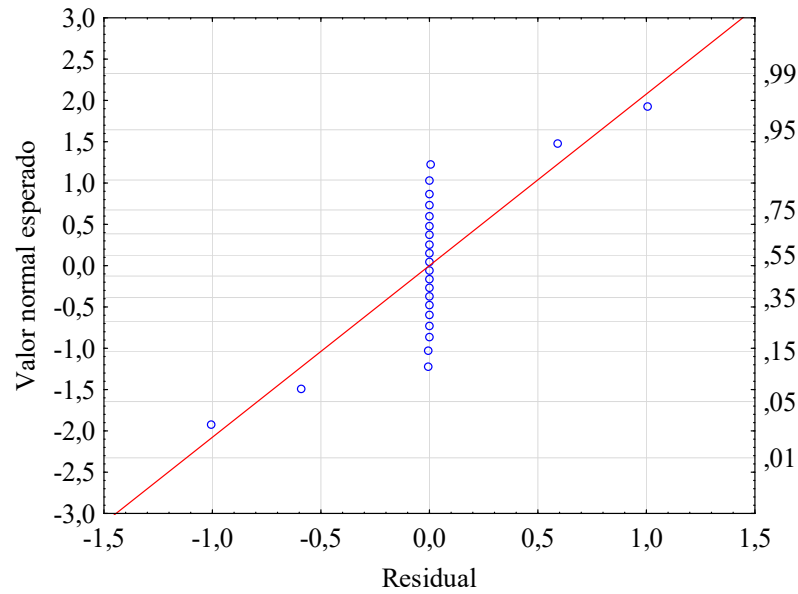
| Fator | Soma Quadrática | Graus de Liberdade | Média Quadrática | F | p |
|-------------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| (1) Velocidade | 0,70 | 1 | 0,702 | 4,14 | 0,058767 |
| (2) Espaçamentos entre placas | 7761,73 | 1 | 7761,732 | 45781,18 | 0,000000 |
| (3) Campo elétrico | 7776,94 | 1 | 7776,943 | 45870,89 | 0,000000 |
| 1*2 | 0,56 | 1 | 0,556 | 3,28 | 0,089011 |
| 1*3 | 0,72 | 1 | 0,720 | 4,25 | 0,055941 |
| 2*3 | 7758,80 | 1 | 7758,800 | 45763,88 | 0,000000 |
| 1*2*3 | 0,57 | 1 | 0,574 | 3,39 | 0,084327 |
| Falta de ajuste | 0,01 | 0 | 0 | | |
| Erro | 2,71 | 16 | 0,170 | - | - |
| Soma quadrática total | 23302,74 | 23 | - | - | - |

Fonte: Autor.

Pelo gráfico de probabilidade normal dos resíduos (Figura 62), a maioria dos resíduos se manteve no valor zero, não seguindo a linha normal. No entanto, novamente ao se observar o gráfico dos valores observados e preditos (Figura 63), verifica-se que eles seguem uma tendência linear, como previsto pelo modelo, resultando em um ajuste satisfatório do modelo aos dados experimentais.

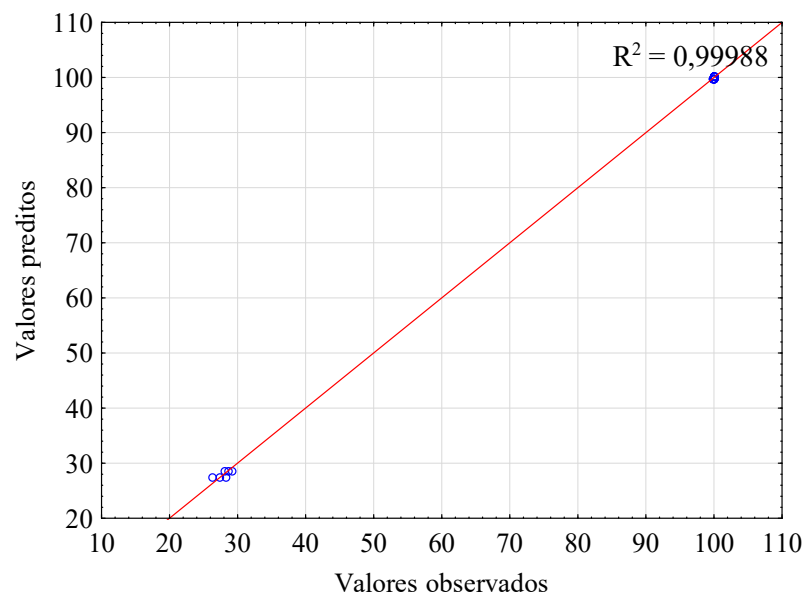
A superfície de resposta em função do espaçamento entre placas, campo elétrico e velocidade estão demonstradas na Figura 64. Novamente, como a velocidade não foi estatisticamente significativa, as superfícies de resposta não foram discutidas nessa análise, apenas demonstradas para conhecimento. Para verificar melhor o comportamento das variáveis espaçamento entre placas e campo elétrico, também plotou-se um gráfico de contorno (Figura 64-d). De forma mais clara, percebe-se que nos maiores espaçamentos entre placas e campos elétricos a eficiência apresenta valores altos e estatisticamente semelhantes. Devido a essa diferença, causada pelo maior valor de campo elétrico aplicado nesse estudo (5,0 kV/cm) ser avaliada nesse planejamento, o efeito combinado entre esses parâmetros foi negativo e diferente da primeira análise estatística. Dessa forma, o espaçamento de 6,5 cm apresentou altas eficiências independente do campo elétrico e o campo elétrico de 5,0 kV/cm foi estatisticamente suficiente para promover uma alta eficiência de coleta.

Figura 62. Gráfico de probabilidade normal dos resíduos referente aos resultados do planejamento fatorial com campo elétrico de 4,0 e 5,0 kV/cm.



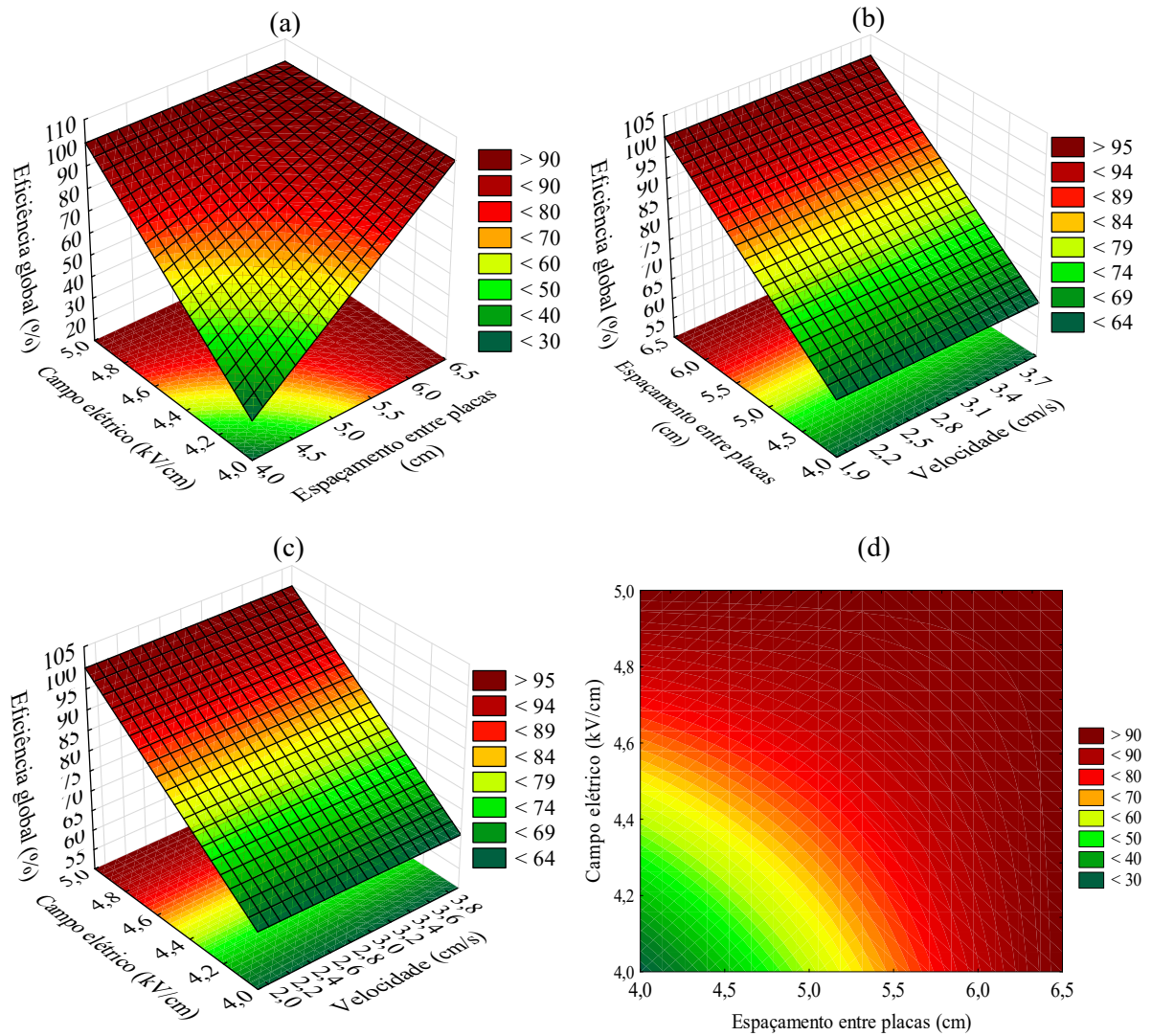
Fonte: Autor.

Figura 63. Valores de eficiência preditos versus observados para planejamento fatorial com campo elétrico de 4,0 e 5,0 kV/cm.



Fonte: Autor.

