

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

**RAÍSSA GABRIELLE SILVA ARAÚJO ANDRADE**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS NA  
COLETA DE NANOPARTÍCULAS A PARTIR DE MODIFICAÇÕES  
OPERACIONAIS E GEOMÉTRICAS**

São Carlos

2024

**RAÍSSA GABRIELLE SILVA ARAÚJO ANDRADE**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS NA  
COLETA DE NANOPARTÍCULAS A PARTIR DE MODIFICAÇÕES  
OPERACIONAIS E GEOMÉTRICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Química.

Orientador(a): Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Vádila Giovana  
Guerra Béttega

São Carlos

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

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

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Raíssa Gabrielle Silva Araújo Andrade, realizada em 30/01/2024.

**Comissão Julgadora:**

Profa. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega (UFSCar)

Profa. Dra. Mônica Lopes Aguiar (UFSCar)

Prof. Dr. Marcos Vinicius Rodrigues (UNIFAL)

Profa. Dra. Simone Andréa Pozza (UNICAMP)

Prof. Dr. Bruno José Chiaramonte de Castro (ArcelorMittal)

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

*“Slow down, you crazy child  
You're so ambitious for a juvenile  
But then if you're so smart  
Tell me why are you still so afraid?”*

*(Billy Joel)*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades e pessoas incríveis que colocou no meu caminho.

Aos meus pais, Goreti e Josiel, por me mostrarem a importância da educação e por sempre acreditarem no meu potencial, mesmo longe, estamos sempre juntos.

À minha irmã Bárbara, pelo amor e paciência, pela cumplicidade de todos os dias, por sempre me estender a mão e por todas as aventuras que ousamos viver juntas. Com você sei que nunca estarei sozinha.

À minha prima Ingrid, minhas avós Hilda e Catarina (*in memoriam*) e meus tios e tias que dividiram esse sonho comigo. E à tia Raquel por ter me proporcionado momentos inesquecíveis.

À professora Vádila Giovana Guerra Béttega, pela orientação, por todo o auxílio ao longo dos últimos anos e pelos ensinamentos que me tornaram uma profissional melhor. À professora Mônica Lopes Aguiar por todo o suporte oferecido e aos amigos do Controle Ambiental, por tornarem a rotina da pós-graduação mais leve.

Aos professores Evelyne Gonze e Michel Ondarts, por terem aceitado me receber no LOCIE, pela orientação e pela paciência no meu processo de aprendizado do francês. Aos demais membros do LOCIE por todo o suporte e acolhimento.

Ao professor João Inácio Soletti, por despertar em mim o amor pela pesquisa.

Aos meus tios, Sônia e Braga, pelo carinho e atenção, e por terem se tornado tão especiais em minha vida.

À Karla Raphaela, por ser uma amiga tão especial e uma irmã que a vida me deu. Por sempre estar ao meu lado com seu constante apoio e torcida, sua companhia tornou a trajetória até aqui mais leve e muito mais divertida. Os anos que moramos juntas estão entre os mais especiais da minha vida e você foi minha família quando mais precisei. Obrigada por tanto.

À Jullyana Sirley, por todos os dias me lembrar que amizade não depende da distância. Nos últimos anos nos encontramos poucas vezes pessoalmente, mas não tem um dia que passe que a gente não converse sobre qualquer coisa. Obrigada por sempre se fazer presente, por me ajudar mesmo quando eu acreditei não precisar e por nunca desistir de me tornar uma pessoa melhor.

À Laira Borges, por ter chegado sem avisar e nunca ter ido embora. Ser sua amiga é ter certeza de apoio, carinho, compreensão e boas risadas. Você é o presente mais especial que São Carlos poderia ter me dado.

À Álvaro Soares, por sempre segurar a minha mão, até mesmo nos momentos em que eu não mereço. Você me mostra todos os dias o que é amor e nunca desiste de me fazer ver a vida por um lado mais feliz. Obrigada por aceitar todas as minhas versões.

Às minhas amigas, Coralina Moraes, Jéssica Rafaella, por me apresentarem ao real significado de amizade e por me fazerem feliz.

À Luiz Daniel, pela amizade e apoio durante todos esses anos, e por me ajudar em todos os momentos que precisei.

À Edilton Nunes, ser um amigo tão querido e pelo constante incentivo.

À Pedro Rohenkohl, pelas inúmeras vezes que suas piadas melhoraram o meu dia.

À Thalyne Rocha, pela amizade e por me ensinar a valorizar as pequenas coisas da vida.

À Victor Oliveira e Guilherme Alves pela amizade e momentos compartilhados.

À Denner Ribeiro e Daniela Mortari, e ao nosso grupinho de brasileiros, por me receberem de braços abertos na França e terem contribuído para tornar essa a melhor experiência da minha vida. Foi um prazer compartilhar a sala e a vida com vocês ao longo daqueles 6 meses.

À Universidade Federal de São Carlos, ao Departamento de Engenharia Química, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química e à CAPES – Código de Financiamento 001, pelo suporte oferecido e pelo apoio financeiro, essencial para a execução desse trabalho.

## RESUMO

A utilização de sistemas de controle da poluição do ar tem se tornado indispensável para as indústrias e ambientes com uma alta quantidade de material particulado. Devido ao caráter nocivo associado à inalação dessas partículas, é necessário que ocorra a redução de sua concentração nas emissões dispersas no ar. Dessa forma, o precipitador eletrostático é uma alternativa viável devido à sua operação versátil e elevada eficiência, e o seu desempenho está diretamente relacionado às condições operacionais e à sua geometria. Neste contexto, o presente trabalho objetivou estudar a influência das configurações geométricas na eficiência de coleta de nanopartículas. Para isso, foram avaliados dois precipitadores eletrostáticos, de simples e duplo estágio, localizados em laboratórios de pesquisa no Brasil e na França, que possuem diferenças na sua dimensão e na unidade experimental associada. Portanto, o presente trabalho foi dividido em capítulos, para permitir uma análise mais detalhada dos experimentos. Um capítulo apresenta o estudo do precipitador eletrostático de simples estágio, com os testes realizados no Brasil, no qual foram avaliados os efeitos do espaçamento de entrada sobre as características elétricas e o desempenho do precipitador eletrostático na coleta de nanopartículas. Especificamente, a análise envolveu a utilização de 1 e 3 eletrodos de descarga. Em seguida, foi avaliada a inclusão de uma tela coletora, que ocorreu em conjunto com a utilização de 1 eletrodo de descarga. Para isso, foi utilizado um aerossol formado a partir de uma solução de NaCl de 0,1 g/L. Os experimentos foram realizados para uma faixa de diâmetro de partículas entre 6,15 e 241,4 nm. O precipitador eletrostático utilizado possui duas placas coletoras de 10 cm de altura e 30 cm de comprimento, espaçadas em 6,5 cm. Foram utilizados fios de aço inoxidável de 0,4 mm como eletrodos de descarga, espaçados entre si em 6,5 cm. Os resultados indicaram que os valores de corrente elétrica apresentaram pouca ou nenhuma variação quando comparados os espaçamentos utilizados. Além disso, os espaçamentos que atingiram maiores eficiências de coleta foram os de 15 cm (1 fio), 7,5 e 10,5 cm (3 fios), sendo a configuração de 23 cm a mais favorecida pela inserção da tela coletora. Por sua vez, outro capítulo avaliou o precipitador eletrostático de duplo estágio, com os testes realizados na França, composto por um ionizador de 7 cm de diâmetro e 15 cm de altura, contendo 8 eletrodos de descarga, e um coletor com 8 placas coletoras de 7 cm de largura e 10 cm de altura. Os experimentos foram realizados com um aerossol a partir de uma solução de NaCl de 5 g/L e para partículas entre 10 e 154 nm. Esse estudo foi conduzido em 5 etapas, voltadas para a avaliação da eficiência de coleta com diferentes voltagens do coletor, do ionizador, da velocidade do ar, da distância entre o ionizador e o coletor e do tipo de ionizador, além da avaliação da concentração de ozônio e da carga elétrica por partícula. Os resultados indicaram que as condições mais eficientes foram aquelas que apresentaram as voltagens mais elevadas tanto no coletor quanto no ionizador. Contudo, sob essas mesmas condições, a produção de ozônio no estágio de ionização mostrou-se elevada, atingindo cerca de 200 ppb. Em contrapartida, ao empregar voltagens mais baixas, obteve-se uma eficiência de coleta com máximas eficiências em torno de 60% e uma concentração reduzida de ozônio. Adicionalmente, observou-se que o aumento da distância entre o ionizador e o coletor resultou em um incremento na eficiência de coleta, possivelmente devido ao prolongamento do tempo de residência das partículas. Tanto o precipitador de simples estágio como o de duplo estágio podem apresentar altas eficiências de coleta de nanopartículas, a depender da quantidade e posicionamento dos eletrodos de descarga (para o de simples estágio) e do tipo de ionizador e do espaçamento entre ionizador e coletor (para o de duplo estágio), além das condições operacionais para ambos os casos. Por conseguinte, deve-se analisar minuciosamente os resultados obtidos por meio do

precipitador eletrostático, com o intuito de escolher a configuração que mais adequadamente se alinha às condições desejadas.

**Palavras-chave:** Configurações Geométricas; Eficiência de Remoção; Precipitação Eletrostática; Nanopartículas.

## ABSTRACT

The application of air pollution control systems has become indispensable for industries and environments that have a high amount of particulate matter. Due to the harmful nature associated with the inhalation of these particles, it is necessary to reduce their concentration in the emissions dispersed in the air. Thus, the electrostatic precipitator is a viable alternative, due to its versatile operation and high efficiency, with the performance of this equipment being directly related to the operating conditions used and its geometry. The present work aimed to study the influence of geometric configurations on the efficiency of nanoparticle collection. For this, two electrostatic precipitators, single and double stage, located in research laboratories in Brazil and France, which differ in size and associated experimental unit, were evaluated. Therefore, the present work was divided into chapters, to allow a more detailed analysis of each of the experiments. One chapter presents the study of the single-stage electrostatic precipitator, in which the effects of inlet spacing were evaluated on the electrical characteristics and performance of the electrostatic precipitator in nanoparticle collection. Specifically, the analysis involved the use of 1 and 3 discharge electrodes. Next, the inclusion of a collection net was evaluated, which occurred in conjunction with the use of 1 discharge electrode. For this, an aerosol formed from a 0.1 g/L NaCl solution was used. The experiments were carried out for a particle diameter range between 6.15 and 241.4 nm. The electrostatic precipitator used has two collecting plates 10 cm high and 30 cm long, spaced 6.5 cm apart. 0.4 mm stainless steel wires were used as discharge electrodes, spaced 6.5 cm apart. The results indicated that the electric current values showed little or no variation when comparing the spacings used. In addition, the spacings that achieved the highest collection efficiencies were 15 cm (1 wire), 7.5 and 10.5 cm (3 wires), with the 23 cm configuration being the most favored by the insertion of the collection net. On the other hand, another chapter evaluated the double-stage electrostatic precipitator, composed of an ionizer 7 cm in diameter and 15 cm high, containing 8 discharge electrodes, and a collector with 8 collector plates 7 cm wide and 10 cm high. The experiments were carried out with an aerosol from a 5 g/L NaCl solution and for particles between 10 and 154 nm. This study was conducted in 5 stages, aimed at evaluating the collection efficiency with different voltages of the collector, the ionizer, air velocity, the distance between the ionizer and the collector and the type of ionizer, in addition to evaluating the ozone concentration and electrical charge per particle. The results indicated that the most efficient conditions were those that presented the highest voltages in both the collector and the ionizer. However, under these same conditions, ozone production was significantly high, reaching around 200 ppb. On the other hand, when using lower voltages, with maximum collection efficiencies around 60% and a reduced ozone concentration were obtained. Additionally, it was observed that the increase in the distance between the ionizer and the collector resulted in an increase in collection efficiency, possibly due to the prolongation of the particles residence time. Both the single-stage and double-stage precipitators can present high nanoparticle collection efficiencies, depending on the quantity and positioning of the discharge electrodes (for the single-stage) and the type of ionizer and the spacing between the ionizer and collector (for the double stage), in addition to the operational conditions for both cases. Therefore, it is imperative to thoroughly analyze the results obtained using the electrostatic precipitator, to choose the configuration that most appropriately aligns with the desired conditions.

**Keywords:** Geometric Configurations; Removal Efficiency; Electrostatic Precipitation; Nanoparticles.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Faixa de tamanho do material particulado e de outros tipos de partículas. ....	25
Figura 2 - Penetração do material particulado no sistema respiratório. ....	26
Figura 3 - Precipitador eletrostático industrial. ....	28
Figura 4 - Representação do campo elétrico no interior do precipitador eletrostático do tipo placa-fio (vista superior).....	29
Figura 5 - Representação de um precipitador eletrostático do tipo (a) placa-fio e (b) tubo-fio. ....	29
Figura 6 – Formatos dos eletrodos de descarga: (a) Haste lisa, (b) helicoidal, (c) fio e haste roscados, (d) haste retangular, (e) haste em forma de estrela, (f) haste com agulhas dispostas alternadamente, (g) haste com agulhas cruzadas, (h) haste com emissores (rígidos), (i) placa com agulhas e (j) haste com serras. ....	30
Figura 7 - Representação da curva corrente-tensão.....	32
Figura 8 - Representação das zonas de ionização e da avalanche de elétrons, onde $s$ é o espaçamento entre os fios e as placas, $a$ é o espaçamento entre os fios, $R_w$ é o raio do fio e $r_i$ é o raio da zona de ionização.....	33
Figura 9 - Linhas de campo ao redor de uma partícula: (a) descarregada, (b) com 50% da carga de saturação e (c) com a carga totalmente saturada.....	36
Figura 10 - Esquema representativo das etapas que ocorrem no interior do precipitador eletrostático.....	37
Figura 11 - Representação das forças atuantes nas partículas no interior de um precipitador eletrostático (vista superior). ....	37
Figura 12 - Representação da unidade experimental.....	53
Figura 13 - Representação do precipitador eletrostático: (a) vista frontal e (b) vista superior.....	54
Figura 14 - Representação dos espaçamentos de entrada avaliados no precipitador eletrostático com 1 eletrodo de descarga (vista superior): (a) 1,5 cm, (b) 15 cm e (c) 28,5 cm. ....	55
Figura 15 - Representação dos espaçamentos de entrada avaliados no precipitador eletrostático com 3 eletrodos de descarga (vista superior): (a) 1,5 cm, (b) 4,5 cm, (c) 7,5 cm, (d) 10,5 cm e (e) 12,5 cm.....	57
Figura 16 – (a) Moldura de acrílico para a tela coletora, (b) moldura colada na tela coletora (vista frontal) e (c) vista lateral.....	59
Figura 17 - Interior do precipitador eletrostático com: (a) tela e (b) 1 fio + tela, para a configuração de 1,5 cm (fio) e 4,5 cm (tela). ....	59

Figura 18 - Representação dos espaçamentos de entrada avaliados no precipitador eletrostático com 1 eletrodo de descarga e com a tela coletora (vista superior): (a) 1,5 cm (fio) e 4,5 cm (tela), (b) 10 cm (fio) e 13 cm (tela) e (c) 23 cm (fio) e 26 cm (tela).....	60
Figura 19 - Distribuição granulométrica do aerossol na entrada do precipitador eletrostático (base numérica).....	62
Figura 20 - Curvas corrente-tensão com 1 eletrodo de descarga em função dos diferentes espaçamentos de entrada para: (a) 1 cm/s - 0 g/L e (b) 1 cm/s - 0,1 g/L.....	64
Figura 21 - Tempo de carregamento elétrico das partículas de aerossol em função do tempo de residência das partículas com 1 eletrodo de descarga, para os diferentes espaçamentos de entrada, para os carregamentos de: (a) 85%, (b) 90%, (c) 95% e (d) 99%. ....	65
Figura 22 - Eficiências globais com 1 eletrodo de descarga para diferentes velocidades do ar com os espaçamentos de entrada de: (a) 1,5 cm, (b) 15 cm e (c) 28,5 cm. ....	66
Figura 23 - Eficiências globais com 1 eletrodo de descarga para diferentes espaçamentos de entrada com as velocidades de: (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s. ....	67
Figura 24 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga e com a velocidade do ar de 1 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,23 kV/cm e (c) 3,38 kV/cm.....	70
Figura 25 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga e com o campo elétrico de 3,14 kV/cm, em função dos espaçamentos de entrada, com as velocidades do ar: (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s. ....	72
Figura 26 - Curvas corrente-tensão com 3 eletrodos de descarga em função dos diferentes espaçamentos de entrada para: (a) 1 cm/s - 0 g/L, (b) 1 cm/s - 0,1 g/L. ....	74
Figura 27 - Tempo de carregamento elétrico das partículas de aerossol em função do tempo de residência das partículas com 3 eletrodos de descarga, para os diferentes espaçamentos de entrada, para os carregamentos de: (a) 85%, (b) 90%, (c) 95% e (d) 99%. ....	75
Figura 28 – Eficiências globais com 3 eletrodos de descarga para diferentes velocidades do ar com os espaçamentos de entrada de: (a) 1,5 cm, (b) 4,5 cm, (c) 7,5 cm, (d) 10,5 cm e (e) 13,5 cm. ....	77
Figura 29 - Eficiências globais com 3 eletrodos de descarga para diferentes espaçamentos de entrada com as velocidades de: (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s. ....	77
Figura 30 - Eficiências fracionárias obtidas com 3 eletrodos de descarga e com a velocidade do ar de 1 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,23 kV/cm e (c) 3,38 kV/cm.....	81

Figura 31 - Eficiências fracionárias obtidas com 3 eletrodos de descarga e com o campo elétrico de 3,14 kV/cm, em função dos espaçamentos de entrada, com as velocidades do ar: (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s. ....	82
Figura 32 - Curvas corrente-tensão com a tela coletora e 1 eletrodo de descarga em função dos diferentes espaçamentos de entrada para: (a) 1 cm/s - 0 g/L e (b) 1 cm/s - 0,1 g/L. ....	84
Figura 33 - Tempo de carregamento elétrico das partículas de aerossol em função do tempo de residência das partículas com a tela coletora e 1 eletrodo de descarga, para os diferentes espaçamentos de entrada, para os carregamentos de: (a) 85%, (b) 90%, (c) 95% e (d) 99%. .	85
Figura 34 - Comparação entre as eficiências de coleta, em função do campo elétrico, obtidas com os espaçamentos de 1,5 cm (sem tela) e 1,5 cm (com tela) para as velocidades de (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s. ....	86
Figura 35 - Comparação entre as eficiências de coleta, em função do campo elétrico, obtidas com os espaçamentos de 15 cm (sem tela) e 10 cm (com tela) para as velocidades de (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s. ....	88
Figura 36 - Comparação entre as eficiências de coleta, em função do campo elétrico, obtidas com os espaçamentos de 28,5 cm (sem tela) e 23 cm (com tela) para as velocidades de (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s. ....	90
Figura 37 - Eficiências globais com 1 eletrodo de descarga (com tela) para diferentes espaçamentos com as velocidades de: (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s. ....	91
Figura 38 - Eficiências globais com 1 eletrodo de descarga (com tela) para diferentes velocidades do ar com os espaçamentos de: (a) 1,5 cm, (b) 10 cm e (c) 23 cm. ....	93
Figura 39 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga (com tela) e com a velocidade do ar de 1 cm/s para diferentes campos elétricos, com as distâncias de: (a) 1,5 cm, (b) 10 cm e (c) 23 cm. ....	94
Figura 40 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga (com tela) e com o campo elétrico de 3,08 kV/cm, em função das distâncias, com as velocidades do ar: (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s. ....	95
Figura 41 - Fotos da unidade experimental. ....	99
Figura 42 - Representação da unidade experimental contendo o precipitador eletrostático de dois estágios. ....	100
Figura 43 - Ionizador sem os eletrodos de descarga: (a) vista lateral e (b) vista superior. ....	101
Figura 44 - Peça suporte para os eletrodos de descarga: (a) vista frontal e (b) vista traseira (com os eletrodos). ....	102

Figura 45 - Peças suporte para os eletrodos de descarga revestida com fita de alumínio scotch (a) lado superior com ionizador agulha, (b) lado inferior com ionizador agulha e (c) ionizador escova de carbono.....	102
Figura 46 – Vista superior do ionizador (a) sem os eletrodos de descarga e com os eletrodos de descarga (b) agulha e (c) escova de carbono. ....	103
Figura 47 - Coletor (a) vista lateral e (b) vista superior. ....	103
Figura 48 - Distâncias entre o ionizador e o coletor (a) 0 cm, (b) 25 cm e (c) 75 cm.....	105
Figura 49 - Distribuição granulométrica do aerossol na entrada do precipitador eletrostático de duplo estágio (base numérica). ....	107
Figura 50 - Eficiências de carregamento em função do tempo utilizados para o cálculo das eficiências fracionárias com (a) 10 nm, (b) 15 nm e (c) 20 nm.....	109
Figura 51 - Eficiências de coleta com o precipitador de duplo estágio para a etapa 1 (voltagem do ionizador constante) para a velocidade do ar de 50 cm/s com diferentes voltagens do coletor em (a) Scan Mode e (b) Single Mode.....	110
Figura 52 – Eficiências de coleta com o precipitador de duplo estágio para a etapa 2 (voltagem do coletor constante) para diferentes voltagens do ionizador, com a velocidade de 50 cm/s, em (a) Scan Mode e (b) Single Mode.....	111
Figura 53 - Eficiências de coleta (Single Mode) para a etapa 3 (influência da velocidade do ar) nas velocidades de (a) 75 cm/s, com a voltagem constante do ionizador, e (b) a comparação com as velocidades de 20, 50 e 75 cm/s com as voltagens de referência (ionizador: -5 kV e coletor: +5 kV). ....	112
Figura 54 - Eficiências de coleta com o precipitador de duplo estágio para a etapa 4 (influência da distância entre o ionizador e o coletor) com as voltagens do coletor e do ionizador constantes, com a velocidade de 50 cm/s, em (a) Scan Mode e (b) Single Mode. ....	114
Figura 55 - Eficiências de coleta com o precipitador de duplo estágio para a etapa 4 (influência da distância entre o ionizador e o coletor) para diferentes voltagens do ionizador, com a velocidade de 50 cm/s e a distância entre o ionizador e o coletor de 75 cm, em (a) Scan Mode e (b) Single Mode. ....	115
Figura 56 - Eficiências de coleta (Single Mode) para a etapa 5 (influência do tipo de ionizador) com (a) 20 cm/s (escova de carbono) com diferentes voltagens do coletor, e a comparação entre o tipo agulha e a escova de carbono com 50 cm/s e as voltagens do coletor de (b) +2 kV, (c) +3 kV e (d) + 5 kV.....	117
Figura 57 - Carga por número de partículas para os experimentos descritos na Tabela 3, com o ionizador e o coletor operando com as respectivas voltagens off-off, on-off e on-on. ....	119