Figura 64. Superfícies de resposta referentes aos resultados do planejamento fatorial com campo elétrico de 3,0 e 4,0 kV/cm em função de: (a) campo elétrico e espaçamento entre placas; (b) velocidade e espaçamento entre placas; (c) campo elétrico e velocidade; (d) gráfico de contornos para campo elétrico e espaçamento entre placas.



Fonte: Autor.

5.4.2. Avaliação do espaçamento entre fios, espaçamento entre placas, velocidade e campo elétrico

Para avaliação estatística foi realizado um planejamento fatorial com dois níveis e quatro fatores (2^4), considerando os testes realizados em triplicadas. Como o espaçamento entre

fios utilizado nesse estudo (4, 6 e 12 cm) não estavam igualmente espaçados, foi necessário utilizar apenas dois níveis. Dessa forma, foi realizado dois planejamentos de experimentos, o primeiro com espaçamentos de 4 e 12 cm e o segundo considerando 6 e 12 cm, conforme metodologia simplificada na Tabela 6. Os extremos das velocidades avaliadas nesse estudo foram empregados, ou seja, de 1,9 e 3,9 cm/s. Para se avaliar ambas regiões que ocorre o aumento brusco de eficiência e onde ocorre maiores variações de eficiência entre os espaçamentos entre fios, utilizou-se como menor e maior nível para o campo elétricos os valores de 3,4 e 4,4 kV/cm, respectivamente.

A Tabela 16 demonstra os valores para os efeitos estimados para cada fator analisado bem como os efeitos combinados entre os fatores e essas informações podem ser melhor visualizadas pelo gráfico de Pareto na Figura 65. Foi utilizado um grau de confiança de 95% e os dados em vermelho são referentes aos parâmetros considerados estatisticamente significativos ($p < 0,05$). Todos os parâmetros individuais e combinações de três fatores se mostraram estatisticamente significativos no processo de precipitação eletrostática de nanopartículas. O campo elétrico e espaçamento entre placas apresentaram influência semelhante ao planejamento anterior, cerca de 25 e 46%, respectivamente. No entanto, o aumento da velocidade apresentou uma diminuição na eficiência de cerca de 12%, diferente do obtido anteriormente. Possivelmente devido a esse parâmetro ter evidenciado um comportamento mais definido nos espaçamentos de 4 e 12 cm.

O aumento do espaçamento entre fios estatisticamente aumentou a eficiência de coleta em 9% e foi considerado significativo. Esse fato foi diferente do obtido por Andrade (2020), onde ao aumentar o espaçamento entre 6,5 e 12 cm verificou-se que esse parâmetro não foi estatisticamente significativo. No entanto, é importante salientar que a presente análise avalia um intervalo maior desse parâmetro, o que pode contribuir para o aumento da sua influência. Como discutido anteriormente, esse aumento pode ser associado a redução da blindagem eletrostática entre fios adjacentes, melhorando a performance do processo.

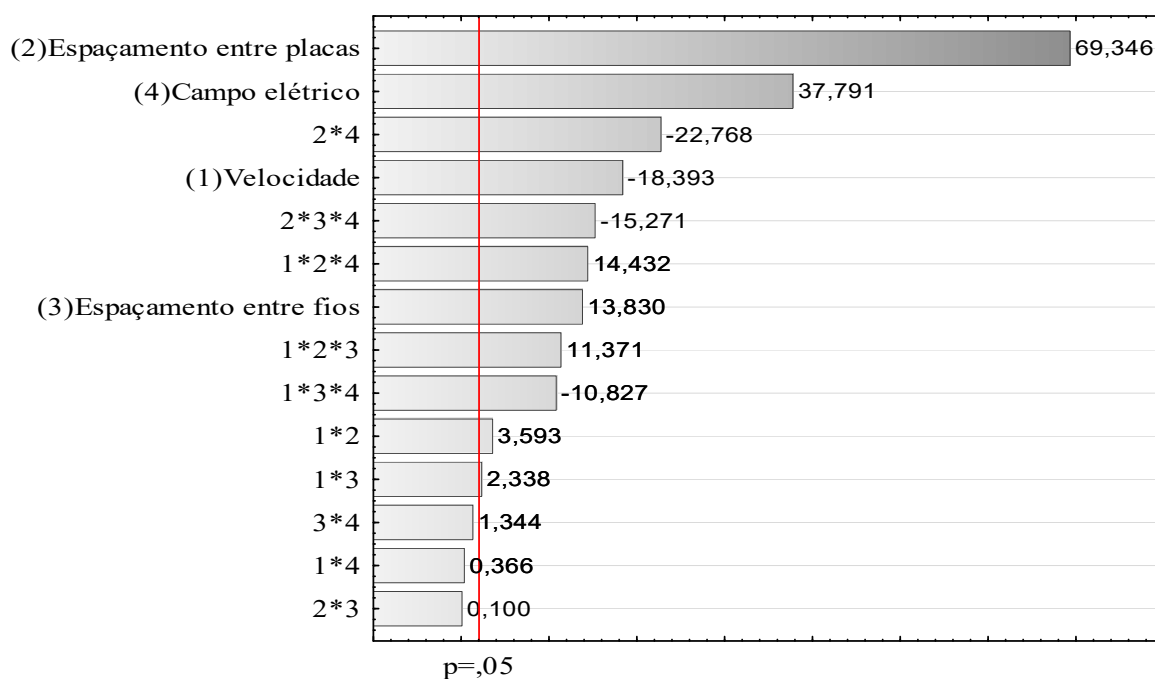
Alguns efeitos combinados entre dois fatores apresentaram influência pela Tabela 16. Entre eles está o efeito do campo elétrico e espaçamento entre placas, bem como da velocidade com o espaçamento entre placas ou fios (até 2,5 %). A presença de efeitos entre três fatores demonstra a complexibilidade do processo de precipitação eletrostática de nanopartículas. Logo, a alteração apenas de um parâmetro pode causar influências combinadas com outros fatores na eficiência de coleta.

Tabela 16. Efeito estimado, erro padrão, valor de t e grau de significância estatística (p) para o planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 4 e 12 cm

| Fatores | Efeito | Erro Padrão | t (33) | p |
|-----------------------------|----------|-------------|----------|----------|
| Média | 71,8960 | 0,333063 | 215,8630 | 0,000000 |
| (1)Velocidade | -12,2524 | 0,666127 | -18,3935 | 0,000000 |
| (2)Espaçamento entre placas | 46,1935 | 0,666127 | 69,3465 | 0,000000 |
| (3)Espaçamento entre fios | 9,2127 | 0,666127 | 13,8302 | 0,000000 |
| (4)Campo elétrico | 25,1733 | 0,666127 | 37,7906 | 0,000000 |
| 1*2 | 2,3937 | 0,666127 | 3,5935 | 0,001049 |
| 1*3 | 1,5573 | 0,666127 | 2,3379 | 0,025606 |
| 1*4 | 0,2435 | 0,666127 | 0,3656 | 0,717028 |
| 2*3 | 0,0667 | 0,666127 | 0,1001 | 0,920840 |
| 2*4 | -15,1665 | 0,666127 | -22,7681 | 0,000000 |
| 3*4 | 0,8952 | 0,666127 | 1,3439 | 0,188141 |
| 1*2*3 | 7,5744 | 0,666127 | 11,3708 | 0,000000 |
| 1*2*4 | 9,6136 | 0,666127 | 14,4321 | 0,000000 |
| 1*3*4 | -7,2126 | 0,666127 | -10,8277 | 0,000000 |
| 2*3*4 | -10,1723 | 0,666127 | -15,2708 | 0,000000 |

Fonte: Autor.

Figura 65. Diagrama de Pareto referente aos resultados do planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 4 e 12 cm



Efeitos estimados padronizados (Valor absoluto)

Fonte: Autor.

A análise de variância (ANOVA) obtida com os dados do planejamento experimental é dada na Tabela 17. O modelo obtido mostrou-se preditivo, com falta de ajuste com valor nulo, valor de R^2 de 0,99589 e média quadrática residual de 5,32.

Tabela 17. Análise de variância do modelo ajustado para o planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 4 e 12 cm