Figura 58 - Concentrações de ozônio com (a) as velocidades de 50 e 75 cm/s e com a distância de 0 cm em função da voltagem do coletor, (b) velocidade de 50 cm/s e as distâncias de 0 cm e 75 cm como função da voltagem do ionizador e (c) em função da distância entre o ionizador e o coletor com as voltagens de referência.....	120
Figura 59 - Filtro de purificação.....	133
Figura 60 - Gerador de nanopartículas, vista dos lados: (a) posterior e (b) anterior. ....	134
Figura 61 - Representação esquemática do interior do gerador de partículas. ....	134
Figura 62 - Secador por difusão. ....	134
Figura 63 - Neutralizador de aerossol.....	135
Figura 64 - Classificador eletrostático.....	136
Figura 65 - Vista transversal do impactador.....	136
Figura 66 - Esquema do fluxo no interior do classificador com DMA longo. ....	138
Figura 67 - Contador de partículas. ....	138
Figura 68 - Representação do interior do contador de partículas. ....	140
Figura 69 - Curvas corrente-tensão com 1 eletrodo de descarga em função dos diferentes espaçamentos de entrada para: (a) 2 cm/s - 0 g/L, (b) 2 cm/s - 0,1 g/L, (c) 4 cm/s - 0 g/L, (d) 4 cm/s - 0,1 g/L, (e) 5 cm/s - 0 g/L e (f) 5 cm/s - 0,1 g/L.....	141
Figura 70 - Curvas corrente-tensão com 3 eletrodos de descarga em função dos diferentes espaçamentos de entrada para: (a) 2 cm/s - 0 g/L, (b) 2 cm/s - 0,1 g/L, (c) 4 cm/s - 0 g/L, (d) 4 cm/s - 0,1 g/L, (e) 5 cm/s - 0 g/L e (f) 5 cm/s - 0,1 g/L.....	141
Figura 71 - Curvas corrente-tensão com a tela coletora e 1 eletrodo de descarga em função dos diferentes espaçamentos de entrada para: (a) 2 cm/s - 0 g/L, (b) 2 cm/s - 0,1 g/L, (c) 4 cm/s - 0 g/L, (d) 4 cm/s - 0,1 g/L, (e) 5 cm/s - 0 g/L e (f) 5 cm/s - 0,1 g/L. ....	142
Figura 72 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga e com a velocidade do ar de 1 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,14 kV/cm e (b) 3,29 kV/cm. ....	143
Figura 73 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga e com a velocidade do ar de 2 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,23 kV/cm, (c) 3,29 kV/cm e (d) 3,38 kV/cm. ....	143
Figura 74 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga e com a velocidade do ar de 4 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,23 kV/cm, (c) 3,29 kV/cm e (d) 3,38 kV/cm. ....	143

Figura 75 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga e com a velocidade do ar de 5 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,23 kV/cm, (c) 3,29 kV/cm e (d) 3,38 kV/cm. ....	144
Figura 76 - Eficiências fracionárias obtidas com 3 eletrodos de descarga e com a velocidade do ar de 1 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,11 kV/cm, (b) 3,14 kV/cm, (c) 3,29 kV/cm, (d) 3,35 kV/cm e (e) 3,42 kV/cm.....	144
Figura 77 - Eficiências fracionárias obtidas com 3 eletrodos de descarga e com a velocidade do ar de 2 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,11 kV/cm, (c) 3,14 kV/cm, (d) 3,23 kV/cm, (e) 3,29 kV/cm, (f) 3,35 kV/cm, (g) 3,38 kV/cm e (h) 3,42 kV/cm. ....	145
Figura 78 - Eficiências fracionárias obtidas com 3 eletrodos de descarga e com a velocidade do ar de 4 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,11 kV/cm, (c) 3,14 kV/cm, (d) 3,23 kV/cm, (e) 3,29 kV/cm, (f) 3,35 kV/cm, (g) 3,38 kV/cm e (h) 3,42 kV/cm. ....	145
Figura 79 - Eficiências fracionárias obtidas com 3 eletrodos de descarga e com a velocidade do ar de 5 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,11 kV/cm, (c) 3,14 kV/cm, (d) 3,23 kV/cm, (e) 3,29 kV/cm, (f) 3,35 kV/cm, (g) 3,38 kV/cm e (h) 3,42 kV/cm. ....	146
Figura 80 – Eficiências fracionárias obtidas com a distância de 1,5 cm (1 fio + tela) para diferentes campos elétricos, com as velocidades de (a) 2 cm/s, (b) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.....	146
Figura 81 - Eficiências fracionárias obtidas com a distância de 10 cm (1 fio + tela) para diferentes campos elétricos, com as velocidades de (a) 2 cm/s, (b) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.....	147
Figura 82 - Eficiências fracionárias obtidas com a distância de 23 cm (1 fio + tela) para diferentes campos elétricos, com as velocidades de (a) 2 cm/s, (b) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.....	147

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrões Estaduais de Qualidade do Ar.....	27
Tabela 2 - Condições operacionais utilizadas nos experimentos com 1 eletrodo de descarga.	56
Tabela 3 - Condições operacionais utilizadas para a realização dos experimentos com 3 eletrodos de descarga.....	58
Tabela 4 - Experimentos realizados com a tela coletora. ....	61
Tabela 5 - Concentração de entrada das partículas e tempo de residência para cada velocidade do ar. ....	62
Tabela 6 - Mediana e desvio padrão geométrico ( $\sigma$ ), para os diferentes espaçamentos de entrada e velocidades do ar, em bases mássica e numérica.....	62
Tabela 7 - Experimentos realizados com o precipitador eletrostático de duplo estágio.....	105
Tabela 8 - Concentração de entrada das partículas e tempo de residência para cada velocidade do ar (precipitador de duplo estágio).....	108
Tabela 9 - Mediana e desvio padrão geométrico ( $\sigma$ ), para as diferentes velocidades do ar, em bases mássica e numérica (precipitador de duplo estágio).....	108
Tabela 10 - Experimentos selecionados para medição da carga das partículas.....	118

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Definição</b>	<b>Unidade</b>
$\lambda$	Caminho Livre Médio	$\mu\text{m}$
$p$	Pressão do Gás	atm
$T$	Temperatura do Gás	$^{\circ}\text{C}$
$p_0$	Pressão do Gás (CNTP)	atm
$T_0$	Temperatura do Gás (CNTP)	$^{\circ}\text{C}$
$E$	Campo Elétrico	V/m
$E_{ps}$	Campo Elétrico Pseudo-Homogêneo	V/m
$I$	Corrente Elétrica	$\mu\text{A}$
$V$	Voltagem	V
$\epsilon_0$	Permissividade Elétrica	As/Vm
$s$	Distância entre os Eletrodos de Coleta e Descarga	m
$\eta$	Eficiência do Precipitador	%
$C_i$	Concentração de Partículas na Entrada	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
$C_f$	Concentração de Partículas na Saída	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
$\eta_D(d_p)$	Eficiência de Coleta do Modelo de Deutsch	%
$w(d_p)$	Velocidade de Migração das Partículas	m/s
$d_p$	Diâmetro da Partícula	m
$l$	Comprimento do Eletrodo de Coleta	m
$u$	Velocidade do Gás	m/s
$A$	Área de Dois Eletrodos de Coleta Adjacentes	$\text{m}^2$
$Q$	Taxa de Fluxo Volumétrico do Gás	$\text{m}^3/\text{s}$
$h$	Altura dos Eletrodos de Coleta	m
$Q_p^{\infty}$	Carga de Saturação	As
$\mu$	Viscosidade do Gás	kg/ms
$Z$	Mobilidade Elétrica das Partículas	$\text{m}^2/\text{Vs}$
$\sigma$	Desvio Padrão Geométrico	nm

### **Adimensionais**

$Cu$	Coeficiente de Cunningham	Adimensional
$K_n$	Número de Knudsen	Adimensional
$Re$	Número de Reynolds	Adimensional
$\delta$	Densidade Relativa do Gás	Adimensional

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS.....</b>	<b>24</b>
2.1 Objetivo Geral.....	24
2.2 Objetivos Específicos .....	24
<b>CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>25</b>
3.1 Emissão de Material Particulado .....	25
3.2 Precipitador Eletrostático.....	27
3.3 Fenômenos Envolvidos na Ionização das Partículas .....	31
3.4 Carregamento Elétrico das Partículas .....	34
3.5 Eficiência de Coleta de Partículas .....	38
3.6 Estado da Arte.....	42
3.6.1 Estudos Experimentais .....	43
3.6.2 Estudos Numéricos .....	47
<b>CAPÍTULO 4 – PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO DE SIMPLES ESTÁGIO .....</b>	<b>52</b>
4.1 Introdução .....	52
4.2 Metodologia.....	52
4.2.1 Unidade Experimental .....	52
4.2.2 Precipitador Eletrostático e Procedimento Experimental.....	54
4.2.2.1 Eletrodos de Descarga: 1 Fio.....	55
4.2.2.2 Eletrodos de Descarga: 3 Fios .....	56
4.2.2.3 Tela Coletora e 1 Eletrodo de Descarga .....	58
4.3 Resultados e Discussão .....	61
4.3.1 Propriedades do Aerossol de Entrada.....	61
4.3.2 Eletrodos de Descarga: 1 Fio .....	63
4.3.2.1 Características Elétricas.....	63
4.3.2.2 Eficiências Globais de Coleta de Partículas .....	66

4.3.2.3 Eficiências Fracionárias.....	69
4.3.3 Eletrodos de Descarga: 3 Fios .....	73
4.3.3.1 Características Elétricas.....	73
4.3.3.2 Eficiências Globais de Coleta de Partículas .....	76
4.3.3.3 Eficiências Fracionárias.....	80
4.3.4 Comparação entre 1 e 3 eletrodos de descarga .....	83
4.3.5 Inclusão da Tela Coletora e 1 Eletrodo de Descarga .....	83
4.3.5.1 Características Elétricas.....	83
4.3.5.2 Comparação das Eficiências Globais Sem e Com a Presença da Tela Coletora .....	85
4.3.5.3 Influência da Distância .....	90
4.3.5.4 Influência da Velocidade do Ar.....	92
4.3.5.5 Eficiência Fracionárias com a Tela Coletora.....	93
4.4 Considerações Finais .....	95
<b>CAPÍTULO 5 – PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO DE DUPLO ESTÁGIO.....</b>	<b>98</b>
5.1 Introdução .....	98
5.2 Metodologia.....	98
5.2.1 Unidade Experimental.....	98
5.2.2.1 Etapas do Estudo .....	103
5.2.2.2 Eficiência de Coleta.....	106
5.3 Resultados e Discussão.....	107
5.3.1 Propriedades do Aerossol na Entrada.....	107
5.3.2 Eficiência de Coleta de Partículas .....	108
5.3.2.1 Etapa 1: Influência da Voltagem do Coletor .....	109
5.3.2.2 Etapa 2: Influência da Voltagem do Ionizador.....	111
5.3.2.3 Etapa 3: Influência da Velocidade do Ar.....	112
5.3.2.4 Etapa 4: Influência da Distância entre o Ionizador e o Coletor.....	113

5.3.2.5 Etapa 5: Influência do Tipo de Ionizador .....	116
5.3.3 Carga das Partículas .....	117
5.3.4 Concentração de Ozônio .....	119
5.4 Considerações Finais .....	121
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO .....</b>	<b>123</b>
<b>CAPÍTULO 7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>125</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>126</b>
<b>APÊNDICE A – DETALHAMENTO DA UNIDADE EXPERIMENTAL DO CAPÍTULO 4</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE B – CURVAS CORRENTE-TENSÃO .....</b>	<b>141</b>
<b>APÊNDICE C – EFICIÊNCIAS FRACIONÁRIAS .....</b>	<b>143</b>

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A liberação de altas concentrações de partículas na atmosfera é um problema que vem sendo discutido há algumas décadas, mas que ainda se apresenta como um desafio sob diversos aspectos. A inalação dessas partículas, especialmente se de forma periódica, desencadeia problemas respiratórios e cardiovasculares graves, câncer de pulmão, entre outros, podendo levar a óbito (OMS, 2021). Nesse contexto de riscos à saúde pública, torna-se crucial adotar medidas eficazes para controlar a poluição do ar. Desta forma, diversos equipamentos de controle da poluição do ar têm ganhado destaque, tais como precipitadores eletrostáticos, filtros de manga e lavadores. Além da sua ampla difusão, eles também demonstram elevadas eficiências, que variam de acordo com as condições operacionais empregadas. Entretanto, em face da grande quantidade de partículas liberadas pelas atividades industriais e da sua natureza nociva, surge a necessidade de que tais equipamentos alcancem uma eficiência de coleta de partículas o mais próximo possível de 100%.

Logo, a utilização do precipitador eletrostático se apresenta como uma opção vantajosa. Esse equipamento se destaca por sua versatilidade, permitindo operações em uma variedade de condições. Além disso, ele oferece uma vida útil prolongada, queda de pressão reduzida, custos de manutenção baixos e, dependendo do intervalo de diâmetro das partículas, pode atingir eficiência de coleta elevada, acima de 95% (PARKER, 1997a). Esse equipamento possui dois componentes principais, os eletrodos de coleta e descarga. O eletrodo de descarga é carregado negativamente ou positivamente, enquanto o eletrodo de coleta é aterrado. Por conta disso, é criado um campo elétrico no interior do precipitador eletrostático que permite a coleta de partículas a partir da deposição na superfície do eletrodo de coleta. Esse equipamento apresenta algumas limitações, como a geração de ozônio na etapa de ionização, devido à uma reação em cadeia de dissociação de  $O_2$  (BADAMI et al., 2023; PARK et al., 2023). Logo, o desempenho do precipitador eletrostático é influenciado por uma série de fatores, como temperatura, umidade, velocidade, campo elétrico e geometria.

A maior parte dos estudos envolvendo esse equipamento sugere o aumento da eficiência através de modificações nas condições operacionais, como velocidade e campo elétrico. Apesar de existirem uma série de estudos sobre o precipitador eletrostático, os tópicos que envolvem seus parâmetros geométricos ainda são negligenciados em comparação com as condições operacionais. Ainda assim, nos últimos anos diversos estudos foram desenvolvidos acerca do tema e foi observado que pequenas alterações, como a adição de um eletrodo de descarga, por exemplo, podem resultar em um aumento significativo da eficiência de coleta (ANDRADE;

GUERRA, 2021; ARIF *et al.*, 2018; KASDI, 2016a) e na otimização da distribuição do campo elétrico no interior do precipitador eletrostático (WANG, 2020). Além disso, constatou-se que diferentes configurações envolvendo variações nos diâmetros ou espaçamentos de fios, para citar alguns parâmetros, podem apresentar desempenho equivalente sob determinadas condições operacionais (LIMA, 2021).

Esses estudos também indicam que a geometria dos componentes internos do precipitador eletrostático influencia os mecanismos de carregamento e coleta das partículas. Dessa forma, o presente trabalho objetiva avaliar o efeito de modificações geométricas na eficiência de coleta de nanopartículas (6,15 – 241,4 nm) em precipitadores eletrostáticos de simples e duplo estágio e os parâmetros de velocidade e campo elétrico, a fim de determinar as condições de operação do equipamento que apresentam melhor desempenho.

## **CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar a influência dos parâmetros de projeto de dois precipitadores eletrostáticos em escala de bancada na eficiência de coleta de nanopartículas (6,15 – 241,4 nm) a partir de modificações geométricas dos equipamentos.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar as características da distribuição granulométrica e da concentração do aerossol utilizado na precipitação eletrostática;
- Avaliar as características elétricas dos precipitadores eletrostáticos com diferentes configurações e condições operacionais;
- Investigar a influência das configurações geométricas no tempo de carregamento de partículas;
- Comparar as eficiências globais e fracionárias de coleta de partículas obtidas com as configurações geométricas avaliadas;
- Determinar a configuração geométrica com a qual o precipitador eletrostático apresentou o melhor desempenho.

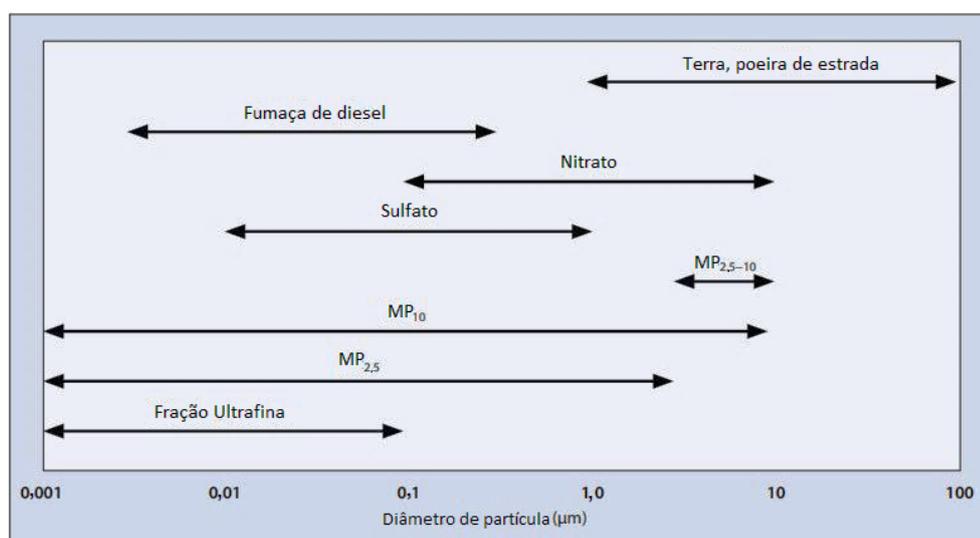
## CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido ao aumento da poluição do ar nos últimos anos, e ao conseqüente aumento de doenças respiratórias e cardiovasculares na população, fizeram-se necessários a implementação de uma legislação ambiental e o desenvolvimento de equipamentos para reduzir a concentração de partículas emitidas na atmosfera. A análise mais detalhada desses tópicos será conduzida nas seções subseqüentes.

### 3.1 Emissão de Material Particulado

O material particulado é uma complexa mistura de componentes com características químicas e físicas diversas, como sulfatos, nitratos, amônia, cloreto de sódio, carbono, poeira mineral e água. Esses poluentes são classificados como primários, emitidos diretamente na atmosfera, ou secundários, formados na própria atmosfera. Possuem uma natureza dinâmica e sofrem transformações químicas e físicas em suspensão no ar. Além disso, podem ser classificados quanto ao seu diâmetro aerodinâmico, que corresponde ao tamanho de uma esfera de densidade unitária com as mesmas características aerodinâmicas da partícula de interesse. Assim, são subdivididos em  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ , ou seja, partículas com diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 10 e 2,5  $\mu\text{m}$ , respectivamente. O potencial nocivo dessas partículas varia com o tamanho e com outras características físicas, a composição química e a origem das mesmas (OMS, 2005). A Figura 1 exibe uma comparação entre a faixa de tamanho do material particulado e outros tipos de partículas.

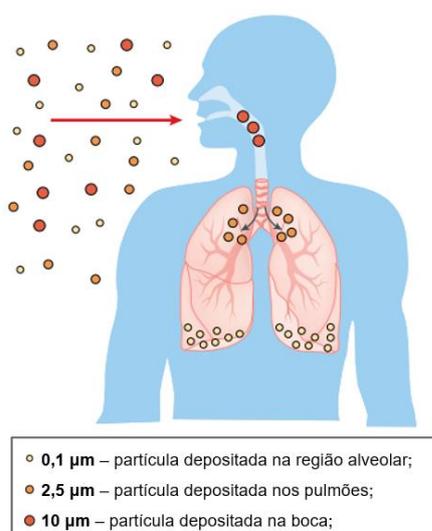
**Figura 1 - Faixa de tamanho do material particulado e de outros tipos de partículas.**



Fonte: Adaptado de OMS (2005).

A emissão do material particulado na atmosfera ocorre principalmente por processos industriais, que aumentam continuamente em todo o mundo. Ao serem inaladas, as partículas micrométricas e nanométricas, com ordens de grandeza de  $10^{-6}$  e  $10^{-9}$  m, respectivamente, são depositadas ao longo do sistema respiratório, como mostrado na Figura 2. Desse modo, a exposição a longo prazo acarreta doenças cardiovasculares e respiratórias na população (KARLSSON *et al.*, 2009; MARTIN *et al.*, 2023).

**Figura 2 - Penetração do material particulado no sistema respiratório.**



Fonte: Adaptado de Morawska e Buonanno (2021).

Logo, foi estabelecida uma legislação ambiental com base na necessidade de reduzir a concentração de poluentes emitidos na atmosfera. Os primeiros padrões de qualidade do ar no Brasil foram estabelecidos pelo IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente) e aprovados pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) pela Resolução CONAMA nº 03/90. No Estado de São Paulo, a determinação dos limites de material particulado e ozônio foi realizada através do Decreto Estadual nº 8468/76, que foi posteriormente atualizado para o Decreto Estadual nº 59113/2013 (Tabela 1) (SÃO PAULO, 2013). Essa atualização estabeleceu metas progressivas e se baseou nos limites que a Organização Mundial da Saúde (OMS) publicou em 2005. Em 2024, está em vigor no Brasil a meta intermediária 1 e, após seu cumprimento, entrarão em vigor as metas intermediárias 2 e 3. Entretanto, em São Paulo a meta intermediária 2 está em vigor desde 01/01/2022. O objetivo é atingir os padrões finais determinados pela OMS. Nos próximos anos está prevista uma redução ainda maior nas concentrações permitidas (PADRÕES, 2023). Em relação à concentração de ozônio permitida, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, em inglês) estabeleceu em 2015 o limite de 0,07 ppm, que corresponde a  $137 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para esse gás (EPA, 2023).

Tabela 1 - Padrões Estaduais de Qualidade do Ar.

Poluente	Tempo de Amostragem	Meta Intermediária 1	Meta Intermediária 2	Meta Intermediária 3	Padrões Finais
		( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Partículas Inaláveis (MP <sub>10</sub> )	24 horas	120	100	75	50
	Média Aritmética Anual	40	35	30	20
Partículas Inaláveis Finas (MP <sub>2,5</sub> )	24 horas	60	50	37	25
	Média Aritmética Anual	20	17	15	10
Ozônio (O <sub>3</sub> )	8 horas	140	130	120	100

Fonte: SÃO PAULO, 2013.

Com base no que foi exposto, a implementação de sistemas de limpeza de gases é essencial para reduzir a concentração de partículas emitidas na atmosfera pelos processos industriais. Dentre os principais equipamentos utilizados para a coleta de material particulado destacam-se os filtros de manga, lavadores, ciclones e precipitadores eletrostáticos. Para a coleta de micropartículas, os precipitadores eletrostáticos e os filtros de manga são os mais utilizados e ambos possuem alta eficiência, possibilidade de operarem com elevadas vazões e permitirem a recuperação do material coletado sem tratamentos posteriores. Entretanto, as mangas utilizadas nos filtros de manga apresentam uma maior queda de pressão e uma menor vida útil que os componentes do precipitador eletrostático e precisam ser substituídas de forma periódica, o que requer um maior custo de manutenção (LI *et al.*, 2019a; ZHENG *et al.*, 2018a). Logo, a depender do tipo de processo e do limite de emissão imposto pelo órgão ambiental responsável, a utilização do precipitador eletrostático pode ser mais indicada.

### 3.2 Precipitador Eletrostático

O precipitador eletrostático (Figura 3) é um dispositivo de limpeza de gases comumente utilizado para remoção de partículas em instalações internas residenciais, comerciais e médicas, removendo até mesmo micro-organismos presentes no ar. É a tecnologia mais disseminada em termoelétricas a carvão, metalúrgicas e em indústrias de incineração de resíduos e de produção

de vidro, e atinge eficiências de coleta superiores a 99%. Esse equipamento pode operar a úmido ou a seco, mas a operação a seco é a mais utilizada por não necessitar de etapas subsequentes para reaproveitamento do material coletado (KRUPA *et al.*, 2019; ISLAMOV, 2018; YANG *et al.*, 2018; DONG *et al.*, 2019).

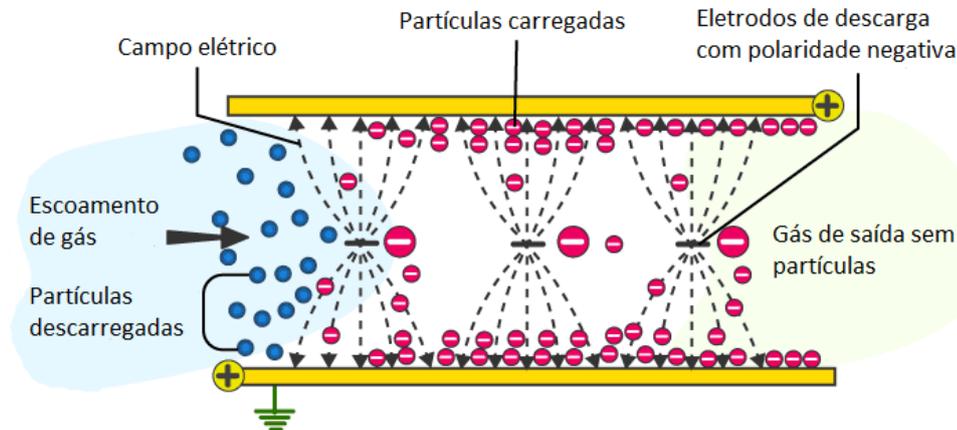
**Figura 3 - Precipitador eletrostático industrial.**



Fonte: SENOTAY, 2018.

Os principais componentes dos precipitadores eletrostáticos são os denominados eletrodos de coleta e descarga. Os eletrodos de descarga são carregados positivamente ou negativamente através do fornecimento de uma alta voltagem, enquanto os eletrodos de coleta são aterrados. Assim, é criado um campo elétrico no interior do equipamento (Figura 4). Sob um campo elétrico forte, ocorre uma descarga elétrica, ou descarga corona, entre os eletrodos de descarga e coleta, que ioniza o gás presente no duto do precipitador eletrostático. Desse modo, as partículas no escoamento de gás são eletricamente carregadas e então atraídas para os eletrodos de coleta (PARK *et al.*, 2018; HE; DASS, 2018a; YANG *et al.*, 2018). Caso as etapas de carregamento elétrico e de coleta de partículas ocorram em uma mesma seção, o precipitador eletrostático é classificado como simples estágio, caso contrário, são classificados como duplo estágio.

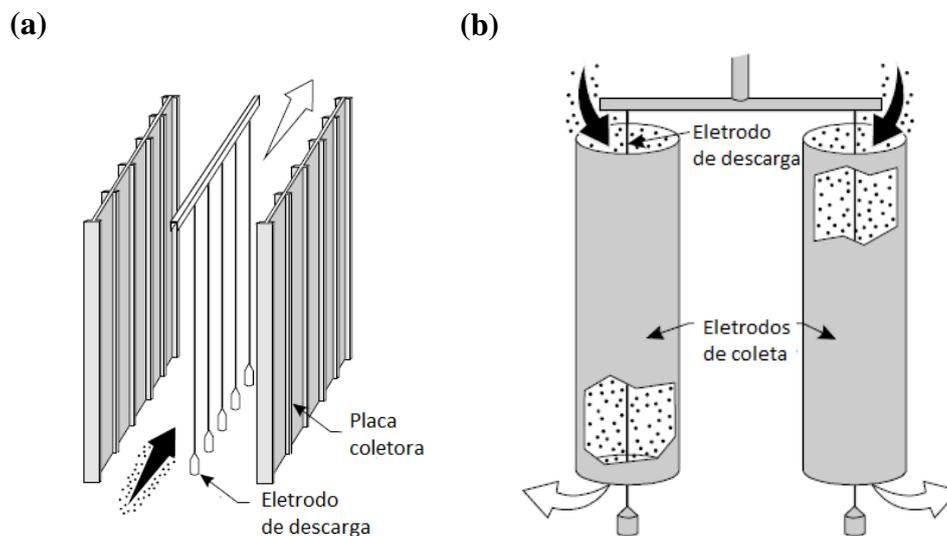
**Figura 4 - Representação do campo elétrico no interior do precipitador eletrostático do tipo placa-fio (vista superior).**



Fonte: Adaptado de Byju's (2020).

Esses eletrodos possuem geometrias diversas, que variam de acordo com o tipo e as características do processo no qual o precipitador eletrostático é utilizado. Com relação aos eletrodos de coleta, os precipitadores são classificados como placa-fio ou tubo-fio. No tipo placa-fio (Figura 5a), esse equipamento possui placas planas como eletrodos de coleta e, na região central entre essas placas, são dispostos os eletrodos de descarga enfileirados. No tipo tubo-fio (Figura 5b), o eletrodo de coleta é formado por um cilindro oco, e no centro desse cilindro é disposto o eletrodo de descarga. Os eletrodos de coleta são fabricados geralmente a partir de aço carbono e aço inoxidável, mas dependendo da aplicação outros materiais podem ser utilizados (TAVARES, 2015).

**Figura 5 - Representação de um precipitador eletrostático do tipo (a) placa-fio e (b) tubo-fio.**

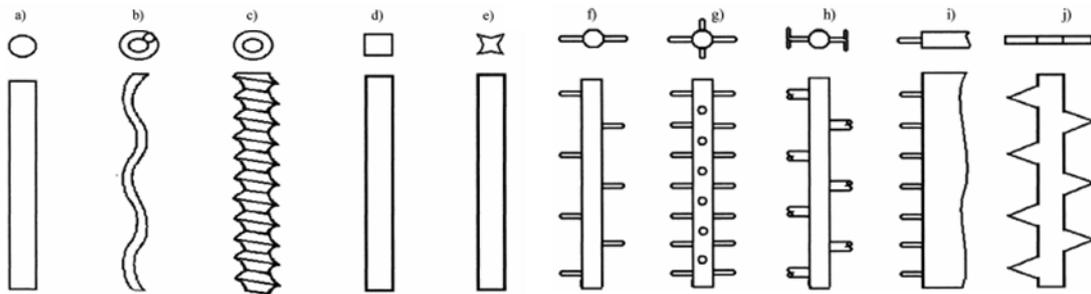


Fonte: Adaptado de GlobalSpec (2012).

No caso dos eletrodos de descarga, a variedade das geometrias que podem ser utilizadas é mais ampla, como pode ser observado na Figura 6. Cada geometria influencia a precipitação eletrostática das partículas, pois os eletrodos de descarga alteram o campo elétrico gerado no interior do equipamento. Alguns dos materiais mais utilizados para fabricação dos eletrodos de descarga são aço inoxidável, titânio, cobre e tungstênio (TAVARES, 2015).

Durante alguns anos, os fios cilíndricos (Figura 6a) foram a geometria mais utilizada, entretanto, os eletrodos de descarga rígidos também começaram a ganhar espaço por sua maior resistência física e eficiência, com destaque para os eletrodos com emissores na direção do escoamento (Figura 6f-j), que contribuem para a obtenção de maiores correntes elétricas (ALI *et al.*, 2017). Alguns estudos também avaliaram a utilização de eletrodos do tipo escova de carbono, por gerarem ozônio em menor concentração (PARK *et al.*, 2023).

**Figura 6 – Formatos dos eletrodos de descarga: (a) Haste lisa, (b) helicoidal, (c) fio e haste roscados, (d) haste retangular, (e) haste em forma de estrela, (f) haste com agulhas dispostas alternadamente, (g) haste com agulhas cruzadas, (h) haste com emissores (rígidos), (i) placa com agulhas e (j) haste com serras.**



Fonte: Adaptado de Brocilo (2003).

As dimensões do precipitador eletrostático e as condições operacionais utilizadas variam de acordo com o tipo de aplicação. De maneira geral, considera-se a velocidade padrão entre 1 e 2 m/s em processos industriais (PARKER, 1997b), porque maiores velocidades favorecem a reentrada de partículas coletadas no escoamento de aerossol (XUE e WEN, 2020). Mesmo em aplicações industriais, o tamanho do precipitador eletrostático pode variar de forma considerável. Segundo Ahmad e Smail (2018) *apud* PEDCo Environmental (1985), são utilizadas placas coletoras com comprimentos entre 0,91 e 4,57 m e alturas entre 2,74 e 10,97 m. Novos modelos mais compactos também estão sendo fabricados, como por exemplo os equipamentos da marca Purified Air, na qual o maior precipitador eletrostático disponível possui 1,80 m de comprimento, 0,63 m de altura e 0,64 m de largura (ESP, 2023). Em relação ao campo elétrico, usualmente é utilizada a faixa entre 3,5 e 4,0 kV/cm.

### 3.3 Fenômenos Envolvidos na Ionização das Partículas

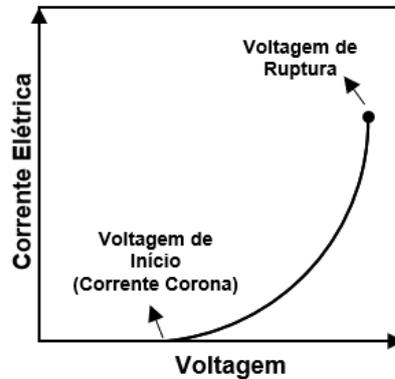
A descarga corona varia principalmente com a geometria do eletrodo e com a polaridade da voltagem aplicada, entre outros. As coronas de polaridade positiva e negativa apresentam características distintas de corrente-voltagem, principalmente devido à grande diferença de massa entre os íons positivos e os elétrons (RIBA; MOROSINI; CAPELLI, 2018). A descarga corona de polaridade positiva é mais comumente empregada em sistemas de ventilação *indoor*, devido à sua menor geração de ozônio. Por outro lado, a polaridade negativa é recomendada para aplicações industriais, devido à sua maior estabilidade e à sua capacidade de alcançar voltagens e correntes elétricas mais elevadas. Um estudo comparativo entre os resultados obtidos com ambas as polaridades foi realizado por Kaci *et al.*, (2015), em que foi observado que a polaridade negativa forneceu correntes elétricas superiores, em até 400  $\mu\text{A}$ , às obtidas com a polaridade positiva, para as mesmas voltagens utilizadas. Segundo Riba, Morosini e Capelli (2018), a corona negativa produz cerca de 50 vezes mais elétrons do que a corona positiva. Entretanto, a corona negativa gera um menor número de elétrons energéticos (que adquiriram energia cinética adicional) na região próxima aos eletrodos de descarga, comparado à descarga positiva.

A corrente corona gerada pelo movimento iônico é composta de três partes, sendo elas a corrente de migração, a corrente de convecção e a corrente de difusão. Os efeitos de migração, com a força Coulomb, dominam a geração da corrente corona (YANG *et al.*, 2018). A intensidade da corrente elétrica depende da geometria e das dimensões do precipitador eletrostático. Desse modo, para determinar a faixa de operação da voltagem desse equipamento é importante conhecer a relação entre essas variáveis, que podem ser analisadas através de uma curva corrente-tensão (Figura 7). Essa curva apresenta um perfil parabólico e é delimitada pelos pontos de início da corona e de ruptura dielétrica do gás (*breakdown*).

Segundo Yang *et al.* (2018), o ponto de início da corona é uma condição crítica quando o gás é ionizado por um campo elétrico de determinada intensidade, e a voltagem necessária para que isso ocorra é denominada de voltagem de início. Em aplicações práticas, a voltagem de início corresponde àquela na qual a corrente elétrica pode ser detectada. Por outro lado, de acordo com Kaci *et al.* (2015), a voltagem elétrica de ruptura é definida como o potencial entre dois eletrodos que fornece uma corrente elétrica estacionária em um gás localizado no espaço

entre dois eletrodos (fio-placa). Nesse ponto, ocorre a presença de uma faísca ou brilho luminoso próximo aos eletrodos de descarga.

**Figura 7 - Representação da curva corrente-tensão.**

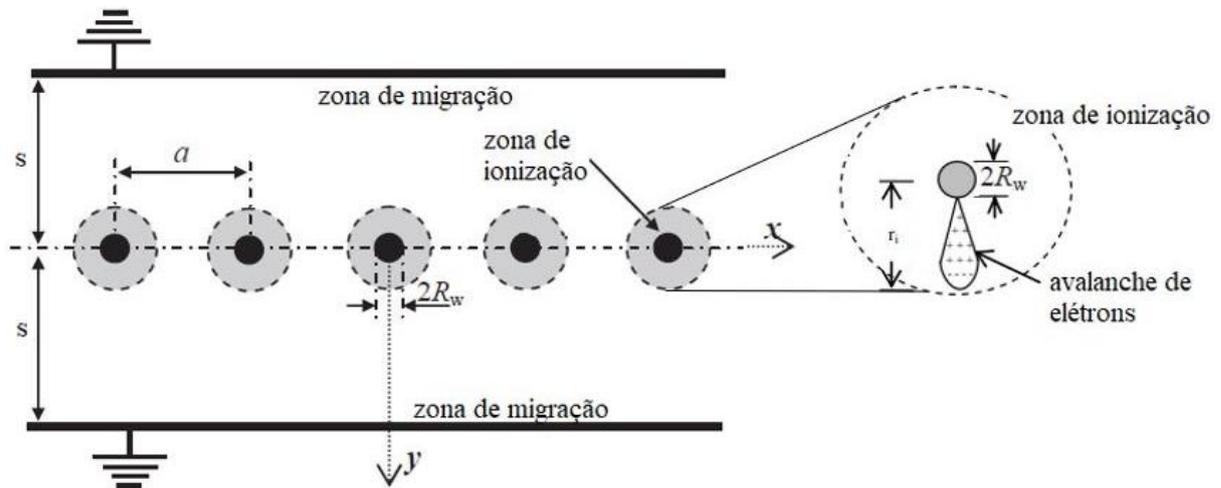


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O ponto de início da corona determina o início da ionização das moléculas de gás. Quando a voltagem aplicada ao precipitador excede àquela correspondente ao início da corona, as cargas dos íons se movem mais rápido e os novos íons são gerados a uma maior taxa (PARKER, 1997). Segundo He e Dass (2018a), a ionização se origina em uma região muito estreita, denominada zona de ionização (ou zona ativa), próxima à superfície do fio de descarga. A região entre a fronteira externa da zona de ionização e as placas coletoras é denominada de zona de migração (ou zona passiva). Na zona de migração, as partículas são carregadas pelos íons de gás induzidos pela descarga corona e então derivam em direção às placas coletoras sob a influência da força Coulomb, formando uma avalanche de elétrons. A Figura 8 representa as zonas de ionização e a avalanche de elétrons no interior do precipitador eletrostático.

De acordo com Riba, Morosini e Capelli (2018), a magnitude da descarga geralmente é limitada pela carga espacial, pois os íons emitidos pelo plasma circundando os eletrodos de alta voltagem tendem a se acumular na região entre os eletrodos. Desse modo, maiores voltagens são necessárias para gerar uma maior corrente de descarga. Entretanto, quando aumentada suficientemente, devido aos transportadores de carga adicionais gerados, pode ser produzida uma faísca no interior do equipamento. O campo elétrico possui um componente geométrico e um componente devido ao acúmulo de carga espacial.

**Figura 8 - Representação das zonas de ionização e da avalanche de elétrons, onde  $s$  é o espaçamento entre os fios e as placas,  $a$  é o espaçamento entre os fios,  $R_w$  é o raio do fio e  $r_i$  é o raio da zona de ionização.**



Fonte: Adaptado de Ziedan *et al.* (2010) e Kasdi (2016b).

A densidade de carga espacial é composta pela carga iônica espacial e pela carga espacial das partículas. Segundo Yang *et al.* (2018), geralmente a densidade de carga espacial das partículas é muito menor que a densidade de carga iônica, que afeta diretamente a carga da partícula e a sua migração em um campo elétrico. Portanto, a densidade de carga iônica deve aumentar para melhorar a remoção do material particulado. Zheng *et al.* (2018b) observaram que a densidade de carga iônica diminuiu acentuadamente longe do eletrodo de descarga e foi formada uma região de baixa densidade de carga iônica entre os eletrodos de descarga adjacentes. Portanto, as partículas carregadas provocaram um efeito de supressão, que enfraqueceu o campo elétrico ao redor do fio e impediu o movimento dos íons para as placas coletoras. A avalanche de elétrons foi afetada pelo campo enfraquecido próximo ao fio, e então o número de íons foi reduzido ainda mais.

Além da densidade de carga, o precipitador eletrostático apresenta a densidade de corrente. Para um precipitador do tipo placa-fio, com múltiplos fios, a densidade de corrente ao longo das placas coletoras apresenta um comportamento ondular, com os maiores valores da densidade de corrente próximo aos fios e os menores valores na região entre dois fios adjacentes. Esse mesmo perfil é observado para a densidade de carga. A densidade de corrente total inclui uma componente produzida pelas partículas carregadas. Quando a concentração de partículas aumenta, a densidade da carga espacial das partículas aumenta, enquanto a densidade iônica decresce. Entretanto, a componente da corrente produzida pelas partículas carregadas é

geralmente desconsiderada, porque a mobilidade elétrica das partículas carregadas é menor que a dos íons (Kasdi, 2016b; Yang *et al.*, 2018).

Outra propriedade que influencia diretamente no mecanismo de coleta é a resistividade da partícula, ou seja, a resistência à condução elétrica. Quando a resistividade é baixa, após a partícula ser depositada no eletrodo de coleta, a carga elétrica adquirida pela partícula é removida como corrente de fuga. Nesse caso, as forças eletrostáticas que mantêm as partículas depositadas nos eletrodos de coleta são muito fracas, de modo que estas podem facilmente reentrar no escoamento de gás. Por outro lado, quando a resistividade da partícula é muito alta, a corrente de fuga do eletrodo de coleta é baixa, e a carga elétrica é acumulada na superfície e dentro da camada de partículas. Devido ao acúmulo de carga, o potencial elétrico na superfície superior da camada de partículas aumenta, bem como o campo elétrico através dessa camada.

Quando o campo elétrico excede um determinado valor, ocorre a ruptura elétrica através da camada de partículas, formando uma pequena cavidade. Essa cavidade se torna uma fonte de íons gasosos de polaridade oposta emitidos no espaço entre os eletrodos, que escoam em direção aos eletrodos de descarga. Esse fenômeno é conhecido como descarga corona reversa. A carga acumulada na superfície da camada de partículas escoam sobre a superfície em direção à cavidade e então para o eletrodo de coleta. O processo de ionização pode ocorrer nessa zona de cavidade porque o campo elétrico nessa região, anterior à ruptura, possui uma intensidade suficiente para a ionização do gás, de valor similar ao campo elétrico na superfície do eletrodo. A descarga corona reversa reduz a eficiência de coleta do precipitador eletrostático devido à erupção das partículas depositadas nos eletrodos de coleta e à reentrada no escoamento de gás (KRUPA *et al.*, 2019).

### **3.4 Carregamento Elétrico das Partículas**

As partículas de aerossol em um precipitador eletrostático são carregadas pelos mecanismos de campo e de difusão. O carregamento por campo ocorre através do movimento rápido dos íons na presença de um campo elétrico, que resulta no carregamento elétrico das partículas através da colisão com os íons unipolares. Esse mecanismo é mais pronunciado para partículas com diâmetro maior que  $1\mu\text{m}$  (SARDARI *et al.*, 2018; HINDS, 1999).

Segundo Hinds (1999), quando uma partícula esférica descarregada é colocada em um campo elétrico uniforme, ela o distorce. A extensão da distorção das linhas de campo depende da permissividade relativa (constante dielétrica) do material da partícula e a carga na partícula.

Para uma partícula descarregada, quanto maior o valor da permissividade, maior o número de linhas de campo que convergem para a partícula.