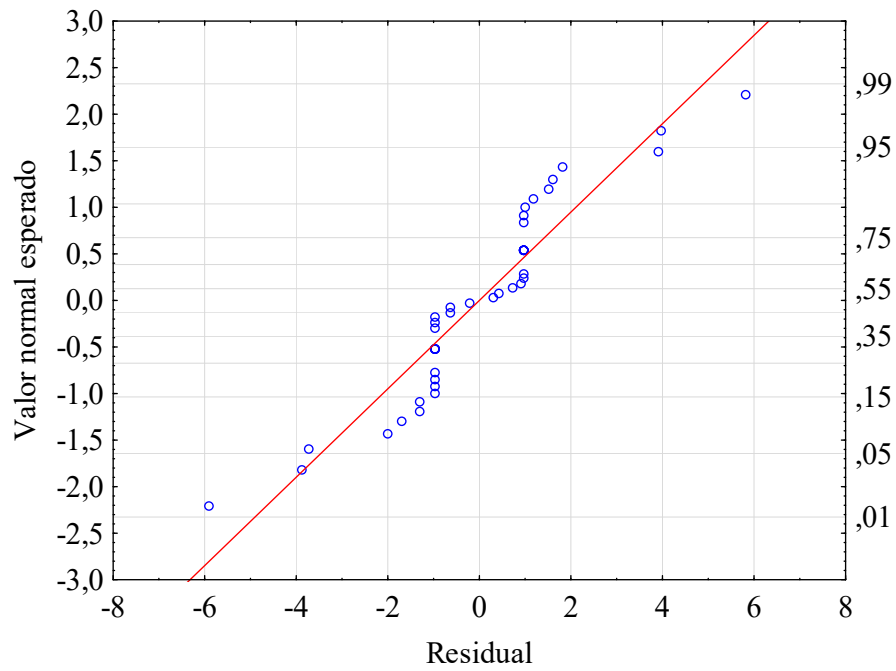
| Fator | Soma Quadrática | Graus de Liberdade | Média Quadrática | F | p |
|-----------------------------|-----------------|--------------------|------------------|----------|----------|
| (1)Velocidade | 1801,46 | 1 | 1801,46 | 338,321 | 0,000000 |
| (2)Espaçamento entre placas | 25606,12 | 1 | 25606,12 | 4808,933 | 0,000000 |
| (3)Espaçamento entre fios | 1018,48 | 1 | 1018,48 | 191,275 | 0,000000 |
| (4)Campo elétrico | 7604,36 | 1 | 7604,36 | 1428,130 | 0,000000 |
| 1*2 | 68,76 | 1 | 68,76 | 12,913 | 0,001049 |
| 1*3 | 29,10 | 1 | 29,10 | 5,466 | 0,025606 |
| 1*4 | 0,71 | 1 | 0,71 | 0,134 | 0,717028 |
| 2*3 | 0,05 | 1 | 0,05 | 0,010 | 0,920840 |
| 2*4 | 2760,26 | 1 | 2760,26 | 518,388 | 0,000000 |
| 3*4 | 9,62 | 1 | 9,62 | 1,806 | 0,188141 |
| 1*2*3 | 688,45 | 1 | 688,45 | 129,294 | 0,000000 |
| 1*2*4 | 1109,05 | 1 | 1109,05 | 208,285 | 0,000000 |
| 1*3*4 | 624,27 | 1 | 624,27 | 117,240 | 0,000000 |
| 2*3*4 | 1241,70 | 1 | 1241,70 | 233,197 | 0,000000 |
| Falta de ajuste | 0 | 0 | 0 | | |
| Erro | 175,72 | 33 | 5,32 | | |
| Soma quadrática total | 42738,11 | 47 | | | |

Fonte: Autor.

Pelo gráfico de probabilidade normal dos resíduos (Figura 66), seguem uma distribuição normal com os erros padronizados no intervalo entre [-2, +2]. Pelo gráfico dos valores observados e preditos (Figura 67), verifica-se que eles seguem uma tendência linear, como previsto pelo modelo, resultando em um ajuste satisfatório do modelo aos dados experimentais.

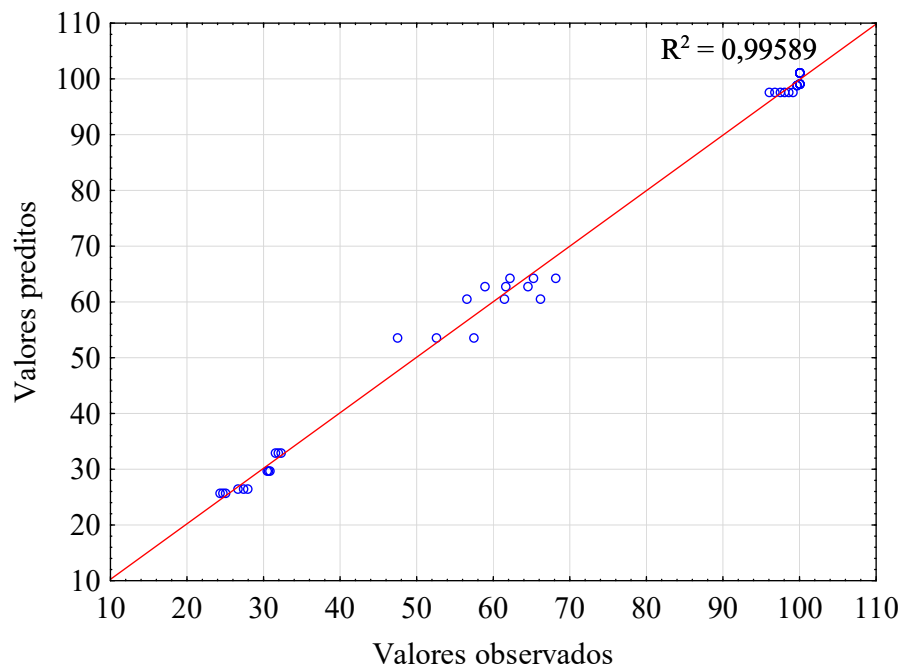
As superfícies de resposta em função do espaçamento entre fios, espaçamento entre placas, campo elétrico e velocidade estão dispostas na Figura 68. Pela Figura 68-a, se verifica que o aumento do espaçamento entre placas promove um aumento na eficiência. Já o aumento velocidade apresentou um comportamento oposto, ou seja, diminuição da eficiência.

Figura 66. Gráfico de probabilidade normal dos resíduos referente aos resultados do planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 4 e 12 cm



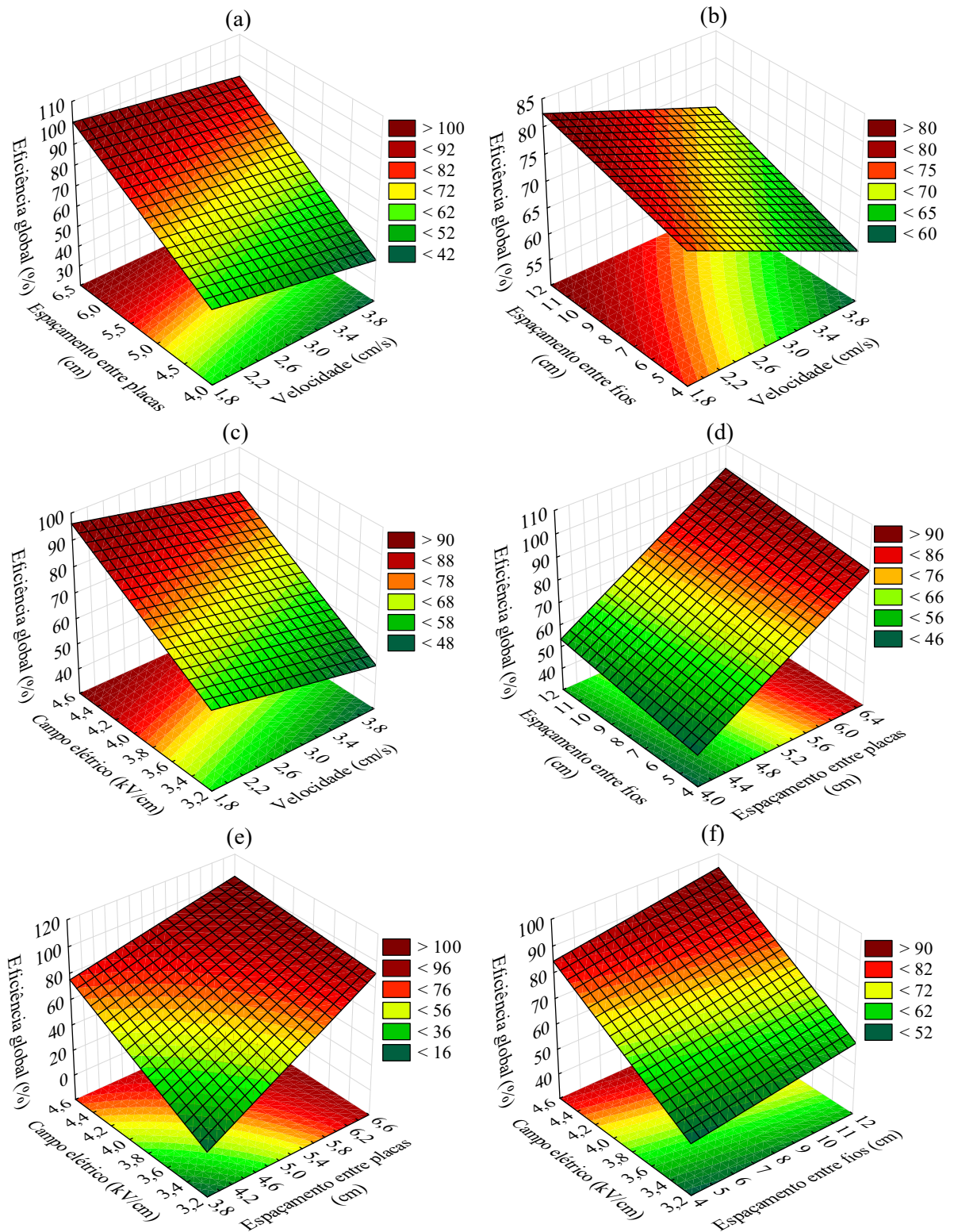
Fonte: Autor.

Figura 67. Valores de eficiência preditos versus observados para planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 4 e 12 cm



Fonte: Autor.

Figura 68. Superfícies de resposta referentes aos resultados do planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 4 e 12 cm em função de: (a) espaçamento entre placas e velocidade; (b) espaçamento entre fios e velocidade; (c) campo elétrico e velocidade; (d) espaçamento entre fios e espaçamento entre placas; (e) campo elétrico e espaçamento entre placas; (f) campo elétrico e espaçamento entre fios.



Fonte: Autor.

O efeito positivo do espaçamento entre placas e campo elétrico foi discutido anteriormente e se mantém semelhante, como observado nas Figuras 68-c e 68-e. Já a Figura 68-b, o efeito combinado entre a velocidade e espaçamento entre fios está mais evidente, com a projeção da superfície demonstrando um comportamento curvo. Como verificado anteriormente e observado por Andrade (2020), a performance do processo tende a se tornar melhor com o aumento do espaçamento entre fios e diminuição da velocidade.

Nas demais superfícies que se aplica o espaçamento entre fios (Figura 68-d e Figura 68-f), verifica-se claramente que esse parâmetro se mostra estatisticamente significativo e que seu aumento é benéfico na coleta de nanopartículas por precipitação eletrostática. Explicações sobre esse fato foram realizadas no tópico “5.3. Avaliação da influência do espaçamento entre fios” e se referem a redução da blindagem eletrostática.

Como o aumento do espaçamento entre fios estatisticamente teve influência positiva na eficiência de coleta, o valor de 12 cm se mostraria a escolha ideal com os parâmetros desse estudo. No entanto, a mesma análise foi realizada com um segundo planejamento, mas utilizando como menor e maior níveis os valores de 6 e 12 cm, respectivamente. Essa segunda análise é importante para identificar se a tendência se mantém semelhante a anterior, comprovando que a escolha de espaçamentos entre fios de 12 cm é apropriada em processos com as demais variáveis com valores semelhantes.

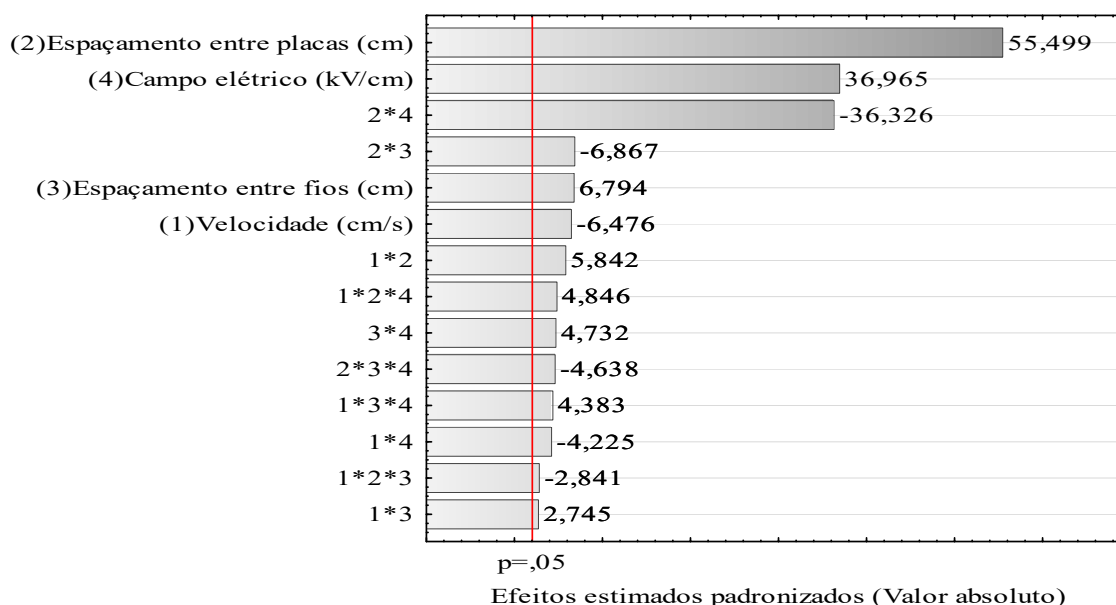
A Tabela 18 demonstra os valores para os efeitos estimados para cada fator analisado bem como os efeitos combinados entre os fatores e a Figura 59 o diagrama de Pareto. Nessa segunda análise todos os parâmetros individuais e combinações se mostraram estatisticamente significativos no processo de precipitação eletrostática de nanopartículas, exceto a combinação dos parâmetros velocidade e campo elétrico. O campo elétrico e espaçamento entre placas, que não foi alterado, apresentaram influência semelhante ao planejamento anterior. No entanto, a influência da velocidade e espaçamento entre fios se mostraram menos influente. O aumento desse último parâmetro apresentou cerca de 9% de aumento na eficiência entre os espaçamentos de 4 e 12 cm e 5% entre os espaçamentos de 6 e 12 cm. Isso era esperado já que o menor espaçamento entre fios apresenta uma maior blindagem eletrostática. Logo, com uma menor variação, a tendência é do seu efeito na eficiência diminuir. É importante salientar que, novamente, esse parâmetro se mostrou significativo, diferente do obtido por Andrade (2020) que avaliou valores de semelhantes (6,5 e 12 cm).

Tabela 18. Efeito estimado, erro padrão, valor de t e grau de significância estatística (p) para o planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 6 e 12 cm

| Fatores | Efeito | Erro Padrão | t (33) | p |
|-----------------------------|----------|-------------|----------|----------|
| Média | 77,6645 | 0,670797 | 115,7794 | 0,000000 |
| (1)Velocidade | -5,1511 | 1,341594 | -3,8395 | 0,000466 |
| (2)Espaçamento entre placas | 44,1415 | 1,341594 | 32,9023 | 0,000000 |
| (3)Espaçamento entre fios | 5,4036 | 1,341594 | 4,0277 | 0,000269 |
| (4)Campo elétrico | 29,3999 | 1,341594 | 21,9141 | 0,000000 |
| 1*2 | 4,6471 | 1,341594 | 3,4639 | 0,001362 |
| 1*3 | 2,1837 | 1,341594 | 1,6277 | 0,112073 |
| 1*4 | -3,3602 | 1,341594 | -2,5046 | 0,016791 |
| 2*3 | -5,4614 | 1,341594 | -4,0708 | 0,000237 |
| 2*4 | -28,8921 | 1,341594 | -21,5357 | 0,000000 |
| 3*4 | 3,7636 | 1,341594 | 2,8053 | 0,007965 |
| 1*2*3 | 77,6645 | 0,670797 | 115,7794 | 0,000000 |
| 1*2*4 | -5,1511 | 1,341594 | -3,8395 | 0,000466 |
| 1*3*4 | 44,1415 | 1,341594 | 32,9023 | 0,000000 |
| 2*3*4 | 5,4036 | 1,341594 | 4,0277 | 0,000269 |

Fonte: Autor.

Figura 69. Diagrama de Pareto referente aos resultados do planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 6 e 12 cm



Fonte: Autor.

No entanto, como evidenciado anteriormente, Chang e Bai (2000) Najafabadi e colaboradores (2014) mencionam que é esperado que o espaçamento entre fios tenha influência na precipitação eletrostática e que essa influência diminua à medida que se aumenta o campo

elétrico aplicado. Corroborando com as análises dos tópicos anteriores, o espaçamento entre placas é estatisticamente mais significativo que o espaçamento entre fios. Demais efeitos combinados foram avaliados superficialmente anteriormente e não serão aprofundados, por apresentar apresenta uma complexidade elevada, necessitando de maiores investigações.

Pela análise de variância (ANOVA) com os dados obtidos para esse planejamento experimental (Tabela 19), pode-se dizer que os fatores foram preditos corretamente. O modelo apresentou falta de ajuste com valor nulo, um valor de R^2 de 0,98271 e média quadrática residual de 21,59.

Tabela 19. Análise de variância do modelo ajustado para o planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 6 e 12 cm

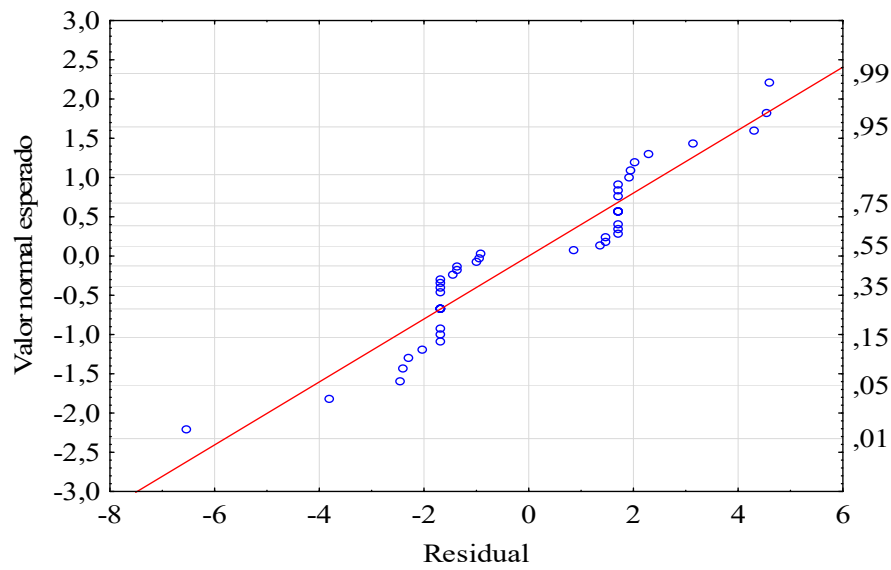
| Fator | Soma Quadrática | Graus de Liberdade | Média Quadrática | F | p |
|-----------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|----------|----------|
| (1)Velocidade | 318,40 | 1 | 318,40 | 41,945 | 0,000000 |
| (2)Espaçamento entre placas | 23381,63 | 1 | 23381,63 | 3080,180 | 0,000000 |
| (3)Espaçamento entre fios | 350,39 | 1 | 350,39 | 46,158 | 0,000000 |
| (4)Campo elétrico | 10372,24 | 1 | 10372,24 | 1366,387 | 0,000000 |
| 1*2 | 259,15 | 1 | 259,15 | 34,139 | 0,000002 |
| 1*3 | 57,22 | 1 | 57,22 | 7,538 | 0,009700 |
| 1*4 | 135,49 | 1 | 135,49 | 17,849 | 0,000177 |
| 2*3 | 357,92 | 1 | 357,92 | 47,151 | 0,000000 |
| 2*4 | 10017,05 | 1 | 10017,05 | 1319,597 | 0,000000 |
| 3*4 | 169,98 | 1 | 169,98 | 22,392 | 0,000041 |
| 1*2*3 | 61,25 | 1 | 61,25 | 8,068 | 0,007658 |
| 1*2*4 | 178,25 | 1 | 178,25 | 23,481 | 0,000029 |
| 1*3*4 | 145,83 | 1 | 145,83 | 19,211 | 0,000112 |
| 2*3*4 | 163,32 | 1 | 163,32 | 21,515 | 0,000053 |
| Falta de ajuste | 0 | 0 | 0 | | |
| Erro | 250,50 | 33 | 7,59 | | |
| Soma quadrática total | 46218,62 | 47 | | | |

Fonte: Autor.