Guo *et al.* (2017) simularam o comportamento das linhas de campo elétrico em uma partícula inicialmente descarregada. A Figura 9 exhibe os resultados obtidos, na qual a extremidade esquerda corresponde ao eletrodo de descarga e a extremidade direita ao eletrodo de coleta. Uma partícula descarregada (Figura 9a) faz com que mais linhas de campo elétrico interceptem sua superfície, de modo que as cargas de íons que se movem ao longo das linhas de campo bombardeiam a partícula para carregá-la. A carga da superfície irá, por sua vez, criar um campo elétrico local, então distorcendo as linhas externas de campo para longe da partícula (Figura 9b). Quando a carga de saturação é atingida (Figura 9c), as linhas de campo não irão mais interceptar a partícula pela extremidade frontal (esquerda), de modo que as cargas iônicas que se aproximam não serão capazes de colidir com a partícula. Porém, as cargas de polaridade oposta provenientes da extremidade direita, devido à corona reversa, serão capazes de colidir com a partícula.

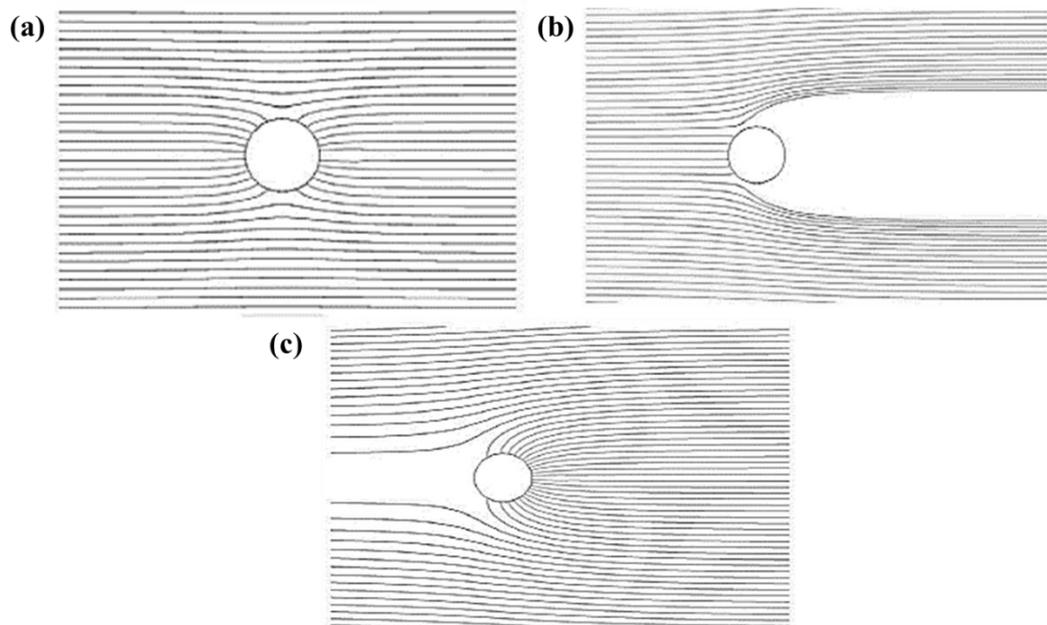
O carregamento por difusão ocorre pelas colisões aleatórias, ocasionadas pelo movimento Browniano, entre os íons unipolares e as partículas. O movimento browniano se torna pronunciado quando as partículas apresentam um tamanho próximo à dimensão molecular. Se a partícula é muito pequena, espera-se que ocorram algumas colisões por segundo e a inércia seja pequena por causa do tamanho das partículas, então a força de uma colisão individual é suficiente para fazer com que a partícula se mova. Colisões subsequentes, cujas direções são aleatórias, irão movê-la em outras direções, de modo que seu caminho percorrido será uma série de saltos curtos em uma direção e depois em outra (DE NEVERS, 2000).

Dessa forma, quando os íons colidem com uma partícula, eles aderem à superfície, e a partícula adquire carga. O carregamento por difusão não requer um campo elétrico externo e, a princípio, não depende do material da partícula. À medida que a carga se acumula, ela produz um campo que tende a repelir os íons adicionais, reduzindo a taxa de carregamento. Com o aumento da carga da partícula, cada vez menos íons possuem velocidade suficiente para superar a força repulsiva, e a taxa de carregamento tende lentamente a zero. Para partículas submicrométricas, o carregamento por difusão é o mecanismo predominante, mesmo na presença de um campo elétrico. Apesar desse fato ser bem difundido na literatura, há uma divergência na determinação do diâmetro limite das partículas a partir do qual esse mecanismo passa a ser dominante no carregamento elétrico. Sardari *et al.* (2018) e Qi *et al.* (2019) indicam que para esse mecanismo ser predominante as partículas devem possuir diâmetros inferiores a

1 $\mu\text{m}$ . Um estudo numérico mais recente desenvolvido por Zhu *et al.*, (2020) identificou que até o diâmetro de partícula de 0,3  $\mu\text{m}$  o mecanismo de carregamento por difusão é o predominante. É possível inferir que para partículas ainda menores esse mecanismo é ainda mais significativo, como indicado por Hinds (1999) e Riehle (1997).

Por conta do tamanho nanométrico dessas partículas e da dependência da probabilidade de colisão pelo movimento Browniano, a eficiência de coleta dessas partículas é reduzida em comparação com diâmetros maiores (PARKER, 1997a). Dessa forma, é necessário buscar alternativas para melhorar o desempenho do precipitador eletrostático nessa faixa de diâmetro, como por exemplo alterar o tempo de residência das partículas (GAO *et al.*, 2019).

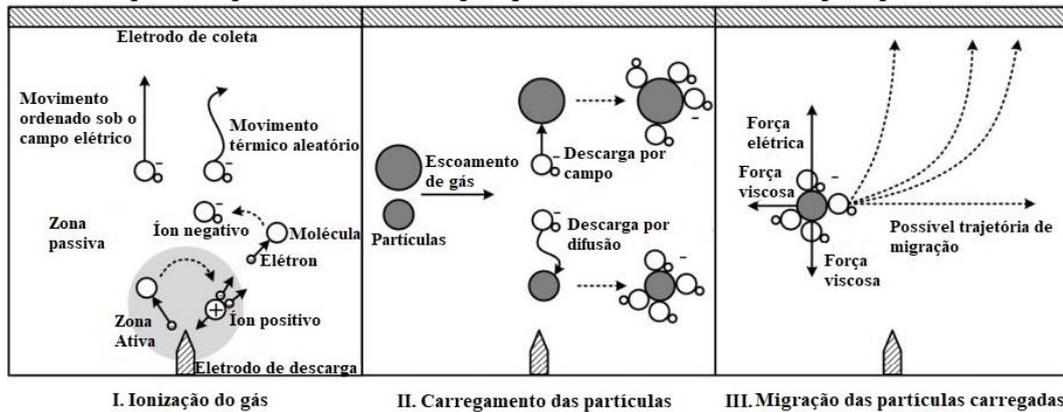
**Figura 9 - Linhas de campo ao redor de uma partícula: (a) descarregada, (b) com 50% da carga de saturação e (c) com a carga totalmente saturada.**



Fonte: Adaptado de Guo *et al.* (2017)

A Figura 10 exibe um esquema representativo de todas as etapas que ocorrem no interior do precipitador eletrostático para a coleta de partículas, assim como os principais fenômenos e mecanismos de cada etapa.

**Figura 10 - Esquema representativo das etapas que ocorrem no interior do precipitador eletrostático.**

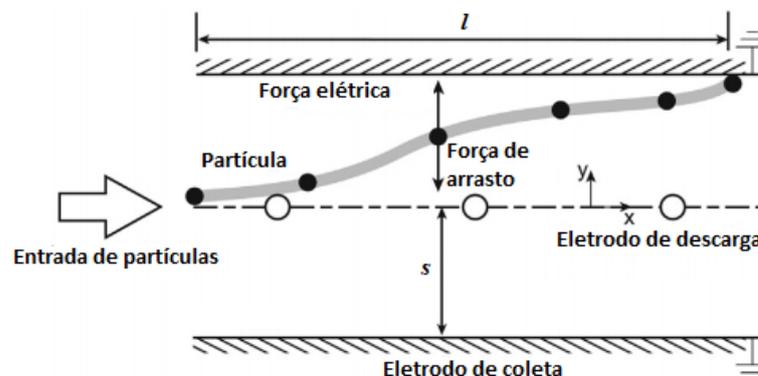


Fonte: Adaptado de Huang *et al.* (2015).

O estudo do comportamento das partículas em um precipitador eletrostático envolve a eletro-hidrodinâmica, que é a interação da eletrodinâmica e da hidrodinâmica e ocorre quando um fluido dielétrico se movimenta em um campo elétrico. Em um precipitador eletrostático, é o resultado da interação entre o campo de escoamento e o transporte de íons (YANG *et al.*, 2018).

Quando carregadas pelos íons gasosos, as partículas são submetidas não apenas à gravidade e a força de arrasto, mas também à uma força elétrica forte tal que elas podem migrar em direção às placas aterradas (HE e DASS, 2018b). As partículas neutras e carregadas são influenciadas pela força de arrasto exercida pelo escoamento de ar (Figura 11), que, por sua vez, é perturbado pelas partículas. Essa perturbação é menor se a concentração de partículas for pequena.

**Figura 11 - Representação das forças atuantes nas partículas no interior de um precipitador eletrostático (vista superior).**



Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2019b).

Em geral, a influência da distribuição de carga espacial induzida pela descarga corona no padrão de escoamento é forte, resultando em um escoamento secundário eletro-hidrodinâmico (HE e DASS, 2018b). Esse escoamento secundário é denominado de vento corona, vento elétrico ou vento iônico e ocorre devido à colisão dos íons elétricos de alta velocidade com moléculas neutras no ar, que resulta na transferência de energia cinética no escoamento pelo campo elétrico. O escoamento eletro-hidrodinâmico influencia a dinâmica entre as partículas carregadas (SHEN *et al.*, 2018; AIT SAID; NOURI e ZEBBOUDJ, 2015).

A direção do vento iônico é dos eletrodos de descarga para os eletrodos de coleta, e é geralmente diretamente perpendicular à direção do escoamento de gás primário. O vento iônico pode distorcer o padrão do escoamento primário, causando fortes turbulências. Normalmente, o nível de turbulência aumenta à medida que a voltagem aumenta. O escoamento secundário pode alterar significativamente o escoamento primário e impactar a eficiência de coleta de partículas, especialmente para partículas com o diâmetro na faixa de 0,1-1 $\mu$ m. Tipicamente, o número de Reynolds em um precipitador eletrostático é da ordem de  $10^4$ - $10^5$ , mas esse número pode aumentar devido ao escoamento eletro-hidrodinâmico. A instabilidade do escoamento aparece quando a força elétrica nos íons é maior que a força resultante da viscosidade do gás (JAWOREK *et al.*, 2018; NING *et al.*, 2016a).

### 3.5 Eficiência de Coleta de Partículas

A eficiência de coleta de partículas é influenciada pela classificação do precipitador eletrostático utilizado, ou seja, o tipo de operação, o número de estágios e a geometria dos eletrodos de coleta e descarga. Além disso, os parâmetros de projeto desse equipamento, como número de eletrodos e espaçamento entre eles, influenciam diretamente nos resultados. As condições operacionais utilizadas também modificam a coleta de partículas, com destaque para a concentração inicial de partículas, a velocidade de escoamento do ar e a voltagem aplicada ao sistema.

A influência da eficiência de coleta de partículas com o tipo de precipitador eletrostático utilizado não possui um comportamento específico, pois as diferentes classificações desse equipamento, descritas anteriormente, modificam de forma expressiva os fenômenos que ocorrem nesse processo. Portanto, a análise do comportamento do precipitador eletrostático nesse estudo será restrita ao precipitador eletrostático do tipo placa-fio de simples estágio.

Com relação aos parâmetros de projeto, destacam-se o número de placas coletoras, o espaçamento entre elas, o número dos eletrodos de descarga, o diâmetro dos eletrodos e o

espaçamento entre eles. Alguns trabalhos avaliaram a influência desses parâmetros e foi constatado o aumento da eficiência de coleta de partículas com o aumento do número de eletrodos de descarga, e com a redução do diâmetro e do espaçamento entre os fios (NING *et al.*, 2016b; ZIEDAN *et al.*, 2010; KASDI, 2016a). Entretanto, alguns trabalhos observaram que ao reduzir o espaçamento entre os fios ocorreu a redução da eficiência de coleta de partículas como consequência do efeito de blindagem (EL DEIN; USAMA, 2014; ZIEDAN *et al.*, 2010; KASDI, 2016a). Quando dois ou mais eletrodos de descarga estão muito próximos entre si, ocorre o fenômeno da blindagem elétrica, que é a redução do campo elétrico na vizinhança dos eletrodos de descarga e, conseqüentemente, da corrente elétrica emitida por esses eletrodos (WHITE, 1940).

Com relação às condições operacionais, o aumento da voltagem aplicada ao sistema resulta em maiores correntes elétricas, como constatado por Kherbouche *et al.* (2016), Nouri *et al.* (2016) e Kim *et al.* (2017). Dessa forma, em geral o aumento da voltagem resulta em uma maior eficiência de coleta de partículas. Por outro lado, o aumento da velocidade do ar reduz a eficiência de coleta de partículas devido ao menor tempo de residência das partículas, ou seja, o tempo necessário para uma partícula percorrer o duto do precipitador eletrostático. O tempo de residência é calculado pela razão entre o volume interno do equipamento e a vazão volumétrica utilizada (DE OLIVEIRA e GUERRA, 2019; ZHUANG *et al.*, 2000).

A eficiência de coleta de partículas experimental em um precipitador eletrostático pode ser calculada através da relação entre as concentrações de partículas na entrada e na saída do equipamento, como apresentado na Equação 1.

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

Onde,

$\eta$ : eficiência do precipitador (%);

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

$C_f$ : concentração de partículas na saída ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

O avanço da utilização do precipitador eletrostático resultou no estudo matemático dos fenômenos ocorridos nesse equipamento. Assim, em 1922 foi publicado o primeiro modelo

matemático envolvendo a precipitação eletrostática de partículas. O modelo ficou conhecido como Deutsch-Anderson e passou a ser utilizado nos cálculos de projeto de precipitadores eletrostáticos e na validação de resultados experimentais. Segundo Parker (1997) e Świerczok e Jeřdrusik, (2018), a eficiência de remoção nesse modelo é calculada pela Equação 2.

$$\eta_D(d_p) = 1 - e^{-w(d_p) \times \frac{l}{s \times u}} = 1 - e^{-w(d_p) \times \frac{A}{Q}} \quad (2)$$

Onde,

$\eta_D(d_p)$ : eficiência de coleta do modelo de Deutsch;

$w(d_p)$ : velocidade de migração das partículas (m/s);

$d_p$ : diâmetro da partícula (m);

$l$ : comprimento do eletrodo de coleta (m);

$s$ : distância entre os eletrodos de coleta e descarga (m);

$u$ : velocidade do gás (m/s);

$A$ : área de dois eletrodos de coleta adjacentes,  $A = 2 \times h \times l$  (m<sup>2</sup>);

$Q$ : taxa de fluxo volumétrico do gás,  $Q = 2 \times h \times s \times u$  (m<sup>3</sup>/s);

$h$ : altura dos eletrodos de coleta (m).

A velocidade de migração das partículas é calculada pela Equação 3 (RIEHLE, 1997a).

$$w(d_p) = \frac{Q_p^\infty(x) \times Cu(x) \times |E|}{3 \times \pi \times \mu \times d_p} \quad (3)$$

Onde,

$Q_p^\infty$ : carga de saturação (As);

$\mu$ : viscosidade do gás (kg/ms);

$Cu$ : coeficiente de Cunningham;

$|E|$ : módulo do campo elétrico aplicado (V/m).

Nos cálculos envolvendo o valor do campo elétrico é necessário assumir esse como pseudo-homogêneo ( $E_{ps}$ ), mesmo que o campo elétrico no interior do precipitador eletrostático não seja homogêneo. Isso acontece devido à dificuldade de determinar o valor exato do campo elétrico. O valor é obtido através da Equação 4, que relaciona a voltagem aplicada ( $V$ ) e distância entre os eletrodos de coleta e descarga ( $s$ ) (FALAGUASTA *et al.*, 2008; RIEHLE, 1997a).

$$E_{ps} = \frac{V}{s} \quad (4)$$

Um parâmetro que deve ser considerado nos cálculos é a influência do caminho livre médio, que pode ser definido como a distância percorrida por uma molécula entre duas colisões sucessivas (PALANDI *et al.*, 2010). Caso a partícula atinja a região na qual o fluido deixa de ser contínuo, ou seja, o tamanho das partículas é muito próximo ao caminho livre médio das partículas (como é o caso das nanopartículas), é necessário que seja aplicada uma correção utilizando o fator de Cunningham, determinado pela Equação 5 (PARKER, 1997a).

$$Cu(x) = 1 + K_n \times (1,246 + 0,42 \times e^{\left(\frac{-0,87}{K_n}\right)}) \quad (5)$$

Sendo  $K_n$  o número de Knudsen, o qual é a razão entre o caminho médio livre das moléculas de gás ( $\lambda$ ), ou seja, a distância percorrida por uma partícula entre duas colisões sucessivas, e o raio da partícula.

O caminho livre médio é calculado pela Equação 6 (PARKER, 1997a), onde  $p$  é a pressão e  $T$  a temperatura do gás. Nas condições normais de temperatura ( $T_0$ ) e pressão ( $p_0$ ), 1 atm e 25°C, o caminho livre médio é de aproximadamente 65 nm.

$$\lambda(p, T) = \frac{\lambda(p_0, T_0)}{\delta} \quad (6)$$

Onde  $\delta$  é a densidade relativa do gás, calculada através da lei dos gases ideais (Equação 7), que relaciona a densidade do gás nos estados 1 e 2 e é função da temperatura e da pressão. Em geral, o estado 1 está sob as condições normais de temperatura e pressão.

$$\delta = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_2}{p_1} \times \frac{T_1}{T_2} \quad (7)$$

O termo  $Q_p^\infty$  da Equação 3 é a carga adquirida pela partícula, em Coulomb. A carga de saturação da partícula é descrita pela Equação 8 (RIEHLE, 1997b).

$$Q_p^\infty(x) = \pi \times \varepsilon_0 \times d_p^2 \times |E_{ps}| \times \left[ \left( \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right) \times \frac{2}{(1 + K_n)} + (1 + K_n)^2 \right] \quad (8)$$

Onde,

$\varepsilon_0$ : permissividade elétrica no vácuo ( $8,86 \times 10^{-12}$  A s/ V m);

$\varepsilon_r$ : permissividade relativa do material que constitui a partícula;

$d_p$ : diâmetro da partícula (m).

As partículas de aerossol podem sofrer desvios quando submetidas às forças eletrostáticas, pois possuem uma elevada mobilidade elétrica ( $Z$ ) (MICHAELIDES; CROWE; SCHWARZKOPF, 2016). Esse parâmetro é definido como a velocidade das partículas sob um campo elétrico unitário e seu valor é determinado pela Equação 9.

$$Z = \frac{Q_p(x) \times Cu(x)}{3\pi\mu d_p} \quad (9)$$

É possível estimar o tempo requerido ( $t_{n\%}$ ) para o carregamento de uma partícula atingir um valor  $n$  (entre 0 e 1) da carga de saturação ( $Q_p^\infty$ ). Para tanto, foi utilizada a Equação 10 (PARKER, 1997a), onde  $I$  é a corrente elétrica obtida experimentalmente ( $\mu\text{A}$ ).

$$\frac{Q_p}{Q_p^\infty} = \frac{t_{n\%}}{t_{n\%} + (4\varepsilon_0 \cdot E_{ps} \cdot A / I)} = n \quad (10)$$

A partir das equações utilizadas para o cálculo do modelo de Deutsch, pode ser observado que esse modelo possui diversas simplificações, como vazão mássica uniforme, difusividade turbulenta infinitamente elevada e migração uniforme das partículas (LARSEN; SØRENSEN, 1984). Pela sua simplicidade e por apresentar uma predição satisfatória para determinadas condições experimentais, esse modelo ainda é utilizado em trabalhos que objetivam um ajuste mais generalizado para os dados experimentais.

### 3.6 Estado da Arte

Na literatura podem ser encontrados trabalhos que utilizam métodos experimentais ou numéricos para a avaliação do precipitador eletrostático. Alguns desses trabalhos, e suas contribuições, são descritos a seguir.

### 3.6.1 Estudos Experimentais

Crespo *et al.* (2016) realizaram um estudo amplo da influência geométrica em um precipitador eletrostático tubo-fio, para partículas micrométricas, com diâmetro interno de 15 cm e comprimento de 1,7 m. Nesse estudo foram especificadas as potências de 6 kW e 7,5 kW, a voltagem e a corrente foram ajustadas de forma a manter a potência constante. Foi analisada a relação corrente-tensão para os diâmetros de fio entre 0,5 e 1,5 mm e foi concluído que com o aumento do diâmetro ocorreu a redução da corrente obtida em cada voltagem aplicada. Em seguida, foi avaliada a influência do comprimento do fio entre 0,4 e 1,7 m, com o diâmetro do fio de 1,1 mm. Nas curvas corrente-tensão, a corrente aumentou com a voltagem aplicada e com o comprimento do fio. Também foram realizados testes de eficiência, que comprovaram o aumento da eficiência com o comprimento do fio, devido à menor voltagem de início, e os maiores comprimentos apresentaram menor variação de eficiência.

Jianan *et al.* (2018) avaliaram o desempenho de um sistema formado por um precipitador eletrostático do tipo placa-fio acoplado à um filtro de manga. O precipitador eletrostático era composto por quatro placas coletoras de aço inoxidável, com 20 cm de comprimento e 40 cm de altura, espaçadas entre si em 20 cm. Foram utilizados dois eletrodos de descarga no formato de hastes com serras, cada eletrodos possuía 8 serras, com 3 cm de comprimento, espaçadas entre si em 10 cm. As partículas foram analisadas por um sistema óptico contendo um sistema de velocimetria por imagem de partículas (PIV). O diâmetro mediano das partículas utilizadas foi de 4,31  $\mu\text{m}$ . Os resultados indicaram que, com o aumento da voltagem, a carga acumulada pelas partículas aumenta, levando ao aumento da repulsão estática entre as partículas e da velocidade de movimento dessas. O grau de desorganização da trajetória das partículas foi agravado com o aumento da voltagem utilizada, formando os denominados vórtices, indicando que as partículas desviaram completamente da sua trajetória original. O aumento da desorganização das partículas está relacionado ao aumento da velocidade das partículas. A eficiência de remoção de partículas foi superior a 98% e aumentou com o aumento da voltagem. Além disso, a carga acumulada pelas partículas foi maior para as partículas de maiores diâmetros e aumentou com a voltagem aplicada, entretanto, esse aumento com a voltagem foi pouco significativo para as partículas com diâmetros inferiores a 1  $\mu\text{m}$ .

Islamov (2018) avaliou a influência da velocidade do gás na eficiência de coleta de partículas e na reentrada das partículas em um precipitador eletrostático de duplo estágio. Foram utilizados 9 eletrodos de descarga de 0,01 cm de diâmetro e 10 placas coletoras de alumínio

com 3,8 cm de comprimento e 0,525 cm de altura. As partículas analisadas possuíam diâmetro entre 0,3 e 12,8  $\mu\text{m}$ . Os resultados apresentaram a redução da eficiência de coleta de partículas com o aumento da velocidade, para as partículas de maiores diâmetros esse comportamento está associado à reentrada das partículas. As partículas que reentram no escoamento de ar podem estar descarregadas, pois entraram em contato com as placas coletoras, de modo que a maior parte dessas partículas não é coletada novamente. Em processos contínuos a reentrada das partículas pode ocorrer simultaneamente com a deposição das partículas. As partículas depositadas podem acumular na superfície, formando partículas maiores, que provavelmente irão aumentar a reentrada de partículas de maiores diâmetros no escoamento. Desse modo, podem ser obtidos alguns pontos de eficiências negativas nos resultados experimentais pelo aumento do número de partículas maiores e redução das partículas menores.

De Oliveira e Guerra (2018) avaliaram um precipitador eletrostático placa-fio de simples estágio com placas coletoras de cobre com 30 cm de comprimento e 10 cm de altura, espaçadas em 4 cm, com 8 fios cilíndricos de aço inoxidável, com diâmetro de 0,03 cm e espaçados em 4 cm. Inicialmente, o estudo consistiu na determinação do efeito da concentração de partículas e do tempo de residência na coleta de nanopartículas (11,2 - 224,7 nm). Os experimentos foram conduzidos de modo a manter as razões entre as concentrações iniciais de solução e as velocidades de escoamento do ar constantes. Assim, foram utilizadas as concentrações de solução de KCl entre 0,2 e 6 g/L e as velocidades do ar entre 3,3 e 9,9 cm/s, com o campo elétrico de 4 kV/cm (com descarga corona negativa). Os resultados apresentaram um comportamento não esperado, o aumento da corrente elétrica obtida com o aumento da velocidade. Esses resultados indicam que para as velocidades utilizadas o tempo de residência das partículas foi suficiente para realizar as etapas de carregamento elétrico e coleta das mesmas e provavelmente foi criado um vento iônico no interior do equipamento. Além disso, o aumento da concentração de partículas também aumentou a corrente elétrica gerada, indicando que para as concentrações utilizadas não ocorreu o fenômeno da supressão da corrente elétrica, responsável por reduzir a corrente elétrica para maiores concentrações de partículas. Com relação à eficiência de coleta de partículas, foram obtidas menores eficiências com o aumento da velocidade do ar, o que pode estar associado à redução da probabilidade de colisão entre as partículas e os íons e ao menor tempo de residência das partículas. Por outro lado, o aumento da concentração de partículas aumentou a eficiência de coleta obtida, o que pode estar associado ao aumento da probabilidade de colisão entre elas. Além disso, o aumento da razão entre a

concentração inicial de solução e a velocidade do ar não só aumentou a concentração de partículas, como também gerou partículas de maiores diâmetros.

Em trabalho posterior, De Oliveira e Guerra (2019) utilizaram o mesmo precipitador eletrostático para avaliar o efeito de uma maior faixa de baixas velocidades do ar na eficiência de coleta de nanopartículas (11,2 - 224,7 nm). Os experimentos foram conduzidos com as velocidades variando entre 1,7 e 19,9 cm/s, as concentrações iniciais de solução de KCl variando entre 0,5 e 6,0 g/L, para os campos elétricos de 3,95, 4,00 e 4,10 kV/cm. As eficiências de coleta foram maiores para os maiores campos elétricos, devido ao aumento da corrente elétrica gerada no interior do precipitador, responsável pela ionização das partículas. Entretanto, esse aumento foi mais significativo com o aumento do campo elétrico de 4,00 para 4,10 kV/cm, associado ao maior aumento da velocidade de migração das partículas. O aumento da velocidade de escoamento do ar utilizada reduziu a eficiência de coleta de partículas para as maiores velocidades, especialmente para 14,8 e 19,9 cm/s, associado diretamente com a redução do tempo de residência das partículas no precipitador eletrostático. Nesse trabalho, foi determinada uma velocidade de operação ótima de 6,6 cm/s, para as condições experimentais utilizadas.

Li *et al.* (2019a) utilizaram um precipitador eletrostático de duplo estágio 33,5 cm de largura e 24,7 cm de altura, com eletrodos de descarga espaçados em 5 cm. As partículas utilizadas possuíam diâmetro entre 0,2 e 2,2  $\mu\text{m}$ . As eficiências de coleta obtidas experimentalmente foram comparadas às previsões do modelo de Deutsch e foi concluído que esse modelo subestimou os resultados. Essa diferença foi mais significativa para os menores diâmetros de partículas. Além disso, ocorreu o aumento da eficiência de coleta de partículas com o aumento da voltagem aplicada. Sob as mesmas condições operacionais, as eficiências de coleta foram maiores para partículas maiores, pois possuem uma maior área superficial e uma maior taxa de colisão com os íons, que realizam o carregamento das partículas. Com relação aos eletrodos de coleta, foram avaliadas placas coletoras com o comprimento entre 20 e 32 cm, e foi observado que os maiores comprimentos forneceram as maiores eficiência de coleta de partículas, pois aumentaram o tempo de residência das partículas. Entretanto, as eficiências obtidas com as placas de 28 e 32 cm apresentaram uma diferença pouco significativa, e o mesmo comportamento foi observado para a voltagem. A velocidade do ar foi analisada entre 8 e 24 cm/s e ocorreu a redução da eficiência de coleta de partículas com o aumento da velocidade, principalmente para as partículas com diâmetro de 0,31  $\mu\text{m}$ . As velocidades mais baixas

contribuem para a eficiência de coleta de partículas pois reduzem o efeito do arrasto e aumentam o tempo de residência das partículas.

Wen e Su (2020) avaliaram as características elétricas de um precipitador eletrostático do tipo placa - fio de duplo estágio, utilizando a corona de polaridade positiva. Os eletrodos de coleta desse equipamento eram de alumínio e possuíam 8 cm de comprimento, espaçados em 2 cm. Os eletrodos de descarga eram de aço, com o diâmetro variando entre 0,04 e 0,1 cm, o espaçamento entre os fios variando entre 0,1 e 0,2 cm e o número de fios entre 7 e 14. As correntes elétricas obtidas aumentaram com a redução do espaçamento entre os fios porque nessas configurações foram utilizados mais fios de descarga. Além disso, foi observado que os fios de menores diâmetros possuem mais estabilidade e maiores voltagem de ruptura. Por conta disso, ocorreu o aumento da eficiência de coleta de partículas (0,03 – 0,3  $\mu\text{m}$ ) com a redução do diâmetro dos eletrodos de descarga, pois, o campo elétrico ao redor dos fios mais finos é mais forte, criando uma maior zona de ionização. A eficiência de coleta de partículas apresenta uma relação não-linear e inversamente proporcional com o diâmetro do eletrodo de descarga, indicando a existência de um ponto ótimo. Do mesmo modo que ocorreu com a corrente elétrica, os experimentos realizados com um menor espaçamento entre os fios resultaram em uma maior eficiência de coleta, por estar relacionado ao maior número de fios. Esse estudo também avaliou a degradação dos eletrodos de descarga após os tempos de operação de 24, 48 e 72 horas. As correntes elétricas obtidas decresceram com o tempo de operação, devido à oxidação dos fios, e causaram a supressão do campo elétrico. Como consequência, quando o precipitador opera durante um longo tempo, é difícil determinar qual diâmetro de fio é mais eficiente, pois os padrões e as intensidades dos campos elétricos se alteram com a degradação dos fios.

Tian *et al.* (2023) estudaram um precipitador eletrostático de duplo estágio, com um pré-carregador de blindagem contendo 2 câmaras de carregamento. Esse pré-carregador consiste em uma região de geração de íons e uma de coleta de partículas, separadas por uma placa metálica perfurada que atua como um eletrodo de blindagem. Foram utilizados fios de 0,16 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento. As partículas de fumaça foram avaliadas em uma faixa de diâmetro de 0,04 e 10  $\mu\text{m}$ , com as voltagens entre 0 e 6 kV. A eficiência de coleta desse equipamento foi muito influenciada pela corrente de carregamento e pela distância entre as placas. A eficiência global de coleta foi de 98,6% e 75,5% para a velocidade do escoamento do gás de 0,4 m/s e 1,2 m/s, respectivamente. A concentração de ozônio foi de cerca de 0,2 ppm para uma operação contínua de 24 horas, o que é um valor baixo em comparação com demais

configurações e esse tipo de pré-carregador pode indicar uma alternativa para se alcançar emissões de ozônio mais baixas.

### 3.6.2 Estudos Numéricos

Kasdi (2016b) realizou um estudo experimental e matemático do comportamento da densidade de corrente e das características de corrente-tensão de um precipitador eletrostático do tipo placa-fio. O número de fios no interior do precipitador foi variado entre 1 e 5, com o espaçamento entre os fios entre 40 e 80 mm e o diâmetro do fio de descarga de 0,4 e 0,8 mm. O espaçamento entre as placas coletoras (77 cm de comprimento e 50 cm de largura) foi mantido constante em 100 mm. Além disso, em cada caso foi analisado o efeito da voltagem aplicada. Com relação ao número de fios, novamente foi comprovado que o aumento do número de fios promove uma maior corrente corona. O mesmo comportamento foi obtido com o aumento do espaçamento entre os fios, pois, o aumento da distância entre eles reduz a interação das linhas de campo elétrico, principalmente nos fios centrais. Analisando o efeito do diâmetro do eletrodo de descarga foi observado que a voltagem de início da corona diminui com o aumento do diâmetro do fio. Consequentemente, para uma mesma voltagem, a corrente é mais intensa para o fio de menor diâmetro. As densidades de corrente e carga espacial apresentaram um comportamento ondulatório, com os maiores valores próximos aos fios de descarga e os menores valores na região entre os fios. Para a análise numérica foi utilizado um modelo computacional 2-D no software Comsol Multiphysics, para solucionar o sistema de equações com as condições de contorno apropriadas, foram utilizadas as equações diferenciais parciais para a distribuição do potencial elétrico e o modo de Convecção e Difusão para o transporte de carga. Os dados obtidos pelo software Comsol foram muito próximos aos experimentais, comprovando a precisão dos resultados.

Zheng *et al.* (2018c) utilizaram um modelo 2-D para um precipitador eletrostático placa-fio com placas coletoras com 36 cm de comprimento, espaçadas em 12 cm, com eletrodos de descarga de 0,2 cm, espaçados em 9 cm. Foi utilizado o modelo RNG k- para o escoamento turbulento no estado estacionário. O escoamento das partículas no domínio computacional foi rastreado utilizando a abordagem Lagrangeana até as partículas serem coletadas ou escaparem. Os carregamentos das partículas foram solucionados pelo modelo de Lawless, que combina os carregamentos pelos mecanismos de campo e de difusão. As partículas inseridas na simulação continham um diâmetro de 0,14  $\mu\text{m}$ . Os resultados da simulação mostraram que os maiores valores de campo elétrico ocorrem próximo aos eletrodos de descarga e decrescem rapidamente

para longe dos fios. A densidade de carga iônica apresentou o mesmo perfil do campo elétrico, porém, o máximo valor obtido na região do fio central foi inferior ao obtido para os demais fios. Isso ocorreu pois o fio central sofreu influência dos fios de ambas as extremidades. Além disso, com a redução do diâmetro das partículas foram atingidos menores valores de campo elétrico e de densidade de carga iônica. Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento do número de partículas para uma mesma concentração mássica, utilizando partículas de menores diâmetros. Dessa forma, a maior parte dos íons foi capturada pelas partículas, pelo aumento da probabilidade de colisão entre os íons e as partículas, o que aumentou a densidade de carga espacial. Assim, foi formado um campo elétrico reverso, resultando em um efeito de supressão, que enfraqueceu o campo elétrico ao redor do fio, afetando a coleta de partículas.

Park *et al.* (2018) realizaram a modelagem do carregamento e da coleta de partículas em um precipitador eletrostático de simples estágio. Para o escoamento de gás foi utilizado o modelo turbulento k- no FLUENT 14. A trajetória das partículas foi calculada utilizando o modelo de fase discreta. O precipitador eletrostático simulado possuía 182,88 cm de comprimento, com 8 eletrodos de descarga, espaçados entre si em 45,72 cm. Além disso, foram utilizadas 2 placas coletoras, com 11,43 cm de comprimento e espaçadas entre si em 22,86 cm. O diâmetro dos fios era de 0,318 cm. O domínio computacional possuía 37392 células com formato quadrático e a malha ao redor dos fios foi refinada para 25  $\mu\text{m}$ . Para o cálculo da eficiência de coleta de partículas foram inseridas 2000 partículas. Para todas as voltagens utilizadas, ocorreu o decréscimo exponencial da eficiência de coleta com o aumento da velocidade, que pode ser justificado pela expressão do modelo de Deutsch. O aumento da velocidade reduz o tempo de residência e o número de cargas das partículas. Conseqüentemente, ocorre a redução da mobilidade elétrica, da velocidade de migração e da eficiência de coleta. Além disso, a eficiência de coleta analisada na faixa de diâmetro entre 0,1 e 10  $\mu\text{m}$  foi mínima entre 0,2 e 0,3  $\mu\text{m}$  e aumentou para diâmetros superiores a 0,5  $\mu\text{m}$ , para todas as voltagens aplicadas. Além disso, a eficiência de coleta aumentou linearmente com a mobilidade elétrica, mantendo a voltagem constante, e a taxa de aumento da eficiência cresceu com o aumento da voltagem.

Gao *et al.* (2020) realizaram um estudo computacional da migração das partículas em um precipitador eletrostático. Para o escoamento do gás foi utilizado o modelo de Reynolds turbulento com médias de tempo (RANS). As partículas foram rastreadas pelo modelo da fase discreta com abordagem Lagrangeana. O precipitador eletrostático simulado possuía 96 cm de comprimento e 40 cm de largura, contendo 2 placas coletoras e 4 eletrodos de descarga,

espaçados entre si em 24 cm. Os resultados numéricos foram comparados entre eletrodos com quatro geometrias diferentes e dois tipos de placas (placa plana e placa de forma complexa, denominada BE). Foi observado que a densidade de corrente aumentou com o aumento da voltagem aplicada e apresentou valores muito semelhantes para ambas as geometrias das placas coletoras. O formato do eletrodo de descarga influenciou no campo elétrico, o menor valor foi obtido para o fio quadrado e o maior para o fio agulha, por apresentar emissores na direção do escoamento. O potencial elétrico ao redor dos fios apresentou uma forma elíptica, com o maior potencial próximo aos fios, que decresceu subitamente em direção às placas coletoras. No caso do campo elétrico, os maiores valores foram obtidos próximo aos eletrodos de descarga, mas decresceram gradualmente em direção às placas coletoras, de modo que os menores valores não ocorrem nas placas coletoras, mas sim nas regiões entre os eletrodos de descarga. Com relação à velocidade de migração, foi observado que as partículas foram aceleradas ao se aproximarem dos eletrodos de descarga e desaceleradas na região entre eles. A eficiência de coleta de partículas apresentou o mesmo comportamento para todas as geometrias dos eletrodos avaliadas na faixa de diâmetro entre 0,01 e 10  $\mu\text{m}$ . O aumento da velocidade de escoamento reduziu o tempo de residência das partículas e a eficiência de coleta, mas apresentou pouco efeito na velocidade de migração das partículas, principalmente para as partículas maiores que 1  $\mu\text{m}$ , pois possuem uma boa capacidade de carga. Foram analisadas diferentes combinações entre os eletrodos de coleta e descarga e foi concluído que ocorreu uma influência significativa na eficiência de coleta de partículas, atingindo cerca de 15% a mais de eficiência para determinadas configurações.

Wang (2020) realizou um estudo numérico dos efeitos dos eletrodos de descarga nas características do precipitador eletrostático. Para isso, foi assumido o escoamento de ar turbulento no estado estacionário. O modelo turbulento k- foi implementado no software Fluent. Os efeitos do escoamento de ar na densidade de corrente foram desconsiderados, pois a velocidade dos íons era muito maior que a velocidade do ar. Para o carregamento das partículas, foram considerados os mecanismos de campo e de difusão, e foi utilizado o modelo de Lawless, que combina ambos os mecanismos. O movimento das partículas foi simulado com o modelo de fase discreta, baseado no método Lagrangiano. Para simular o efeito turbulento nas partículas, foi utilizado o modelo de rastreamento estocástico (modelo de trajetória aleatória). Esse modelo inclui os efeitos das flutuações da velocidade turbulenta na trajetória das partículas. O modelo do precipitador eletrostático utilizado consiste em duas placas coletoras, com 75 cm de comprimento, espaçadas em 15 cm, e um conjunto de eletrodos de descarga, com

0,15 cm de diâmetro. Foram avaliadas seis distribuições diferentes dos eletrodos de descarga, de modo que a razão entre o espaçamento entre os fios e entre os fios e as placas fosse variada entre 1 e 6. As partículas possuíam um diâmetro uniforme variando entre 0,1 e 10  $\mu\text{m}$  e o campo elétrico foi assumido constante após o início da corrente corona. Para obter melhores resultados, a malha ao redor dos eletrodos de descarga foi refinada. Os resultados indicam que o potencial elétrico foi maior ao redor dos fios e decresceu para zero nas placas coletoras. À medida que o espaçamento entre os fios diminuiu, as interações da descarga corona tornaram-se significativas e foi formada uma faixa de distribuição ao redor dos fios. A distribuição do campo elétrico apresentou um comportamento similar à distribuição do potencial elétrico, com os máximos valores próximos aos eletrodos de descarga, porém, na área das placas coletoras perpendicular aos fios, o campo elétrico aumentou gradualmente. Conforme o espaçamento entre os fios reduziu, formou-se uma zona de elevado campo elétrico próximo às placas coletoras, favorável para a coleta de partículas. A corrente elétrica total aumentou com a redução do espaçamento entre os fios. Com relação à densidade de carga, foi observado um comportamento oscilatório entre os fios e o rápido decréscimo na região externa dos fios das extremidades. A eficiência de remoção de partículas aumentou com o aumento do diâmetro de partículas de 0,1 para 10  $\mu\text{m}$ . Além disso, a eficiência obtida para as partículas de maiores diâmetros aumentou com a redução da razão entre os espaçamentos. Entretanto, para as partículas de menores diâmetros a eficiência aumentou com a redução da razão entre de 6 para 1,2, mas a redução de 1,2 para 1 reduziu a eficiência de coleta. Essa diferença está associada aos mecanismos de carregamento das partículas, pois nas menores partículas o mecanismo por difusão predomina, e depende da densidade de carga das partículas.

Ziedan *et al.* (2021) desenvolveram um estudo numérico no software MATLAB para determinação da carga espacial livre a partir de uma equação modificada de Deutsch, além de avaliar o efeito da velocidade dos gases. O espaçamento entre as placas e entre os fios foi mantido constante em 30 e 14,5 cm, respectivamente. Além disso, foram considerados os diâmetros dos eletrodos de descarga de 0,52, 1,87 e 3,95 mm, para 1, 3, 5 e 7 fios. A faixa de velocidades avaliada foi entre 0 e 9 m/s. Os resultados mostraram o aumento da corrente corona com o maior número de eletrodos de descarga devido ao efeito da blindagem nos principalmente nos fios que possuem dois adjacentes. A carga espacial livre foi diretamente influenciada pela velocidade, visto que seu valor cresceu à medida que a velocidade de escoamento aumentou. Esse comportamento está relacionado à redução da mobilidade iônica e o decréscimo da concentração de íons no interior do precipitador eletrostático.

Zhang *et al.* (2022b) realizaram uma investigação numérica em um precipitador eletrostático do tipo placa-fio para avaliar a influência do campo elétrico e do vento iônico na capacidade do equipamento de capturar partículas finas (MP<sub>2,5</sub>). Para isso, foi utilizado o software GAMBIT e as eficiências de coleta foram obtidas pelo FLUENT. Os resultados indicaram que tanto o vento iônico quanto o campo elétrico melhoraram a eficiência de coleta de partículas. Além disso, quanto menor o diâmetro da partícula, melhor o desempenho do precipitador eletrostático. O aumento da velocidade reduziu a eficiência de coleta de uma forma não-linear, mas aumentou a contribuição do vento iônico e da magnitude do campo elétrico. O precipitador eletrostático apresentou o melhor desempenho quando foram considerados esses fatores em conjunto, ao invés de separadamente.

A partir da análise da literatura foi possível observar que existem poucos trabalhos que avaliam a influência dos parâmetros de projeto de um precipitador eletrostático, como o diâmetro e o espaçamento entre os fios, e os fenômenos associados a esses parâmetros, na eficiência de coleta de nanopartículas. De maneira geral, foi observada a redução da eficiência de coleta para maiores velocidades do ar e o aumento com o aumento do campo elétrico aplicado. Além disso, o formato dos eletrodos de descarga apresentou influência nos resultados e o desempenho do precipitador eletrostático foi favorecido pelo maior número e comprimento dos fios e menor diâmetro.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho consiste em avaliar o efeito de modificações geométricas na eficiência de coleta de nanopartículas em um precipitador eletrostático do tipo placa-fio de simples estágio. Para melhor compreensão dos fenômenos envolvidos nesse processo, esse estudo avaliou as características elétricas do precipitador eletrostático a partir das curvas corrente-tensão e do tempo de carregamento das partículas.