Pelo gráfico de probabilidade normal dos resíduos (Figura 70), a maioria dos resíduos oscilaram ao redor da reta normal, seguindo uma distribuição normal com os erros padronizados no intervalo entre [-2, +2]. O gráfico dos valores observados e preditos (Figura 71) apresentaram bom ajuste ao modelo linear, resultando em um ajuste satisfatório do modelo aos dados experimentais.

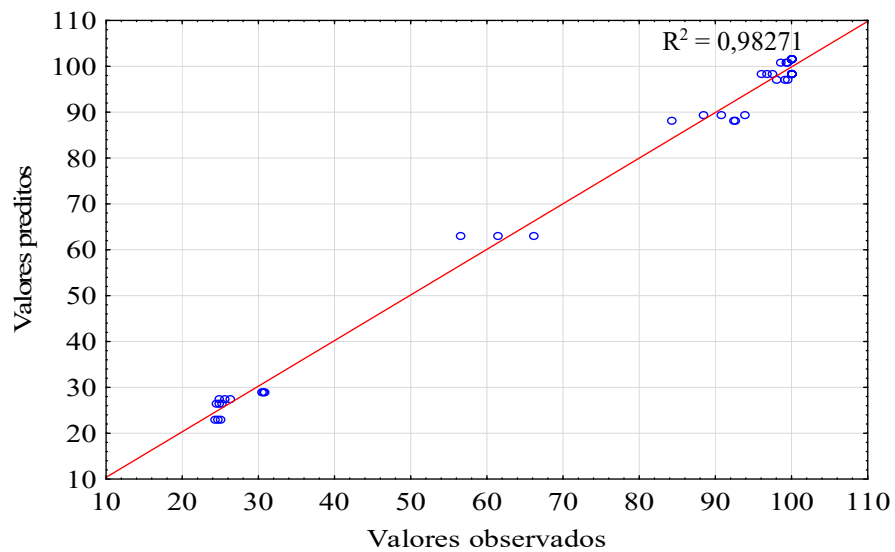
Novamente, a Figura 72 demonstra as superfícies de resposta em função do espaçamento entre fios, espaçamento entre placas, campo elétrico e velocidade. Em geral, o comportamento se manteve semelhante a análise estatística anterior, apenas com diminuição da influência do espaçamento entre fios.

Figura 70. Gráfico de probabilidade normal dos resíduos referente aos resultados do planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 6 e 12 cm



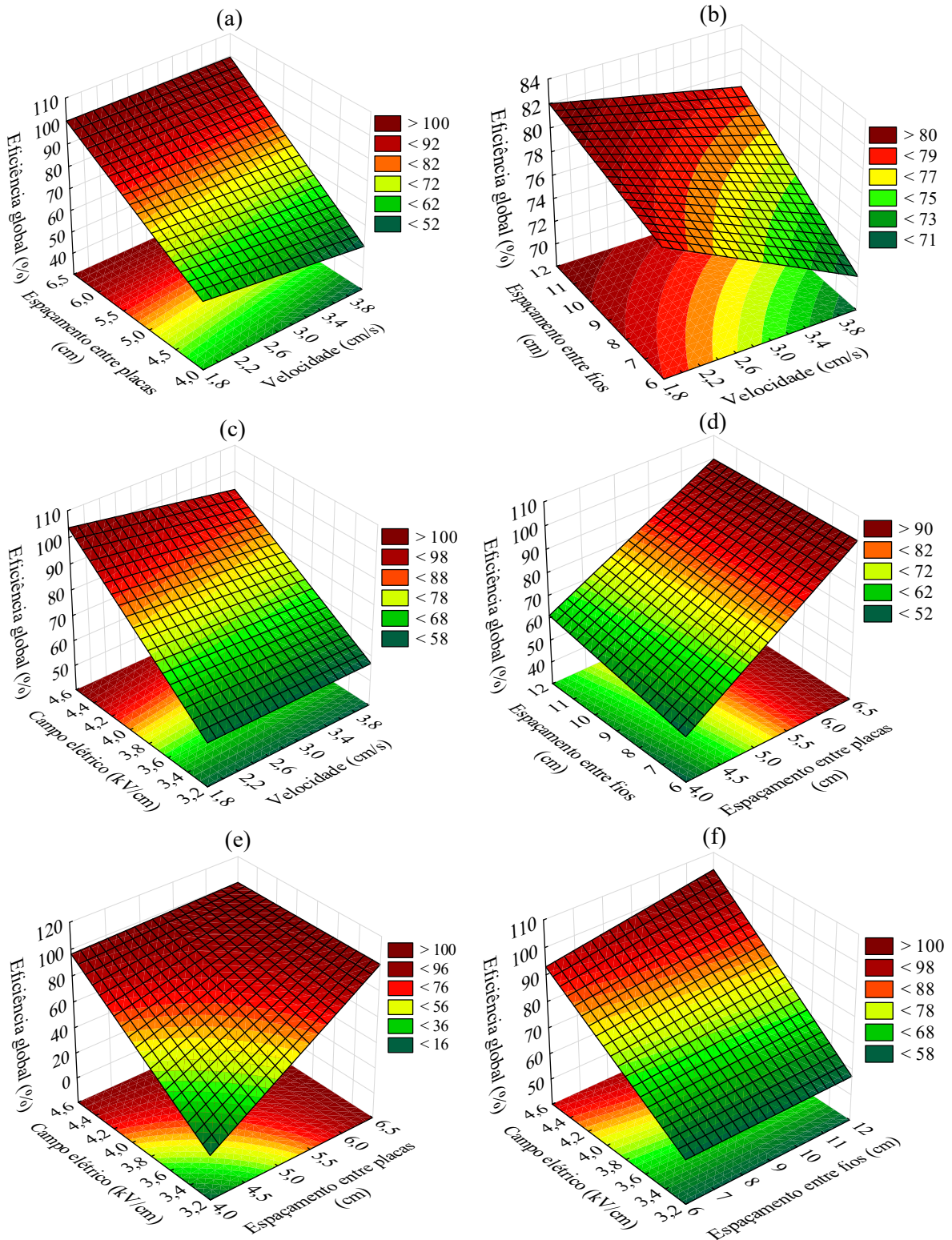
Fonte: Autor.

Figura 71. Valores de eficiência preditos versus observados para planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 6 e 12 cm



Fonte: Autor.

Figura 72. Superfícies de resposta referentes aos resultados do planejamento fatorial com espaçamentos entre fios de 6 e 12 cm em função de: (a) espaçamento entre placas e velocidade; (b) espaçamento entre fios e velocidade; (c) campo elétrico e velocidade; (d) espaçamento entre fios e espaçamento entre placas; (e) campo elétrico e espaçamento entre placas; (f) campo elétrico e espaçamento entre fios.



Fonte: Autor.

Em ambas as análises estatísticas, o modelo mostrou-se com bom ajuste nos dados, permitindo a avaliação dos fatores. Corroborando com os tópicos anteriores, o espaçamento entre placas tem maior influência no processo que o espaçamento entre fios. O aumento desse último é estatisticamente positivo na coleta de nanopartículas, diferente dos resultados anteriores que evidenciaram um melhor performance do espaçamento de 6 cm em relação ao de 12 cm, a depender as condições operacionais. A escolha dos níveis através da varredura permitiu que a análise fornecesse resultados mais confiáveis. Entre os parâmetros operacionais, a velocidade teve uma influência negativa pequena, enquanto o campo elétrico, como esperado, afetou forte e positivamente o processo.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A precipitação eletrostática tem potencial para remoção de nanopartículas, com eficiências acima de 99,9% para campos elétricos de 5,0 kV/cm. O uso da velocidade e campo elétrico como parâmetros para comparação entre dois equipamentos se mostraram mais pertinentes, por manter a fluidodinâmica e características elétricas. Em todos os testes, a maior parte das partículas possuíam diâmetro entre 10 e 100 nm, com medianas em número de partículas em torno de 30 nm e medianas em relação a massa em torno de 65 nm. Distribuições semelhantes foram obtidas, com desvio padrão geométrico próximos a 1,70. Em todos os testes com campos elétricos próximos ou superiores ao que ocorre o efeito corona a razão N_{EHD}/Re^2 foi maior que 1, indicando a predominância das forças elétricas sobre as viscosas e inerciais. Essas forças foram preponderantes nos maiores espaçamentos entre placas e fios.

A varredura de eficiência global pelo campo elétrico apresentou um comportamento sigmoide, com aumento brusco em uma faixa de campo elétrico de 0,4 kV/cm, próxima ao início da corona. Essa região se mostrou bastante instável e com maiores desvios padrão, onde pequenas variações no campo elétrico e velocidade causam grandes variações na eficiência. Com isso, a influência da velocidade foi mais significativa nessa faixa e não apresentou um comportamento definido. Em geral, ocorreu aumento na coleta em 2,9 cm/s e 3,9 cm/s dependendo da configuração geométrica utilizada.

O aumento dos espaçamentos entre placas causa um aumento da voltagem de início da corona e da ruptura dielétrica do ar. Por mais que em um mesmo campo elétrico o espaçamento entre placas de 6,5 cm tenha se mostrado mais eficiente, a voltagem aplicada para obter uma coleta de 99,99% é de 16,3 kV, enquanto pra o precipitador com espaçamento entre placas de 4 cm isso ocorre em 10 kV. Dessa forma, espaçamentos menores podem diminuir os custos energéticos, mas apresentam campos elétricos mais instáveis e maior probabilidade de blindagem eletrostática.