## CAPÍTULO 4 – PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO DE SIMPLES ESTÁGIO

### 4.1 Introdução

O presente capítulo descreve os resultados dos experimentos realizados em um precipitador eletrostático de simples estágio em escala de bancada. O foco deste estudo foi determinar se a região em que os eletrodos de descarga são dispostos no interior do precipitador eletrostático tem influência na eficiência de coleta de partículas. Para isso, foram avaliadas as configurações em que os eletrodos se encontram nas regiões inicial, central e final do precipitador eletrostático. Visando uma melhor avaliação, foi determinado que o parâmetro utilizado seria o espaçamento de entrada, referente à distância entre o início da placa coletora e o primeiro eletrodo de descarga. Os experimentos foram realizados com 1 e 3 eletrodos de descarga, para avaliar o efeito dos eletrodos de descarga adjacentes nos resultados. Posteriormente, foi realizada a inclusão de uma tela coletora de cobre, perpendicular ao escoamento do aerossol, para a configuração de 1 eletrodo de descarga.

### 4.2 Metodologia

Os experimentos realizados nesse capítulo foram desenvolvidos no Laboratório de Controle Ambiental, localizado na Universidade Federal de São Carlos (Campus São Carlos), no Brasil.

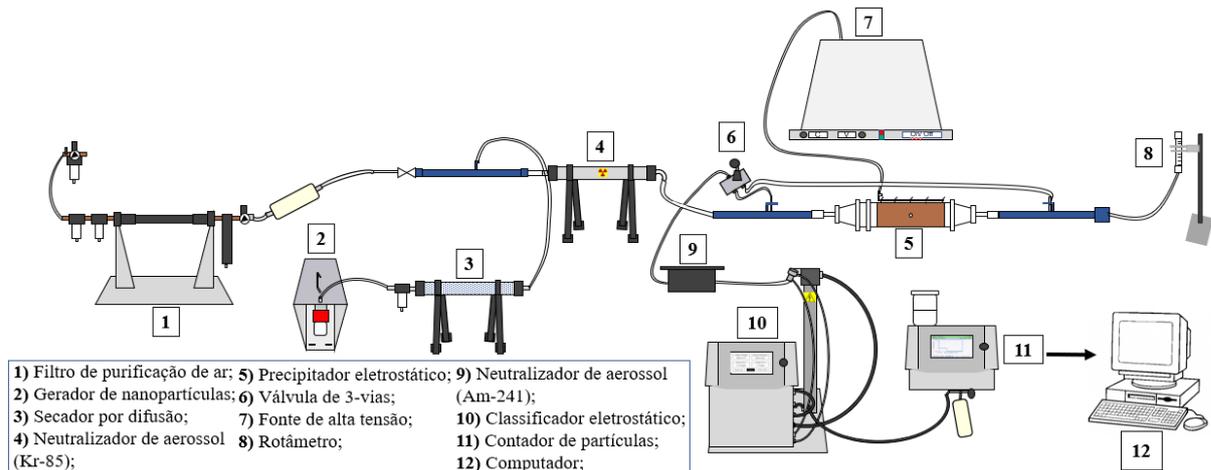
A metodologia apresenta primeiramente a descrição da unidade experimental, utilizada para todos os experimentos desse capítulo, seguida pela descrição do precipitador eletrostático e do procedimento experimental para as configurações estudadas nesse capítulo. Primeiramente foi avaliado o desempenho do precipitador eletrostático operando com 1 eletrodo de descarga, em seguida com 3 eletrodos de descarga e por fim com 1 eletrodo de descarga juntamente com uma tela coletora.

#### 4.2.1 Unidade Experimental

Os experimentos foram realizados em uma unidade experimental (Figura 12) formada por diversos equipamentos. O ar utilizado no sistema é fornecido por um compressor (modelo MSV 12/175, Schulz), que passa por um filtro de purificação (modelo 3074B, TSI) para remoção de impurezas. Em paralelo, um gerador de nanopartículas (modelo 3079, TSI) produz o aerossol a partir de uma solução de NaCl de concentração conhecida. Esse aerossol escoa através de um secador de difusão (modelo 3062, TSI), que retém o excesso de umidade utilizando sílica-gel.

Após essa etapa, o aerossol passa por um neutralizador de aerossol de Criptônio 85 (Kr-85) (modelo 3054, TSI), que neutraliza as possíveis cargas eletrostáticas presentes nas partículas, de forma a evitar sua deposição na superfície da tubulação e não afetar o processo de precipitação eletrostática.

**Figura 12 - Representação da unidade experimental.**



Fonte: Adaptado de Andrade (2020).

Após a neutralização das cargas, o aerossol se dispersa no interior do precipitador eletrostático, com o auxílio de um difusor presente na entrada desse equipamento, conectado à uma fonte de alta tensão (modelo SL30PN300, Spellman). A tensão fornecida cria um campo elétrico no interior do precipitador eletrostático e ocorre o fenômeno da ionização em cadeia das moléculas.

Para realizar a amostragem de partículas na entrada e na saída do precipitador eletrostático, utilizadas nos posteriores cálculos de eficiência, foram instaladas duas sondas na tubulação a montante e a jusante do equipamento. Ambas as sondas estão localizadas a 26 cm de distância, em relação à entrada e à saída, do precipitador eletrostático e possuem 2 mm de diâmetro interno e uma angulação de 90°. As sondas são fixadas no eixo central da tubulação (2,6 cm de diâmetro interno), paralelas à direção de escoamento do ar e conectadas à uma válvula de 3 vias por mangueiras rígidas de silicone de 0,4 cm de diâmetro interno. Essa válvula é utilizada para regular o ponto de amostragem das partículas. Além disso, um rotâmetro está instalado na tubulação de saída do precipitador eletrostático para controle da vazão do ar.

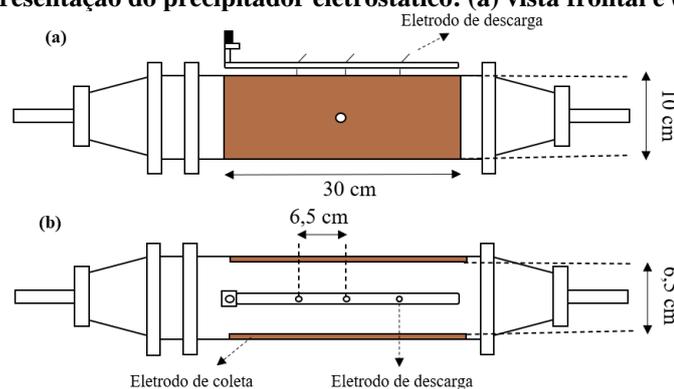
Após passar pela válvula de 3 vias, as partículas dispersas no ar passam por outro neutralizador de aerossol, de Amerício-241 (Am-241), para remover as cargas eletrostáticas adquiridas pelas partículas no interior do precipitador eletrostático e evitar a obtenção de

resultados imprecisos. Por fim, as partículas seguem para um sistema de análise de partículas por mobilidade elétrica (SMPS), composto por um classificador eletrostático (modelo 3080, TSI) e um contador de partículas (modelo 3776, TSI). Esse sistema é conectado a um computador que permite o controle das análises realizadas e a coleta dos dados obtidos. Informações mais detalhadas sobre os equipamentos utilizados na unidade experimental podem ser consultadas no Apêndice A.

#### 4.2.2 Precipitador Eletrostático e Procedimento Experimental

O precipitador eletrostático utilizado para a realização dos experimentos está representado na Figura 13. Como os experimentos foram conduzidos em escala de bancada, as dimensões do equipamento e as velocidades do ar precisaram ser ajustadas, não sendo possível reproduzir os valores mais recomendados para as aplicações industriais. Entretanto, a faixa de campo elétrico foi bem próxima da aplicada usualmente. Assim, foi utilizado um precipitador eletrostático do tipo placa-fio de simples estágio, com duas placas coletoras de cobre, espaçadas entre si em 6,5 cm. Cada placa possui 30 cm de comprimento e 10 cm de altura. Foram utilizados eletrodos de descarga de aço inoxidável com 0,4 mm de diâmetro, dispostos na região central entre as placas coletoras, também espaçados em 6,5 cm. Esse diâmetro de eletrodo foi escolhido com base em resultados prévios (ANDRADE, 2020), uma vez que o maior diâmetro do eletrodo sofreu uma maior influência da blindagem elétrica. Dessa forma, é possível observar de forma mais evidente um aumento progressivo na eficiência de coleta, o que permite uma melhor avaliação da influência dos parâmetros avaliados.

**Figura 13 - Representação do precipitador eletrostático: (a) vista frontal e (b) vista superior.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Diversas configurações geométricas foram avaliadas no presente trabalho, sendo a primeira etapa a avaliação do espaçamento de entrada no desempenho do precipitador eletrostático, ou seja, a distância entre o início da placa coletora até o primeiro eletrodo de descarga do precipitador eletrostático. Para a avaliação do espaçamento de entrada foram

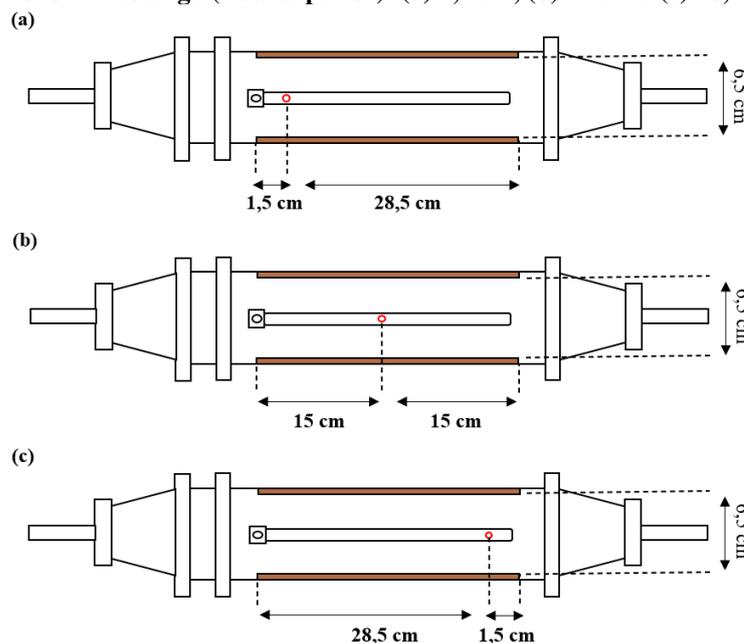
realizados testes com 1 eletrodo de descarga e com 3 eletrodos de descarga, a fim de verificar se esse parâmetro também teve uma influência nos resultados. Essas configurações foram escolhidas para investigar se a presença de diversos eletrodos e de possíveis efeitos de blindagem elétrica, como evidenciado por Kasdi (2016b) e Ziedan *et al.* (2010), influenciam o desempenho do precipitador eletrostático quando os eletrodos de descarga são distribuídos em diferentes regiões do equipamento.

Para cada configuração foram realizados ajustes na metodologia de acordo com as limitações do equipamento, visando atender aos resultados desejados. Dessa forma, a metodologia, e posteriormente os resultados, estão apresentados separadamente para cada uma das configurações.

#### 4.2.2.1 Eletrodos de Descarga: 1 Fio

Para essa configuração, foram escolhidos os espaçamentos de entrada de forma que o eletrodo de descarga estava localizado nas regiões inicial, central e final do duto do precipitador eletrostático. Logo, a partir das possibilidades disponíveis no equipamento, foram escolhidos os espaçamentos de 1,5, 15 e 28,5 cm. Os espaçamentos selecionados não incluem a distância entre a entrada do duto do precipitador e o início da placa coletora ou o final da placa coletora e a saída do duto do precipitador, ambas as distâncias são de 2 cm. A Figura 14 mostra uma representação da posição do eletrodo de descarga para os diferentes espaçamentos utilizados.

**Figura 14 - Representação dos espaçamentos de entrada avaliados no precipitador eletrostático com 1 eletrodo de descarga (vista superior): (a) 1,5 cm, (b) 15 cm e (c) 28,5 cm.**



Para cada espaçamento foram realizados experimentos com as velocidades do ar de 1, 2, 4 e 5 cm/s, selecionadas a partir de trabalhos realizados anteriormente nessa unidade experimental e das vazões volumétricas do rotâmetro utilizado. Com relação à faixa de campo elétrico aplicada, ocorreu uma variação de acordo com o espaçamento de entrada avaliado. Os experimentos de eficiência foram performados de forma que fosse possível visualizar o aumento da eficiência de partículas até atingir um elevado valor (próximo ou acima de 90%). Entretanto, a alteração na localização do eletrodo de descarga e, conseqüentemente, na distribuição do campo elétrico no interior do equipamento, fez com que essas elevadas eficiências fossem alcançadas com diferentes valores de campo elétrico.

Os espaçamentos de 1,5 e 28,5 cm apresentaram um comportamento mais semelhante, nesses casos foram avaliadas as características elétricas e as eficiências de coleta com os campos elétricos de 3,08, 3,14, 3,23, 3,29, 3,38, 3,45, 3,48, 3,54, 3,60, 3,69, 3,72, 3,78 e 3,85 kV/cm. Por outro lado, com o espaçamento de 1,5 cm, foram utilizados os campos elétricos de 3,08, 3,14, 3,23, 3,29, 3,38, 3,45 e 3,48 kV/cm. O valor máximo de campo elétrico aplicado para cada velocidade variou um pouco, a depender da necessidade. Os experimentos foram realizados para uma faixa de diâmetro de partículas entre 6,15 e 241,4 nm. Um resumo das condições operacionais utilizadas pode ser visualizado na Tabela 2.

**Tabela 2 - Condições operacionais utilizadas nos experimentos com 1 eletrodo de descarga.**

Espaçamento de Entrada (cm)	Velocidade (cm/s)	Campo Elétrico (kV/cm)
1,5	1	3,08 – 3,85
	2	
	4	
	5	
	5	
15,0	1	3,08 – 3,48
	2	
	4	
	5	
	5	
28,5	1	3,08 – 3,85
	2	
	4	
	5	
	5	

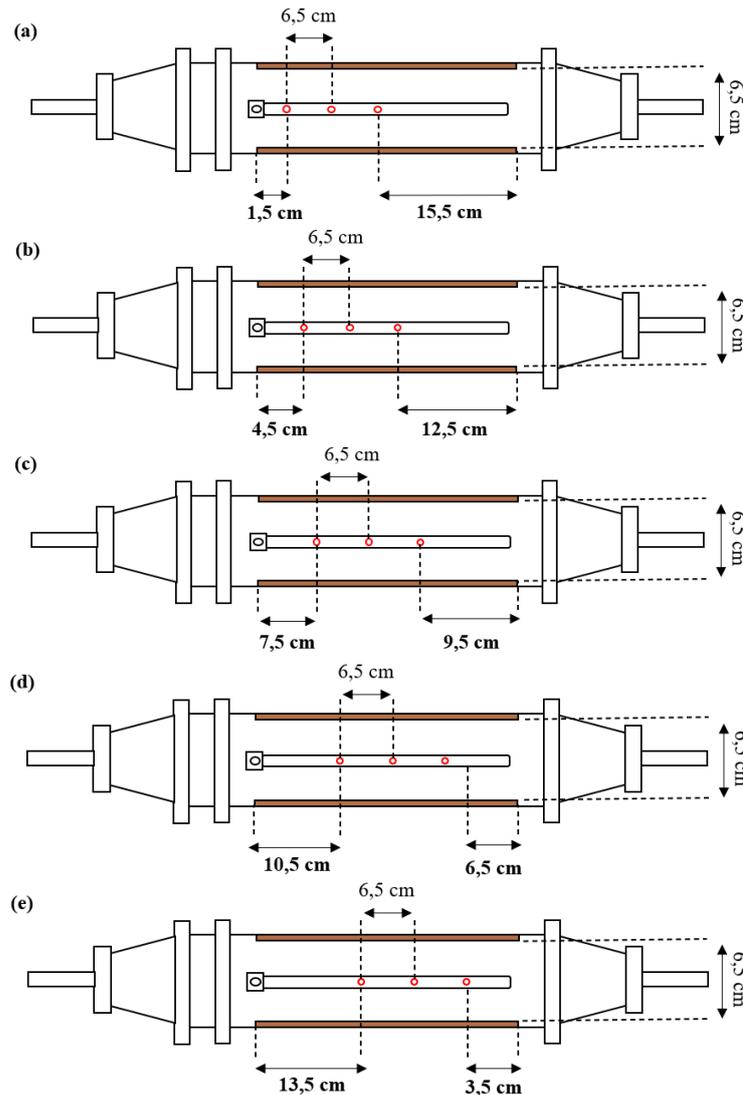
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

#### 4.2.2.2 Eletrodos de Descarga: 3 Fios

Para essa configuração, foram utilizados 3 eletrodos de descarga e foram selecionados os espaçamentos de entrada de 1,5, 4,5, 7,5, 10,5 e 13,5 cm. É importante ressaltar que o número de eletrodos de descarga e o espaçamento entre eles foi mantido constante, sendo utilizados 3 fios espaçados em 6,5 cm para todos os experimentos realizados. Os espaçamentos selecionados

não incluem a distância entre a entrada do duto do precipitador e o início da placa coletora ou o final da placa coletora e a saída do duto do precipitador, ambas as distâncias são de 2 cm. A Figura 15 exibe uma representação do precipitador eletrostático (vista superior), e especifica os espaçamentos avaliados e os demais espaçamentos no interior do equipamento.

**Figura 15 - Representação dos espaçamentos de entrada avaliados no precipitador eletrostático com 3 eletrodos de descarga (vista superior): (a) 1,5 cm, (b) 4,5 cm, (c) 7,5 cm, (d) 10,5 cm e (e) 12,5 cm.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Para cada configuração de espaçamento de entrada, foram realizadas as caracterizações elétricas e os experimentos de eficiência de coleta com as velocidades de 1, 2, 4 e 5 cm/s e, para cada velocidade, utilizados os campos elétricos de 3,08, 3,11, 3,14, 3,17, 3,23, 3,29, 3,35, 3,38 e 3,42 kV/cm. Os experimentos foram realizados para uma faixa de diâmetro de partículas entre 6,15 e 241,4 nm. As condições operacionais utilizadas estão resumidas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Condições operacionais utilizadas para a realização dos experimentos com 3 eletrodos de descarga.**

<b>Espaçamento de Entrada (cm)</b>	<b>Velocidade (cm/s)</b>	<b>Campo Elétrico (kV/cm)</b>
1,5, 4,5, 7,5, 10,5 e 13,5	1	3,08 – 3,42
	2	
	4	
	5	
	5	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

#### 4.2.2.3 Tela Coletora e 1 Eletrodo de Descarga

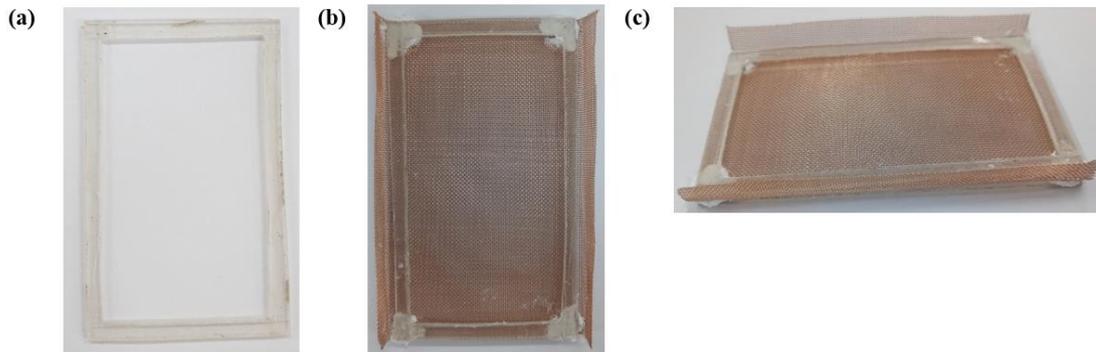
Após a análise do precipitador eletrostático com diferentes números de eletrodos de descarga, foi estudada a influência do eletrodo de descarga juntamente com uma nova configuração do eletrodo de coleta.

Essa nova configuração consiste na inclusão de uma tela coletora de cobre (TEGAPE), com diâmetro de fio de 0,23 mm e com 0,45 mm de abertura, no duto do precipitador eletrostático. O objetivo da inclusão dessa tela foi avaliar se a expansão da área coletora e a passagem do aerossol através de uma tela coletora alteram as características difusivas do escoamento e a eficiência de coleta de nanopartículas. Além disso, essa configuração foi pensada de forma a aumentar a área de coleta do equipamento próximo aos eletrodos de descarga.

Para a tela se manter fixa no interior do equipamento, foram utilizadas duas molduras de acrílico de 0,4 mm de espessura, que foram coladas com poliuretano nas superfícies anterior e superior da tela (Figura 16). A tela foi inserida perpendicularmente ao escoamento de aerossol no interior do equipamento, mantendo contato com ambas as placas coletoras do precipitador eletrostático para garantir que seria aterrada (Figura 17).

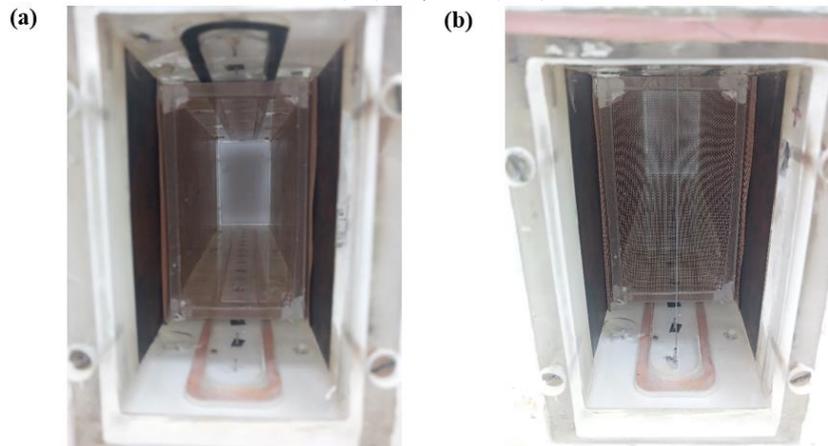
Escolheu-se trabalhar com apenas 1 eletrodo de descarga, para avaliar melhor a influência de cada parâmetro. A tela coletora foi inserida 3 cm após o eletrodo de descarga. Esse espaçamento entre a tela e o fio foi escolhido por ser equivalente ao espaçamento entre o fio e as placas coletoras. Além disso, o eletrodo de descarga e a tela coletora foram inseridos em diferentes posições ao longo do precipitador eletrostático de forma a avaliar a influência da localização desses componentes no desempenho do equipamento.

**Figura 16 – (a) Moldura de acrílico para a tela coletora, (b) moldura colada na tela coletora (vista frontal) e (c) vista lateral.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

**Figura 17 - Interior do precipitador eletrostático com: (a) tela e (b) 1 fio + tela, para a configuração de 1,5 cm (fio) e 4,5 cm (tela).**

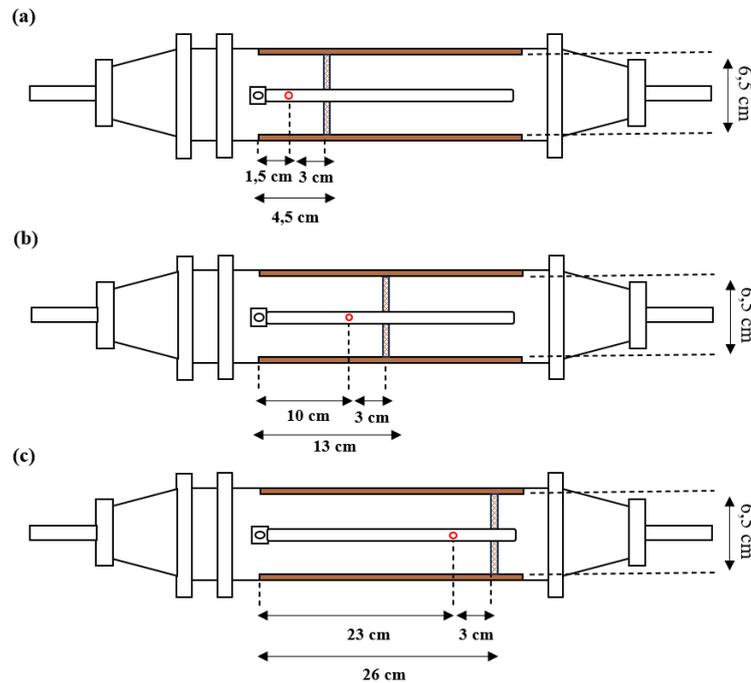


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os espaçamentos selecionados são referentes à distância até o início da placa coletora. Dessa forma, foram realizados experimentos com as seguintes configurações (Figura 18).

- O eletrodo de descarga a 1,5 cm do início da placa coletora e a tela coletora espaçada em 3 cm do eletrodo de descarga, ou seja, a 4,5 cm do início da placa coletora;
- O eletrodo de descarga a 10 cm do início da placa coletora e a tela coletora espaçada em 3 cm do eletrodo de descarga, ou seja, a 13 cm do início da placa coletora;
- O eletrodo de descarga a 23 cm do início da placa coletora e a tela coletora espaçada em 3 cm do eletrodo de descarga, ou seja, a 26 cm do início da placa coletora.

**Figura 18 - Representação dos espaçamentos de entrada avaliados no precipitador eletrostático com 1 eletrodo de descarga e com a tela coletora (vista superior): (a) 1,5 cm (fio) e 4,5 cm (tela), (b) 10 cm (fio) e 13 cm (tela) e (c) 23 cm (fio) e 26 cm (tela).**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Visando facilitar a discussão nesse capítulo, desse ponto do texto em diante, são utilizados os espaçamentos em relação ao eletrodo de descarga (1,5, 10 e 23 cm) para se referir aos experimentos realizados.

Para cada configuração do conjunto 1 fio + tela coletora, foram realizados experimentos com as velocidades de 1, 2, 4 e 5 cm/s. Por conta das alterações na distribuição do campo elétrico, para cada configuração, foi utilizada uma faixa de valores diferente: 3,08 – 3,69 kV/m, 2,62 – 3,38 kV/cm e 2,46 – 3,23 kV/cm, para os espaçamentos dos eletrodos de descarga de 1,5, 10 e 23 cm, respectivamente.

Para os experimentos com as maiores velocidades, 4 e 5 cm/s, foi necessário avaliar a eficiência de coleta com maiores campos elétricos, para que o precipitador eletrostático conseguisse apresentar um bom desempenho quando operado sob essas condições. Portanto, em alguns casos não foi necessário realizar experimentos com toda a faixa de campo elétrico selecionada, uma vez que foram alcançadas elevadas eficiências de coleta com menores valores do campo elétrico. A Tabela 4 resume os experimentos que foram realizados nessa etapa do estudo e que serão discutidos nesse capítulo.

**Tabela 4 - Experimentos realizados com a tela coletora.**

<b>Distância do Eletrodo de Descarga (cm)</b>	<b>Distância da Tela Coletora (cm)</b>	<b>Velocidade (cm/s)</b>	<b>Campo Elétrico (kV/cm)</b>
1,5	4,5	1	3,08 – 3,69
		2	
		4	
		5	
10,0	13,0	1	2,62 – 3,38
		2	
		4	
		5	
23,0	26,0	1	2,46 – 3,23
		2	
		4	
		5	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

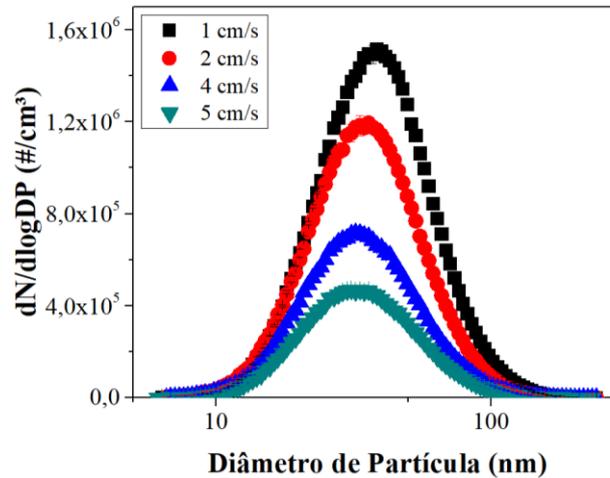
### **4.3 Resultados e Discussão**

As propriedades do aerossol de entrada dependem diretamente da velocidade do ar utilizada nos experimentos. Como as velocidades foram as mesmas para as 3 configurações utilizadas, os resultados expostos na subseção 4.3.1 representam todas as configurações. Entretanto, para as características elétricas e eficiências de coleta, os resultados estão apresentados separadamente. As subseções 4.3.2 e 4.3.3 descrevem os resultados das configurações com 1 e 3 eletrodos de descarga, respectivamente, sem tela coletora. Uma comparação dos resultados obtidos com essas duas configurações é feita na subseção 4.3.4. Por fim, a seção 4.3.5 apresenta os resultados da configuração com 1 eletrodo de descarga e tela coletora.

#### **4.3.1 Propriedades do Aerossol de Entrada**

A distribuição granulométrica de partículas na entrada do precipitador eletrostático está exibida na Figura 19. Com o aumento da velocidade do ar, ocorreu a redução do número de partículas no aerossol, visto que a vazão no gerador de nanopartículas foi mantida constante em 200 L/h. Desse modo, ao duplicar a velocidade do ar para 2 cm/s, o número máximo de partículas reduziu em cerca de  $0,4 \times 10^6$ . Para os demais casos, o número de partículas reduziu em até  $0,8 \times 10^6$  e  $1,2 \times 10^6$  para um aumento de 4 e 5 vezes em relação à velocidade inicial do ar, respectivamente.

**Figura 19 - Distribuição granulométrica do aerossol na entrada do precipitador eletrostático (base numérica).**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Para uma melhor compreensão dos dados expostos na Figura 19, a Tabela 5 exibe os valores de concentração do aerossol (a partir de uma solução inicial de NaCl de 0,1 g/L) e os tempos de residência para as velocidades do ar utilizadas. Como pode ser observado, as concentrações mássicas mantêm uma relação quase linear com a velocidade do ar, bem como ocorre com o tempo de residência. Ambos os parâmetros apresentam uma relação inversamente proporcional com a velocidade do ar.

**Tabela 5 - Concentração de entrada das partículas e tempo de residência para cada velocidade do ar.**

Velocidade do ar (cm/s)	Concentração do aerossol ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Tempo de residência (s)
1	$151,73 \pm 3,96$	29,18
2	$87,05 \pm 10,59$	14,72
4	$43,30 \pm 4,93$	7,36
5	$28,80 \pm 2,68$	5,88

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A velocidade do ar e a concentração inicial da solução de NaCl também influenciam o diâmetro das partículas nanométricas formadas. A Tabela 6 contém os dados de mediana e desvio padrão em bases mássica e numérica.

**Tabela 6 - Mediana e desvio padrão geométrico ( $\sigma$ ), para os diferentes espaçamentos de entrada e velocidades do ar, em bases mássica e numérica.**

Velocidade do ar (cm/s)	Mediana (nm)		$\sigma$ (nm)	
	Base mássica	Base numérica	Base mássica	Base numérica
1	$81,19 \pm 0,25$	$39,90 \pm 0,15$	$1,59 \pm 0,00$	$1,64 \pm 0,00$
2	$65,21 \pm 0,06$	$32,54 \pm 0,06$	$1,62 \pm 0,00$	$1,60 \pm 0,00$
4	$64,34 \pm 0,35$	$30,84 \pm 0,02$	$1,65 \pm 0,01$	$1,60 \pm 0,00$
5	$68,41 \pm 0,31$	$31,81 \pm 0,11$	$1,66 \pm 0,01$	$1,62 \pm 0,01$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

As medianas obtidas em base numérica não apresentaram uma grande variação com a velocidade do ar, apenas oscilações em uma mesma faixa de diâmetro, com valores de desvio muito pequenos. No caso das medianas em base mássica, os valores obtidos apresentaram uma maior variação com o aumento da velocidade, que pode estar relacionada com oscilações das condições operacionais e da concentração de partículas geradas.

Além disso, observa-se que apesar da maior parte das partículas apresentar diâmetro entre 30 e 39 nm em base numérica, a maior concentração mássica dessas ocorre em uma faixa entre 64 e 81 nm. Em ambos os casos, o desvio padrão geométrico apresentou valores entre 1,60 e 1,64 nm.

#### 4.3.2 Eletrodos de Descarga: 1 Fio

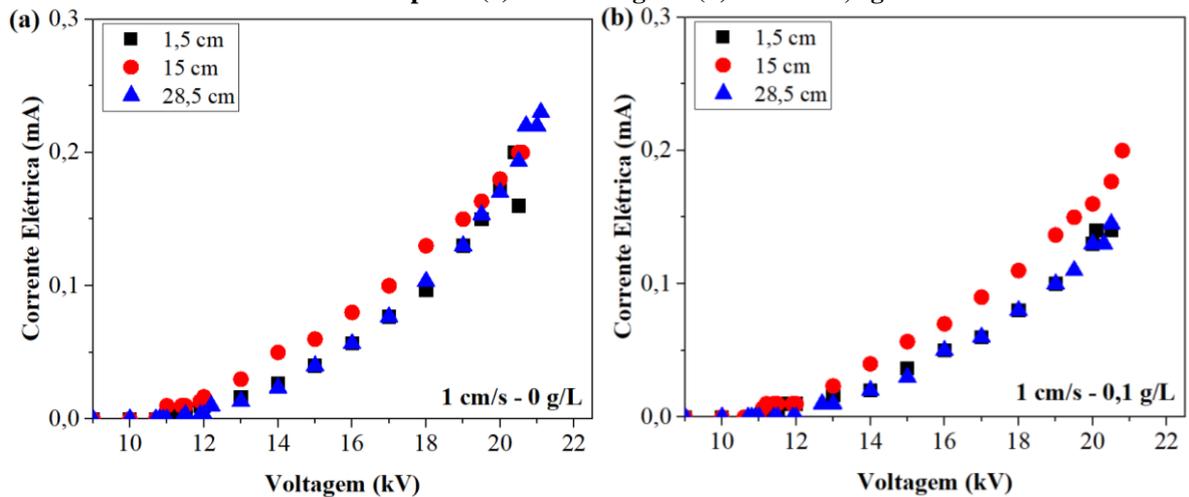
##### 4.3.2.1 Características Elétricas

- Curvas Corrente-Tensão

As curvas corrente-tensão para a configuração com 1 eletrodo de descarga apresentaram um comportamento muito semelhante para todas as velocidades do ar. Na Figura 20 estão expostos os resultados para a velocidade de 1 cm/s. Os resultados para as demais velocidades foram semelhantes aos com a velocidade de 1 cm/s e podem ser consultados no Apêndice B (Figura 69). As curvas apresentaram o perfil esperado, com um crescimento parabólico da corrente elétrica com o aumento da voltagem aplicada. Ao comparar os resultados com a concentração de NaCl de 0 g/L e 0,1 g/L, fica evidente que para todas as velocidades avaliadas, os maiores valores de corrente elétrica foram obtidos com a ausência de nanopartículas de NaCl. Li *et al.* (2015) associam esse comportamento ao consumo de íons para o carregamento das partículas.

As curvas com os espaçamentos de 1,5 e 28,5 cm foram praticamente sobrepostas com ambas as concentrações de partículas (Figura 20a-b), o mesmo aconteceu com as demais velocidades e pode ser consultado no Apêndice B (Figura 69). Com a concentração de 0,1 g/L, os valores obtidos com os espaçamentos de 1,5 e 28,5 cm foram muito semelhantes até a voltagem de aproximadamente 17 kV, acima da qual o espaçamento de 1,5 cm apresentou valores de corrente elétrica superiores. Em todos os casos, o espaçamento de 15 cm alcançou uma maior corrente elétrica entre as voltagens de 13 e 19 kV, o que pode indicar uma melhor distribuição do campo elétrico no interior do precipitador eletrostático.

Figura 20 - Curvas corrente-tensão com 1 eletrodo de descarga em função dos diferentes espaçamentos de entrada para: (a) 1 cm/s - 0 g/L e (b) 1 cm/s - 0,1 g/L.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

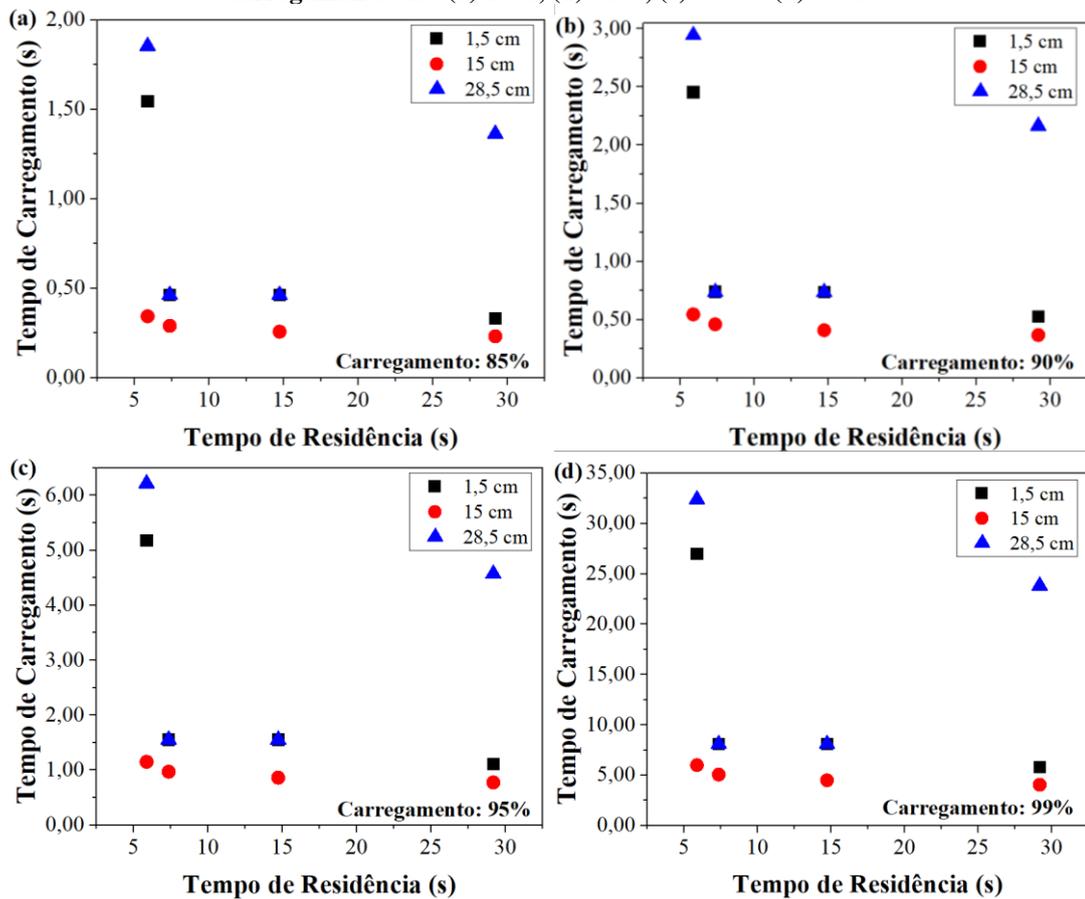
- Carregamento Elétrico

Os tempos de carregamento elétrico requeridos para as partículas alcançarem as percentagens da carga de saturação entre 85 e 99%, calculados conforme a Equação 10, podem ser visualizadas na Figura 21. É importante observar que cada uma das subfiguras presentes na Figura 21 apresentam uma faixa de valores diferente no eixo y, para uma melhor visualização dos dados.

O tempo de carregamento elétrico requerido para as partículas atingirem 85% (Figura 21 a) e 90% (Figura 21b) foi relativamente próximo, com uma diferença máxima de 1 s. Para atingir 95% (Figura 21c) esse valor foi um pouco superior, com um tempo máximo requerido 2 ou 3 vezes maior, mas da mesma ordem de grandeza. No entanto, para alcançar 99% de carregamento (Figura 21d) foi necessário um tempo máximo muito maior, de aproximadamente 33 s. Apesar do tempo elevado, o maior tempo de residência avaliado foi de 29,18 s, com uma diferença de menos de 4 s em relação ao maior tempo de carregamento requerido, o que indica que foi possível obter um bom carregamento e eficiência de coleta de partículas com as condições aplicadas. Apesar do tempo de residência de 5,88 s ser o mais curto, ele consegue ser maior ou bastante próximo dos maiores tempos de carregamento requeridos para os percentuais entre 85 e 95% (Figura 21a-c). Porém, para o carregamento atingir um percentual de 99% (Figura 21d) com os espaçamentos de 1,5 e 28,5 cm são necessários entre 27 e 33 s, respectivamente. Por ser um tempo muito superior ao tempo de residência de 5,88 s, pode-se

supor que o carregamento elétrico e a coleta de partículas com essas condições não são tão elevados quanto com as demais.

**Figura 21 - Tempo de carregamento elétrico das partículas de aerossol em função do tempo de residência das partículas com 1 eletrodo de descarga, para os diferentes espaçamentos de entrada, para os carregamentos de: (a) 85%, (b) 90%, (c) 95% e (d) 99%.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O espaçamento de 1,5 cm apresentou menores tempos de carregamento necessários com o aumento do tempo de residência das partículas no interior do precipitador eletrostático, que pode ser associado com as maiores correntes elétricas obtidas com as velocidades mais baixas. O tempo de carregamento requerido para 99% de saturação foi muito maior quando utilizado o menor tempo de residência de 5,88 s em comparação com os demais tempos de residência, alcançando uma diferença de até 25 s (Figura 21d). A estimativa dos tempos de carregamento foi igual para os tempos de residência de 14,72 e 7,36 s, o que pode indicar uma semelhança elétrica, e talvez de eficiência de coleta, ao serem utilizadas essas condições.

Para o espaçamento de 15 cm, o comportamento obtido também foi conforme o esperado, apesar de a diferença entre os tempos de carregamento requeridos ser pequena, sendo a maior delas de 1 s (Figura 21d). Essa pequena diferença pode indicar um carregamento

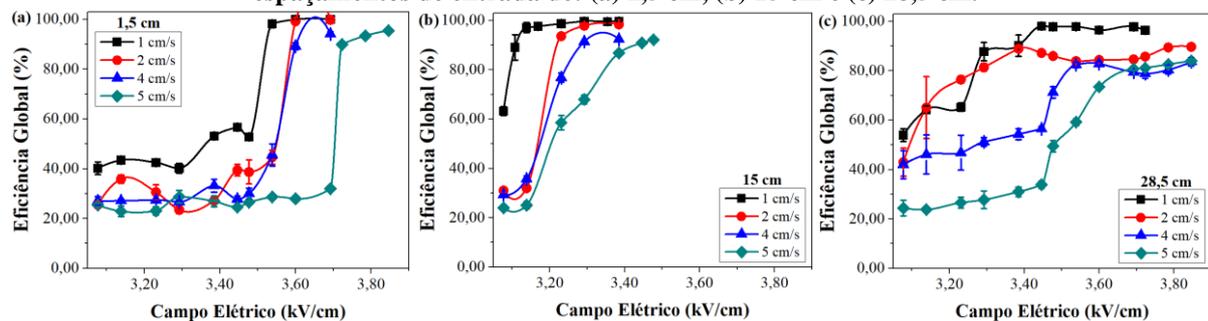
elétrico mais uniforme, decorrente da localização do eletrodo de descarga no centro do precipitador eletrostático, mesmo quando utilizadas diferentes velocidades do ar e, conseqüentemente, tempos de residência. Além disso, os baixos tempos de carregamento indicam que essa configuração pode promover um carregamento elétrico mais eficiente e uma melhor eficiência de coleta de partículas.

Para o espaçamento de 28,5 cm, o comportamento divergiu do esperado para os resultados referentes ao tempo de residência de 29,18 s, uma vez que as curvas apresentaram um perfil decrescente entre os tempos de 5,88 e 14,72 s e um acréscimo súbito para o tempo de 29,18 s. Esses resultados podem indicar um carregamento não uniforme com esse espaçamento, podendo estar relacionado à maior dificuldade de carregamento na região final do precipitador eletrostático. Porém, a maior parte das condições utilizadas com esse espaçamento foi capaz de fornecer um tempo de residência menor ou bastante próximo ao tempo de carregamento requerido. Também é interessante destacar que para os tempos de 7,36 e 14,72 s os resultados com os espaçamentos de 1,5 e 28,5 cm foram sobrepostos, sugerindo uma semelhança nas características de carregamento elétrico dessas duas configurações nas condições avaliadas.