O aumento do espaçamento entre fios aumentou a corrente corona em uma mesma voltagem. Isso foi associado a diminuição da blindagem eletrostática, que é mais evidente no duto menor, que apresenta maior densidade de linhas de campo. Na eficiência de coleta, as diferenças não foram significativas nos menores campos elétricos aplicados, mas ao aumentar o campo elétrico o espaçamento de 6 cm e 12 cm apresentaram melhor performance,

dependendo do espaçamento entre placas e velocidade empregada. De fato, a combinação de parâmetros geométricos (espaçamento entre placas e fios) e operacionais (velocidade) deve ser levado em consideração na avaliação da diminuição da blindagem.

Pela análise estatística o espaçamento entre placas, espaçamento entre fios e campo elétrico foram considerados influentes na eficiência global de coleta de nanopartículas, bem como o efeito combinado entre eles. Dessa forma, estatisticamente maiores valores desses parâmetros melhoram o desempenho do precipitador. Os efeitos combinados entre dois ou três fatores demonstram a complexidade desse processo. Além disso, a velocidade apresentou efeito significativo apenas nas análises que se incluía o espaçamento entre fios, possivelmente pelo pequeno intervalo avaliado nesse estudo.

Como sugestões de trabalhos futuros, propõe-se a avaliação de outros parâmetros geométricos, como diâmetro e geometria dos fios, comprimento da placa coletora e uso de duplo estágio. Além disso, a alteração da unidade experimental para que seja possível avaliação de escoamentos em regime turbulento e uma faixa maior de velocidades. Também é necessária uma investigação mais aprofundada da região onde as eficiências são baixas, em voltagens inferiores a 8 kV. Por fim, desenvolvimentos de outros precipitadores com espaçamentos entre placas diferentes para realização de planejamentos fatoriais com pontos centrais e axiais e avaliação de modelos da literatura nas curvas de eficiência fracionária (como o modelo de Deutsch-Anderson, de Zhibin e Guoquan ou de Lin, Chen e Tsai).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, R. A. *et al.* Prolonged systemic inflammation and damage to the vascular endothelium following intratracheal instillation of air pollution nanoparticles in rats. **Clinical Hemorheology and Microcirculation**, v. 72, n. 1, p. 1–10, 2019.

ALONSO, M.; ALGUACIL, F. J. Electrostatic Precipitation of Ultrafine Particles Enhanced by Simultaneous Diffusional Deposition on Wire Screens. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 52, n. 11, p. 1342–1347, 2002.

ANDERLOHR, C.; SCHABER, K. Direct transfer of gas-borne nanoparticles into liquid suspensions by means of a wet electrostatic precipitator. **Aerosol Science and Technology**, v. 49, n. 12, p. 1281–1290, 2015.

ANDRADE, R. G. S. A. **Precipitador eletrostático: influência das condições operacionais e dos eletrodos de descarga na eficiência de remoção de nanopartículas**. Dissertação (Mestrado)—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2020.

BAMRUNGSAP, S. *et al.* Nanotechnology in therapeutics: A focus on nanoparticles as a drug delivery system. **Nanomedicine**, v. 7, n. 8, p. 1253–1271, 2012.

BENCS, L. *et al.* Uneven distribution of inorganic pollutants in marine air originating from ocean-going ships. **Environmental Pollution**, v. 222, p. 226–233, 2017.

BODDU, S. R. *et al.* Gold, silver, and palladium nanoparticle/nano-agglomerate generation, collection, and characterization. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 13, n. 12, p. 6591–6601, 2011.

BRUNEKREEF, B.; HOLGATE, S. T. Air pollution and health. **Lancet**, v. 360, n. 9341, p. 1233–1242, 2002.

CADAVID-RODRIGUEZ, M. C. *et al.* Optimization of bubble column performance for nanoparticle collection. **Journal of Hazardous Materials**, v. 271, p. 24–32, 2014.

CALDERÓN-GARCIDUEÑAS, L. *et al.* Combustion- and friction-derived magnetic air pollution nanoparticles in human hearts. **Environmental Research**, v. 176, n. June, p. 108567, 2019.

CARBONE, S. *et al.* Bioavailability and biological effect of engineered silver nanoparticles in a forest soil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 280, p. 89–96, 2014.

CERDA, E. V. **Estudo do Perfil de Concentração em um Precipitador Eletrostático do Tipo Placa-Fio**. Dissertação (Mestrado)—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2004.

CHANG, C.-L.; BAI, H. Effects of Some Geometric Parameters on the Electrostatic Precipitator Efficiency at Different Operation Indexes. **Aerosol Science and Technology**, v. 33, n. 3, p. 228–238, set. 2000.

- CHEN, T. M. *et al.* An efficient wet electrostatic precipitator for removing nanoparticles, submicron and micron-sized particles. **Separation and Purification Technology**, v. 136, p. 27–35, 2014.
- CHENG, Y. H. *et al.* Measurements of ultrafine particle concentrations and size distribution in an iron foundry. **Journal of Hazardous Materials**, v. 158, n. 1, p. 124–130, 2008.
- CHENG, Y. H. *et al.* Concentrations of ultrafine particles at a highway toll collection booth and exposure implications for toll collectors. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 2, p. 364–369, 2010.
- CHUN, Y. *et al.* Numerical modeling of near corona wire electrohydrodynamic flow in a wire-plate electrostatic precipitator. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 14, n. 1, p. 119–124, fev. 2007.
- COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. **Air Pollution Control: A Design Approach**. 3. ed. Illinois: Waveland Press Inc., 2002.
- COOPERMAN, P. A theory for space-charge-limited currents with application to electrical precipitation. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics**, v. 79, n. 1, p. 47–50, 1960.
- COOPERMAN, P. A new theory of precipitator efficiency. **Atmospheric Environment (1967)**, v. 5, n. 7, p. 541–551, jul. 1971.
- CUPAIOLI, F. A. *et al.* Engineered nanoparticles. How brain friendly is this new guest? **Progress in Neurobiology**, v. 119–120, p. 20–38, 2014.
- CYRS, W. D. *et al.* Nanoparticle collection efficiency of capillary pore membrane filters. **Journal of Aerosol Science**, v. 41, n. 7, p. 655–664, 2010.
- DEMELLO, A. J.; WOOLLEY, A. T. Nanotechnology. **Current Opinion in Chemical Biology**, v. 14, n. 5, p. 545–547, 2010.
- DEY, L.; VENKATARAMAN, C. A wet electrostatic precipitator (WESP) for soft nanoparticle collection. **Aerosol Science and Technology**, v. 46, n. 7, p. 750–759, 2012.
- DOBROWOLSKI, A. *et al.* Preparation of spray dried submicron particles: Part B – Particle recovery by electrostatic precipitation. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 548, n. 1, p. 237–243, 2018.
- DULLIEN, F. A. L. **Introduction to industrial gas cleaning**. San Diego: Academic Press, 1989.
- DUNKLE, S. G. Electrostatic Precipitators. In: **Industrial Air Pollution Control Systems**. Nova York: McGraw-Hill, 1997. p. 471–510.
- EL DEIN, A. Z.; USAMA, K. Experimental and Simulation Study of V–I Characteristics of Wire–Plate Electrostatic Precipitators Under Clean Air Conditions. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 5, p. 4037–4045, 29 maio 2014.
- ELIHN, K.; BERG, P. Ultrafine particle characteristics in seven industrial plants. **Annals of**

Occupational Hygiene, v. 53, n. 5, p. 475–484, 2009.

EVANS, S. A. *et al.* Inflammation, edema, and peripheral blood changes in lung-compromised rats after instillation with combustion-derived and manufactured nanoparticles. **Experimental Lung Research**, v. 32, n. 8, p. 363–378, 2006.

FALAGUASTA, M. C. R. **Estudo do desempenho de um precipitador eletrostático operando na captura de partículas submicrométricas e nanométricas**. Tese (Doutorado)—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2005.

FANN, N. *et al.* Estimating the National Public Health Burden Associated with Exposure to Ambient PM_{2.5} and Ozone. **Risk Analysis**, v. 32, n. 1, p. 81–95, 2012.

FEITOSA, N. DOS R. **Desempenho de Meios Filtrantes na Remoção de Partículas Nanométricas de Aerossóis**. Dissertação (Mestrado)—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2009.

FIORDELISI, A. *et al.* The mechanisms of air pollution and particulate matter in cardiovascular diseases. **Heart Failure Reviews**, v. 22, n. 3, p. 337–347, 2017.

FUJISHIMA, H. *et al.* Numerical simulation of three-dimensional electrohydrodynamics of spiked-electrode electrostatic precipitators. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 13, n. 1, p. 160–166, 2006.

GAUTHIER, C.; GENET, C. Nanotechnologies and Green Knowledge Creation: Paradox or Enhancer of Sustainable Solutions? **Journal of Business Ethics**, v. 124, n. 4, p. 571–583, 2014.

GUO, B.-Y.; YU, A.-B.; GUO, J. Numerical modeling of electrostatic precipitation: Effect of Gas temperature. **Journal of Aerosol Science**, v. 77, p. 102–115, nov. 2014.

GWINN, M. R.; VALLYATHAN, V. Nanoparticles: Health effects - Pros and cons. **Environmental Health Perspectives**, v. 114, n. 12, p. 1818–1825, 2006.

GYLES, C. Nanotechnology. **The Canadian veterinary journal = La revue veterinaire canadienne**, v. 53, n. 8, p. 819–822, ago. 2012.

HARRA, J. *et al.* Size-controlled aerosol synthesis of silver nanoparticles for plasmonic materials. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 14, n. 6, 2012.

HE, Z.; DASS, E. T. M. Correlation of design parameters with performance for electrostatic precipitator. Part II. Design of experiment based on 3D FEM simulation. **Applied Mathematical Modelling**, v. 57, p. 656–669, 2018.

HEITBRINK, W. A. *et al.* Characterization and mapping of very fine particles in an engine machining and assembly facility. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, v. 4, n. 5, p. 341–351, 2007.

HESKETH, H. E. **Air Pollution Control: Tradicional and Hazerdous Pollutants**. Lancaster: Technomic Publishing Company, 1996.

HILLMAN, A. L. *et al.* Lead pollution resulting from Roman gold extraction in northwestern Spain. **Holocene**, v. 27, n. 10, p. 1465–1474, 2017.

HINDS, W. C. **Aerosol Technology: Properties, Behaviour, and Measurement of Airborne Particles**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

HUANG, S. H.; CHEN, C. C. Ultrafine aerosol penetration through electrostatic precipitators. **Environmental Science and Technology**, v. 36, n. 21, p. 4625–4632, 2002.

IEEE-DEIS-EHD TECHNICAL COMMITTEE. Recommended international standard for dimensionless parameters used in electrohydrodynamics. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 10, n. 1, p. 3–6, fev. 2003.

ISO (International Organization for Standardization). **ISO/TS 12025**. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:12025:ed-1:v1:en:bibref:5>>. Acesso em: 29 jan. 2020.

JOODATNIA, P.; KUMAR, P.; ROBINS, A. Fast response sequential measurements and modelling of nanoparticles inside and outside a car cabin. **Atmospheric Environment**, v. 71, p. 364–375, 2013.

JOVANOVIĆ, B.; PALIĆ, D. Š. Immunotoxicology of non-functionalized engineered nanoparticles in aquatic organisms with special emphasis on fish—Review of current knowledge, gap identification, and call for further research. **Aquatic Toxicology**, v. 118–119, p. 141–151, 2012.

KASDI, A. Computation and measurement of corona current density and V–I characteristics in wires-to-plates electrostatic precipitator. **Journal of Electrostatics**, v. 81, p. 1–8, 2016.

KHALED, U.; ELDEIN, A. Z. Experimental study of V-I characteristics of wire-plate electrostatic precipitators under clean air conditions. **Journal of Electrostatics**, v. 71, n. 3, p. 228–234, 2013.

KHERBOUCHE, F. *et al.* Study of a new electrostatic precipitator with asymmetrical wire-to-cylinder configuration for cement particles collection. **Journal of Electrostatics**, v. 83, p. 7–15, 2016.

KIM, H.-J. *et al.* Ozone Emission and Electrical Characteristics of Ionizers With Different Electrode Materials, Numbers, and Diameters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 1, p. 459–465, jan. 2017.

KIM, H. J. *et al.* Characteristics of an electrostatic precipitator for submicron particles using non-metallic electrodes and collection plates. **Journal of Aerosol Science**, v. 41, n. 11, p. 987–997, 2010a.

KIM, J. H. *et al.* Electrostatic precipitator enhances fine particles collection efficiency. **Journal of Electrostatics**, v. 68, n. 4, p. 305–310, 2010b.

KIM, S. H.; PARK, H. S.; LEE, K. W. Theoretical model of electrostatic precipitator performance for collecting polydisperse particles. **Journal of Electrostatics**, v. 50, n. 3, p. 177–190, fev. 2001.

KNUTTSEN, F.; PARKER, K. R. Mechanical design considerations for dry precipitators. In: **Applied Electrostatic Precipitation**. London: Blackie Academic & Professional, 1997. p. 89–112.

- KRINKE, T. J. *et al.* Nanostructured deposition of nanoparticles from the gas phase. **Particle and Particle Systems Characterization**, v. 19, n. 5, p. 321–326, 2002.
- LANGER, R.; WEISSLEDER, R. Nanotechnology. **Journal Of The American Medical Association**, v. 313, n. 2, p. 135–136, 2015.
- LAUMBACH, R. J.; KIPEN, H. M. Respiratory health effects of air pollution: Update on biomass smoke and traffic pollution. **Journal of Allergy and Clinical Immunology**, v. 129, n. 1, p. 3–11, 2012.
- LEKAMGE, S. *et al.* The toxicity of coated silver nanoparticles to *Daphnia carinata* and trophic transfer from alga *Raphidocelis subcapitata*. **PLoS ONE**, v. 14, n. 4, p. 1–20, 2019.
- LEONARD, G.; MITCHNER, M.; SELF, S. A. Particle transport in electrostatic precipitators. **Atmospheric Environment (1967)**, v. 14, n. 11, p. 1289–1299, jan. 1980.
- LI, N. *et al.* A work group report on ultrafine particles (American Academy of Allergy, Asthma & Immunology): Why ambient ultrafine and engineered nanoparticles should receive special attention for possible adverse health outcomes in human subjects. **Journal of Allergy and Clinical Immunology**, v. 138, n. 2, p. 386–396, 2016.
- LI, Z. *et al.* Novel Wire-on-Plate Electrostatic Precipitator (WOP-EP) for Controlling Fine Particle and Nanoparticle Pollution. **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 14, p. 8683–8690, 2015.
- LIDE, D. R. **CRC Handbook of Chemistry and Physics**. 18. ed. New York: CRC Press, 1997.
- LIN, G.-Y. Y.; CHEN, T.-M. M.; TSAI, C.-J. J. A modified Deutsch-Anderson equation for predicting the nanoparticle collection efficiency of electrostatic Precipitators. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 12, n. 5, p. 697–706, 2012.
- LIN, G. Y. *et al.* High-efficiency wet electrocyclone for removing fine and nanosized particles. **Separation and Purification Technology**, v. 114, p. 99–107, 2013.
- LIU, F. *et al.* Facile synthesis of ultrafine cobalt oxide nanoparticles for high-performance supercapacitors. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 505, p. 796–804, 2017.
- LIU, Y. *et al.* Improving the Removal of Fine Particles with an Electrostatic Precipitator by Chemical Agglomeration. **Energy and Fuels**, v. 30, n. 10, p. 8441–8447, 2016.
- LÖNDAHL, J. *et al.* Measurement techniques for respiratory tract deposition of airborne nanoparticles: A critical review. **Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery**, v. 27, n. 4, p. 229–254, 2014.
- LU, C. *et al.* Analysis of the operating parameters of a vortex electrostatic precipitator. **Plasma Science and Technology**, v. 19, n. 2, 2017.
- LU, Q. *et al.* Numerical simulation on the fine particle charging and transport behaviors in a wire-plate electrostatic precipitator. **Advanced Powder Technology**, v. 27, n. 5, p. 1905–1911, 2016.
- MAHER, B. A. *et al.* Magnetite pollution nanoparticles in the human brain. **Proceedings of**

- the **National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 113, n. 39, p. 10797–10801, 2016.
- MATSON, U. Indoor and outdoor concentrations of ultrafine particles in some Scandinavian rural and urban areas. **Science of the Total Environment**, v. 343, n. 1–3, p. 169–176, 2005.
- MEIRA, C. R. **Desempenho de um Precipitador Eletrostático Operando na Remoção de Nanopartículas de Aerossóis**. Dissertação (Mestrado)—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2009.
- MERTENS, J. *et al.* Fine and ultrafine particle number and size measurements from industrial combustion processes: Primary emissions field data. **Atmospheric Pollution Research**, v. 11, n. 4, p. 803–814, 2020.
- MILLIPORE. **Simplicity® Water Purification System**. Disponível em: <https://www.merckmillipore.com/BR/pt/product/Simplicity-Water-Purification-System,MM_NF-C9210#overview>. Acesso em: 24 maio. 2020.
- MIZUNO, A. Electrostatic precipitation. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 7, n. 5, p. 615–624, 2000.
- MOHNEN, V.; HIDY, G. M. Measurements of atmospheric nanoparticles (1875-1980). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 11, p. 1525–1539, 2010.
- MONTEILLER, C. *et al.* The pro-inflammatory effects of low-toxicity low-solubility particles, nanoparticles and fine particles, on epithelial cells in vitro: the role of surface area. **Occupational and Environmental Medicine**, v. 64, n. 9, p. 609–615, 16 jan. 2007.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 6th. ed. Hoboken: John Wiley and Sons Incorporated, 2014.
- MORAWSKA, L. *et al.* Effect of face velocity and the nature of aerosol on the collection of submicrometer particles by electrostatic precipitator. **Indoor Air**, v. 12, n. 2, p. 129–137, 2002.
- MOROSKO, J. M. **Composite Discharge Electrode for Electrostatic Precipitator**. Dissertação (Mestrado)—Ohio: Ohio University, 2007.
- MU, L.; SPRANDO, R. L. Application of nanotechnology in cosmetics. **Pharmaceutical Research**, v. 27, n. 8, p. 1746–1749, 2010.
- MUSHTAQ, G. *et al.* Nanoparticles, Neurotoxicity and Neurodegenerative Diseases. **Current Drug Metabolism**, v. 16, n. 8, p. 676–684, 2015.
- NAJAFABADI, M. M. *et al.* Effects of geometric parameters and electric indexes on performance of a vertical wet electrostatic precipitator. **Journal of Electrostatics**, v. 72, n. 5, p. 402–411, 2014.
- NAVARRETE, B. *et al.* Influence of plate spacing and ash resistivity on the efficiency of electrostatic precipitators. **Journal of Electrostatics**, v. 39, n. 1, p. 65–81, jan. 1997.
- NEL, A. Toxic Potential of Materials at the Nanolevel. **Science**, v. 311, n. 5761, p. 622–627, 3 fev. 2006.

- NEUNDORFER. **Electrostatic precipitator.** Disponível em: <<http://www.neundorfer.com/knowledgebase/>>. Acesso em: 14 maio. 2020.
- NING, Z. *et al.* Electrode geometry optimization in wire-plate electrostatic precipitator and its impact on collection efficiency. **Journal of Electrostatics**, v. 80, p. 76–84, 2016.
- NÓBREGA, S. W.; FALAGUASTA, M. C. R.; COURY, J. R. A study of a wire-plate electrostatic precipitator operating in the removal of polydispersed particles. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 21, n. 2, p. 275–284, jun. 2004.
- NOURI, H. *et al.* Investigation of relative humidity effect on the particles velocity and collection efficiency of laboratory scale electrostatic precipitator. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 104, p. 225–232, 2016.
- OBERDÖRSTER, G. Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. **International Archives of Occupational and Environmental Health**, v. 74, n. 1, p. 1–8, 2000.
- OBERDÖRSTER, G. *et al.* Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. **Inhalation Toxicology**, v. 16, n. 6–7, p. 437–445, 2004.
- OBERDÖRSTER, G.; OBERDÖRSTER, E.; OBERDÖRSTER, J. Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. **Environmental Health Perspectives**, v. 113, n. 7, p. 823–839, 2005.
- OLIVEIRA, A. E. **Precipitação Eletrostática de Nanopartículas Desenvolvimento de Metodologias e Investigações de Fenômenos.** Dissertação (Mestrado)—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2019.
- OLIVEIRA, A. E.; GUERRA, V. G. Influence of particle concentration and residence time on the efficiency of nanoparticulate collection by electrostatic precipitation. **Journal of Electrostatics**, v. 96, n. June, p. 1–9, 2018.
- ORTIZ, F. J. G.; NAVARRETE, B.; CAÑADAS, L. Dimensional analysis for assessing the performance of electrostatic precipitators. **Fuel Processing Technology**, v. 91, n. 12, p. 1783–1793, dez. 2010.
- PARKER, K. R. **Applied Electrostatic Precipitation.** 1. ed. London, UK: Chapman & Hall, 1997.
- PARKER, K. R. **Electrical Operation of Electrostatic Precipitators.** 1. ed. London: Institution of Engineering and Technology, 2003.
- PODLIŃSKI, J. *et al.* Electrohydrodynamic gas flow in a positive polarity wire-plate electrostatic precipitator and the related dust particle collection efficiency. **Journal of Electrostatics**, v. 64, n. 3–4, p. 259–262, 2006.
- PREGER, C. *et al.* Predicting the deposition spot radius and the nanoparticle concentration distribution in an electrostatic precipitator. **Aerosol Science and Technology**, v. 6826, 2020.
- PROJECT ON EMERGING NANOTECHNOLOGIES. **Consumer Products Inventory.** Disponível em: <<http://www.nanotechproject.org/cpi/>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

PUI, D. Y. H.; CHEN, D.-R. Nanometer particles: A new frontier for multidisciplinary research. **Journal of Aerosol Science**, v. 28, n. 4, p. 539–544, jun. 1997.

QUINA, F. H. Nanotecnologia e o meio ambiente: Perspectivas e riscos. **Química Nova**, v. 27, n. 6, p. 1028–1029, 2004.

REMIRO, P. F. R. **Modificação de Meios Filtrantes com Nanomateriais para Controle de Bioaerossóis**. Tese (Doutorado)—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2018.

RIEHLE, C. Electrostatic precipitation. In: **Gas Cleaning in Demanding Applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997a. p. 193–228.

RIEHLE, C. Basic and theoretical operation of ESPs. In: **Applied Electrostatic Precipitation**. London: Blackie Academic & Professional, 1997b. p. 25–87.

ROSSI-BERGMANN, B. A Nanotecnologia: da saúde para além do determinismo tecnológico. **Ciência e Cultura**, v. 60, n. 2, p. 54–57, 2008.

SAID, H. A. *et al.* Effect of Wires Number on Corona Discharge of an Electrostatic Precipitators. **Journal of Electrical Systems**, v. 10, n. 4, p. 392–405, 2014.

SCHMATLOCH, V.; RAUCH, S. Design and characterisation of an electrostatic precipitator for small heating appliances. **Journal of Electrostatics**, v. 63, n. 2, p. 85–100, fev. 2005.

SCHULZ. Catálogo Técnico: Compressor: MSV 6/30 - MSV 12/175 - MSV 18/250 - WV 6/30. v. Rev. 05, n. Julho, p. 6, 2008.

SEMMLER-BEHNKE, M. *et al.* Biodistribution of 1.4- and 18-nm Gold Particles in Rats. **Small**, v. 4, n. 12, p. 2108–2111, dez. 2008.

SHAO, J. *et al.* A low temperature mechanochemical synthesis and characterization of amorphous Ni-B ultrafine nanoparticles. **Materials Letters**, v. 109, p. 203–206, 2013.

SHEN, H. *et al.* Electrohydrodynamic flows in electrostatic precipitator of five shaped collecting electrodes. **Journal of Electrostatics**, v. 95, n. April, p. 61–70, 2018.

SOLDATI, A.; BANERJEE, S. Turbulence modification by large-scale organized electrohydrodynamic flows. **Physics of Fluids**, v. 10, n. 7, p. 1742–1756, jul. 1998.

STONE, V.; JOHNSTON, H.; CLIFT, M. J. D. D. Air pollution, ultrafine and nanoparticle toxicology: Cellular and molecular interactions. **IEEE Transactions on Nanobioscience**, v. 6, n. 4, p. 331–340, 2007.

ŚWIERCZOK, A.; JĘDRUSIK, M. The collection efficiency of ESP model - Comparison of experimental results and calculations using Deutsch model. **Journal of Electrostatics**, v. 91, p. 41–47, fev. 2018.

THE NANODATABASE. **Search Database**. Disponível em: <<http://nanodb.dk/en/>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

TSI. Model 3776 Ultrafine Condensation: Operation and Service Manual. **TSI Incorporated**, v. Revision B, n. April, p. 137, 2006.

TSI. Series 3080 Electrostatic Classifiers: Operation and Service Manual. **TSI Incorporated**, v. Revision J, n. March, p. 147, 2009.

TSI. Portable Atomizer Aerosol Generator Model 3079A: Operation and Service Manual. **TSI Incorporated**, v. Revision A, n. January, p. 39, 2014.

TSI. TSI Particle Technology: Particle Catalog. **TSI Incorporated**, p. 44, 2019.

TSI. **Diffusion Dryer 3062**. Disponível em: <<https://www.tsi.com/product-accessories/diffusion-dryer-3062/>>. Acesso em: 24 maio. 2020.

VANCE, M. E. *et al.* Nanotechnology in the real world: Redeveloping the nanomaterial consumer products inventory. **Beilstein Journal of Nanotechnology**, v. 6, n. 1, p. 1769–1780, 2015.

VERONESI, B. *et al.* Effects of subchronic exposure to concentrated ambient particles: VII. Degeneration of dopaminergic neurons in Apo E^{-/-} mice. **Inhalation Toxicology**, v. 17, n. 4–5, p. 235–241, 2005.

VINCENT, J. H. Electrostatic Precipitator Performance from the Point of View of Gas Treatment Time. **Journal of the Air Pollution Control Association**, v. 30, n. 4, p. 395–396, abr. 1980.

WANG, C. SEN; OTANI, Y. Removal of nanoparticles from gas streams by fibrous filters: A review. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 1, p. 5–17, 2013.

WARHEIT, D. B. Nanoparticles: Health impacts? **Materials Today**, v. 7, n. 2, p. 32–35, fev. 2004.

WEICHENTHAL, S. *et al.* Determinants of ultrafine particle exposures in transportation environments: findings of an 8-month survey conducted in Montréal, Canada. **Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology**, v. 18, n. 6, p. 551–563, 9 nov. 2008.

WHEATLEY, A. D.; SADHRA, S. Occupational exposure to diesel exhaust fumes. **Annals of Occupational Hygiene**, v. 48, n. 4, p. 369–376, 2004.

WHITE, H. J. **Industrial Electrostatic Precipitation**. Reading: Addison-Wesley, 1963.

WIN-SHWE, T. T.; FUJIMAKI, H. Nanoparticles and Neurotoxicity. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 12, n. 9, p. 6267–6280, 2011.

WU, J.; DING, T.; SUN, J. Neurotoxic potential of iron oxide nanoparticles in the rat brain striatum and hippocampus. **NeuroToxicology**, v. 34, n. 1, p. 243–253, 2013.

YANG, Q. *et al.* Ultrafine MoO₂ nanoparticles grown on graphene sheets as anode materials for lithium-ion batteries. **Materials Letters**, v. 127, p. 32–35, 2014.

YANG, X. FENG; KANG, Y. MING; ZHONG, K. Effects of geometric parameters and electric indexes on the performance of laboratory-scale electrostatic precipitators. **Journal of Hazardous Materials**, v. 169, n. 1–3, p. 941–947, 2009.

YANG, Z. *et al.* A combined wet electrostatic precipitator for efficiently eliminating fine

particle penetration. **Fuel Processing Technology**, v. 180, n. August, p. 122–129, 2018a.

YANG, Z. *et al.* Challenge of SO₃ removal by wet electrostatic precipitator under simulated flue gas with high SO₃ concentration. **Fuel**, v. 217, n. December 2017, p. 597–604, 2018b.

YOO, K. H.; LEE, J. S.; OH, M. DO. Charging and Collection of Submicron Particles in Two-Stage Parallel-Plate Electrostatic Precipitators. **Aerosol Science and Technology**, v. 27, n. 3, p. 308–323, set. 1997.

ZHIBIN, Z.; GUOQUAN, Z. New model of electrostatic precipitation efficiency accounting for turbulent mixing. **Journal of Aerosol Science**, v. 23, n. 2, p. 115–121, mar. 1992.

ZHIBIN, Z.; GUOQUAN, Z. Investigations of the Collection Efficiency of an Electrostatic Precipitator with Turbulent Effects. **Aerosol Science and Technology**, v. 20, n. 2, p. 169–176, jan. 1994.

ZHUANG, Y. *et al.* Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators. **Journal of Electrostatics**, v. 48, n. 3–4, p. 245–260, mar. 2000.

ZUKERAN, A.; SAWANO, H.; YASUMOTO, K. Collection characteristic of nanoparticles emitted from a diesel engine with residual fuel oil and light fuel oil in an electrostatic precipitator. **Energies**, v. 12, n. 17, 2019.