#### 4.3.2.2 Eficiências Globais de Coleta de Partículas

Os resultados de eficiência global, para os mesmos experimentos, estão exibidos na Figura 22 e na Figura 23. Para uma avaliação mais completa desses fenômenos, ambas as figuras serão analisadas em conjunto, a fim de explorar a influência do espaçamento de entrada e da velocidade do ar na coleta de partículas.

**Figura 22 - Eficiências globais com 1 eletrodo de descarga para diferentes velocidades do ar com os espaçamentos de entrada de: (a) 1,5 cm, (b) 15 cm e (c) 28,5 cm.**

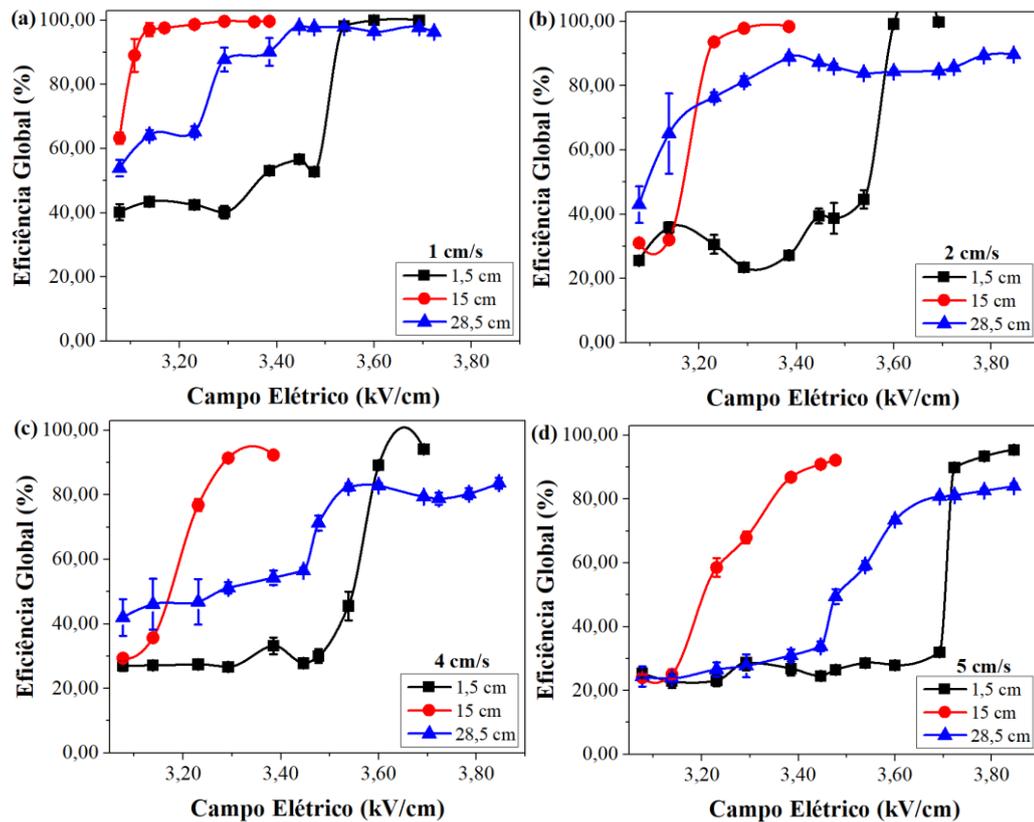


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Para todos os espaçamentos ocorreu uma redução na eficiência de coleta com o aumento da velocidade do ar (Figura 22), devido ao menor tempo de residência das partículas. A velocidade de 1 cm/s (Figura 22a) foi a que apresentou as maiores eficiências de coleta para todos os espaçamentos. Para as demais velocidades (Figura 22b e Figura 22c), o aumento desse

parâmetro acarretou a diminuição da eficiência de coleta, mas na faixa inicial e final do campo elétrico ocorreram algumas sobreposições e oscilações, por serem regiões de baixo e alto carregamento, respectivamente.

**Figura 23 - Eficiências globais com 1 eletrodo de descarga para diferentes espaçamentos de entrada com as velocidades de: (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O espaçamento de 1,5 cm apresentou as menores eficiências de coleta para quase toda a faixa de campo elétrico avaliada, seguido por um súbito aumento de eficiência, entre 3,45 e 3,69 kV/cm, até atingir as máximas eficiências de coleta. Estas foram obtidas com campos elétricos superiores a 3,72 kV/cm, e alcançaram eficiências acima de 95%, sendo a maior delas com a velocidade de 1 cm/s (Figura 23a). Nessa configuração, o eletrodo de descarga estava localizado mais próximo ao início da placa coletora, pode-se concluir que as partículas ficaram em contato com a região de maior intensidade do campo elétrico imediatamente após entrar no duto do precipitador. Assim, grande parte das partículas deve ter sido coletada na parte inicial da placa coletora. No entanto, dentro do duto do precipitador eletrostático havia uma região onde a intensidade do campo elétrico era menor, devido a um comprimento de 28,5 cm sem nenhum fio de descarga. Portanto, supõe-se que uma parte das partículas não foi coletada devido à perda da carga elétrica adquirida previamente.

Ainda para o espaçamento de 1,5 cm, a maioria dos campos elétricos avaliados apresentou baixa eficiência de captação (entre 25 – 52%) e o melhor desempenho ocorreu com campos elétricos acima de 3,60 kV/cm. Isso provavelmente ocorreu porque as partículas adquiriram uma carga maior, que demorou mais para se perder, favorecendo a coleta de partículas. O aumento da velocidade (Figura 23b e Figura 23c) reduziu ainda mais a coleta de partículas, mas o espaçamento de 1,5 cm apresentou remoções acima de 90% com campos elétricos maiores. Essa redução pode ser mais bem observada com a velocidade do ar de 5 cm/s (Figura 23d), pelo menor tempo de residência das partículas. Isso pode ter ocorrido porque as partículas estavam intensamente carregadas no início do precipitador eletrostático e percorreram o duto do equipamento em um tempo menor, impedindo que tivessem mais tempo para serem descarregadas. Além disso, a oscilação na região inicial é mais evidente com o espaçamento de 1,5 cm, até 3,4 kV/cm, uma vez que esse espaçamento apresenta uma maior perda das cargas elétricas que foram adquiridas pelas partículas.

O espaçamento de 15 cm conseguiu atingir as máximas eficiências de coleta (entre 92 e 99,7%) com menores campos elétricos, a partir de 3,4 kV/cm. Nessa configuração, o fio foi colocado exatamente no meio do duto do precipitador eletrostático, promovendo uma distribuição mais uniforme do campo elétrico ao longo de toda a extensão do eletrodo coletor. Os resultados de eficiência de coleta para o espaçamento de 15 cm (Figura 22b) corroboram essa teoria, pois os valores de eficiência de coleta foram semelhantes entre si e ocorreu o aumento da coleta de partículas para quase todas as condições avaliadas. Embora o aumento das velocidades do ar tenha afetado o desempenho do precipitador eletrostático com este espaçamento, ele ainda atingiu uma eficiência de coleta superior aos demais espaçamentos avaliados, exceto para os campos elétricos abaixo de 3,23 kV/cm com as velocidades do ar de 2 e 4 cm/s (Figura 23b e Figura 23c). Entretanto, também apresentou a mesma tendência de um brusco aumento de eficiência, com diferenças entre 20 e 50% com um pequeno aumento no campo elétrico aplicado. Para 1 cm/s (Figura 23a), esse aumento foi observado a partir de 3,08 kV/cm e para as demais velocidades, acima de 3,14 kV/cm.

Com o espaçamento de 28,5 cm o aumento de eficiência ocorreu de forma mais gradual para as velocidades do ar de 1 e 2 cm/s (Figura 23a-b). Porém, o aumento da velocidade do ar para 4 e 5 cm/s (Figura 23c-d) acarretou num súbito aumento da eficiência de coleta a partir de 3,4 kV/cm. Além disso, variação da velocidade do ar teve uma maior influência para esse espaçamento (Figura 22c) e essa configuração atingiu as menores eficiências de coleta de partículas, com valores máximos entre 83,6 e 96,4%, obtidos a partir do campo elétrico de 3,4

kV/cm. Nesse caso, as partículas percorreram essa distância em uma região de baixa intensidade de campo elétrico quando entraram no precipitador eletrostático e a coleta de partículas foi favorecida com a menor velocidade do ar. Como o tempo de residência das partículas foi maior, elas tiveram mais tempo para adquirir carga na região de menor campo elétrico. Assim, ao invés de perder carga na região final do duto do precipitador, essa carga foi aumentada, pois as partículas passaram pela região de maior intensidade de campo elétrico antes de deixarem o equipamento. Como pode ser visto, este espaçamento obteve uma eficiência de coleta maior que o espaçamento de 1,5 cm, para campos elétricos abaixo de 3,54 kV/cm.

Com os espaçamentos de entrada de 1,5 e 28,5 cm foi necessário realizar mais experimentos, com campos elétricos entre 3,38 e 3,85 kV/cm, para tentar obter eficiências acima de 90%. Para o espaçamento de entrada de 1,5 cm, a eficiência desejada foi alcançada, mas com o espaçamento de entrada de 28,5 cm essa eficiência só foi obtida com a velocidade do ar de 1 cm/s, o que mostra uma limitação dessa configuração. Esse comportamento pode ser explicado pelo menor tempo de residência das partículas no duto do precipitador eletrostático, o que fez com que as partículas não fossem carregadas satisfatoriamente na região de menor intensidade de campo elétrico. Além disso, ao passar pela região final de maior intensidade do campo elétrico, o tempo não foi suficiente para que as partículas adquirissem uma carga suficientemente alta e fossem coletadas antes de deixar o precipitador eletrostático.

Também é interessante relacionar os resultados de eficiência de coleta com as previsões realizadas a partir dos dados de tempo de carregamento, discutidos na subseção 4.3.2.1, onde foi observado que as maiores correntes elétricas foram obtidas para o espaçamento de 15 cm e para os espaçamentos de 1,5 e 28,5 cm as curvas foram sobrepostas em diversos pontos.

#### 4.3.2.3 Eficiências Fracionárias

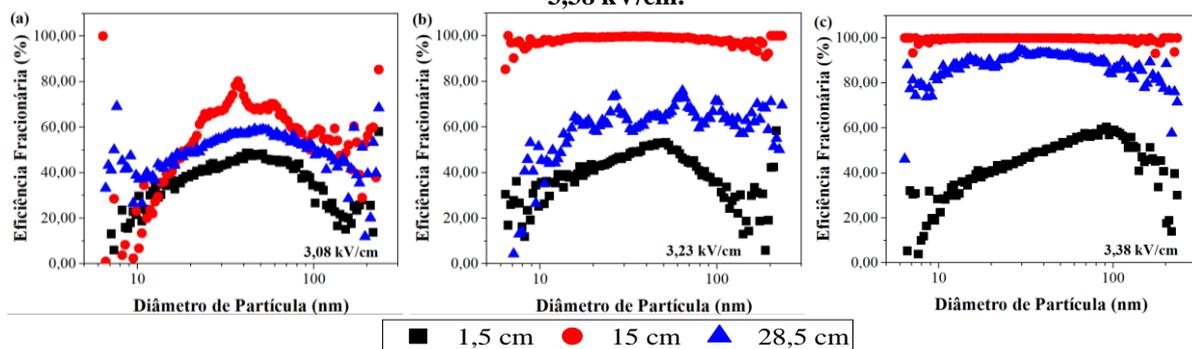
Como foi observado através dos resultados de eficiência de coleta globais, de acordo com o espaçamento utilizado, foi avaliada uma faixa de campo elétrico diferente. Para os espaçamentos de entrada de 1,5 e 28,5 cm foi necessário realizar experimentos com maiores campos elétricos para que fosse obtidas elevadas eficiências de coleta, o que não foi necessário para o espaçamento de 15 cm. Dessa forma, decidiu-se exibir os gráficos de eficiência fracionária apenas para os campos elétricos na faixa de 3,08 a 3,38 kV/cm, por terem sido realizados experimentos com os 3 espaçamentos avaliados e ser possível realizar uma melhor comparação entre os resultados. Além disso, apesar dos experimentos terem sido realizados em triplicata, as curvas de eficiência fracionária não apresentam os desvios padrões, pois a grande

quantidade de barras, para cada um dos diâmetros avaliados, interferiria na análise dos resultados. Entretanto, os desvios podem ser visualizados nos gráficos de eficiência global.

- Influência do Campo Elétrico

O campo elétrico foi um parâmetro que apresentou influência na eficiência de coleta de partículas, principalmente quando comparados os campos elétricos de 3,08, 3,23 e 3,38 kV/cm. Por isso, foram selecionadas as curvas referentes à essas condições para serem apresentadas no texto (Figura 24) e as demais curvas podem ser consultadas no Apêndice C (Figura 72). Além disso, a influência do campo elétrico foi muito semelhante para todas as velocidades do ar utilizadas. Por isso, serão exibidas as curvas apenas para 1 cm/s e as curvas para as demais velocidades podem ser consultadas no Apêndice C (Figura 73 - Figura 75).

**Figura 24 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga e com a velocidade do ar de 1 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,23 kV/cm e (c) 3,38 kV/cm.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Como pode ser observado, para todos os campos elétricos aplicados o espaçamento de 1,5 cm foi a configuração menos eficiente, seguido por 28,5 cm e por fim 15 cm. Com o espaçamento de 1,5 cm não é possível obter uma elevada eficiência de coleta nem com o campo elétrico de 3,38 kV/cm (Figura 24c), que apresentou um pico de máxima eficiência de cerca de 60%, em torno do diâmetro de partícula de 100 nm. Esse comportamento está relacionado diretamente à região de coleta de partículas de cada configuração, com o espaçamento de 1,5 cm apresentando a região de maior intensidade do campo elétrico logo no início do precipitador eletrostático, seguido por uma longa extensão (28,5 cm) do duto do equipamento sem eletrodos de descarga e aumentando a possibilidade de que ocorra a perda da carga elétrica adquirida pelas partículas. Com o espaçamento de 15 cm, o carregamento de partícula é mais uniforme, pela região de alta intensidade do campo elétrico estar localizada exatamente no centro do duto do equipamento. No caso do espaçamento de 28,5 cm, essa região se encontra logo na saída do

precipitador eletrostático, fazendo com que essas partículas tenham menos tempo para serem carregadas, mas evitando o problema do descarregamento elétrico das partículas.

A curva de eficiência com o espaçamento de 15 cm e o campo elétrico de 3,08 kV/cm (Figura 24a) apresentou um comportamento anômalo para as partículas entre 30 e 50 nm, provavelmente associado a alguma instabilidade durante a execução do experimento. Para o espaçamento de 28,5 cm, com o campo elétrico de 3,23 kV/cm (Figura 24b), a curva apresentou um comportamento oscilatório, indicando um carregamento instável de partícula com essas condições experimentais. Além disso, nas faixas iniciais e finais do diâmetro de partícula, as eficiências de coleta apresentaram comportamentos instáveis, provavelmente associados com a pequena quantidade de partículas com esses diâmetros, e também pode ser um indicativo de um carregamento elétrico não eficiente nessas regiões.

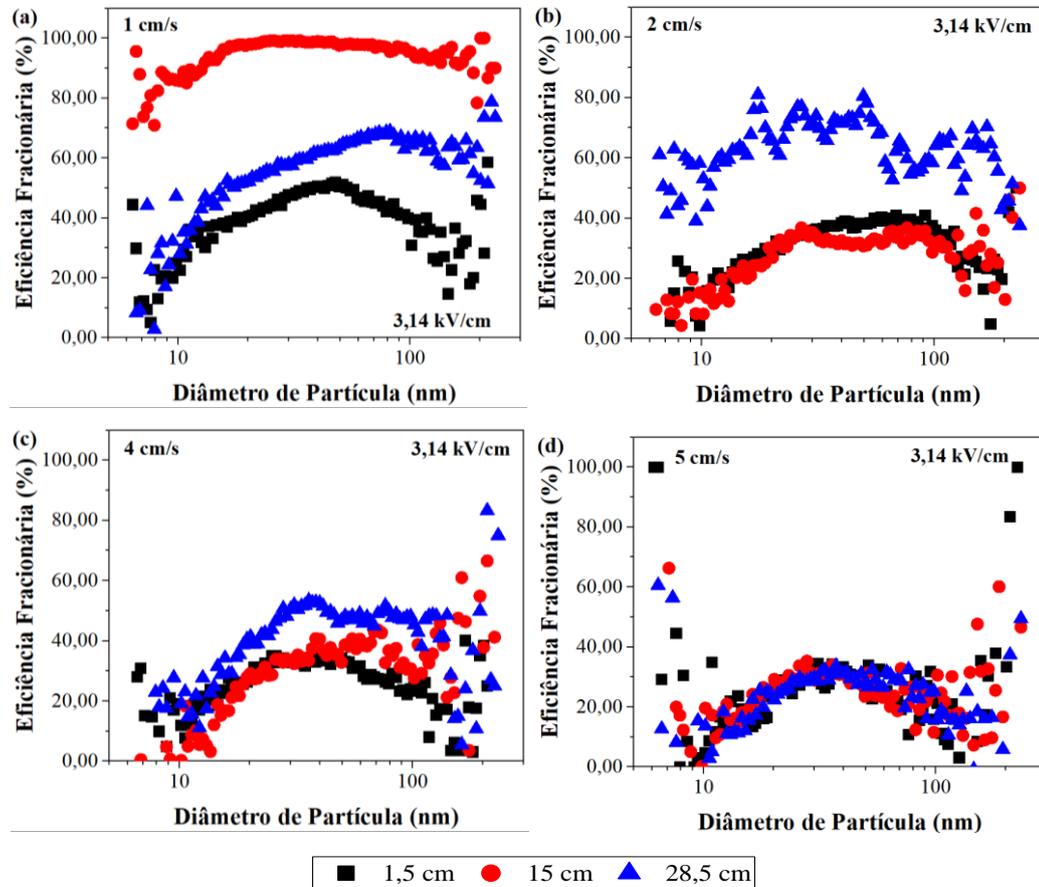
Para as demais velocidades, o comportamento foi semelhante ao observado com 1 cm/s. As eficiências de coleta com os espaçamentos de entrada de 1,5 e 15 cm foram próximas entre si, quando utilizados os menores campos elétricos. O espaçamento de 15 cm apresentou um aumento progressivo da eficiência de coleta a partir de 3,23 kV/cm e alcançou valores superiores a 90% quando utilizados os campos elétricos de 3,29 e 3,38 kV/cm. O espaçamento de 28,5 cm apresentou elevadas eficiências de coleta com os maiores campos elétricos e menores velocidades do ar.

- Influência da Velocidade do Ar

A velocidade do ar apresentou uma grande influência nos resultados devido à redução dos tempos de residência das partículas. Esse efeito foi mais pronunciado com os campos elétricos intermediários. Por isso, foram selecionadas as eficiências fracionárias com o campo elétrico 3,14 kV/cm, para todas as velocidades utilizadas (Figura 25). Os demais gráficos de eficiências fracionárias podem ser visualizados no Apêndice C (Figura 72 - Figura 75)..

As eficiências de coleta de partículas com as maiores velocidades foram, na maior parte, menores do que com a velocidade de 1 cm/s. Além disso, também ocorreram as oscilações nas faixas inicial e final do diâmetro de partículas e o espaçamento de 1,5 cm apresentou as menores eficiências de coleta de partículas com todos os campos elétricos aplicados.

**Figura 25 -** Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga e com o campo elétrico de 3,14 kV/cm, em função dos espaçamentos de entrada, com as velocidades do ar: (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Com a velocidade de 1 cm/s e o espaçamento de 15 cm, o precipitador eletrostático foi capaz de alcançar elevadas eficiências de coleta (acima de 90%) com o campo elétrico a partir de 3,14 kV/cm (Figura 25a). Ao aumentar a velocidade para 2 cm/s (Figura 25b), as eficiências com 15 cm sofreram uma redução de até 50%, em decorrência do aumento da velocidade do ar. As elevadas eficiências com esse espaçamento foram obtidas apenas a partir de 3,23 kV/cm e a eficiência de coleta foi mais estável e maior, com um máximo de cerca de 80%, contra o máximo de cerca de 70% obtido com a velocidade de 1 cm/s (Figura 73b). Com o espaçamento de 28,5 cm ocorreu não apenas a redução da eficiência de coleta, como também uma maior oscilação das curvas, com os menores campos elétricos (Figura 25b).

O aumento da velocidade para 4 cm/s (Figura 25c) e a maior redução do tempo de residência das partículas prejudicou ainda mais a coleta de partículas, como pode ser observado devido aos menores valores obtidos em todas as condições. Além disso, o aumento do campo elétrico não teve muita influência nas eficiências de coleta obtidas com o espaçamento de 1,5

cm. O espaçamento de 28,5 cm foi afetado pelo aumento da velocidade, apresentando uma baixa eficiência de coleta (máximo de cerca de 60%) com todos os campos elétricos aplicados. Isso pode ser explicado pelo fato de nessa configuração a região de maior intensidade do campo elétrico estar localizada na saída do precipitador eletrostático. Ao aumentar a velocidade do ar e, conseqüentemente, reduzir o tempo de residência das partículas, estas não conseguem permanecer um tempo suficiente nessa região de alta intensidade para que ocorra um carregamento elétrico efetivo dessas partículas. Além disso, o tempo não é suficiente para que elas sejam coletadas. Também é interessante ressaltar que o carregamento por difusão é a principal forma de carregamento de nanopartículas. Assim, um maior tempo de residência aumenta o tempo de contato e probabilidade de colisão das partículas.

O efeito do aumento da velocidade sob a eficiência de coleta fica ainda mais evidente com a velocidade de 5 cm/s (Figura 25d). As eficiências obtidas com o espaçamento de 15 cm foram baixas, o que ocasionou a sobreposição das curvas dos 3 espaçamentos. Além disso, para todos os campos elétricos, as eficiências de coleta obtidas com os espaçamentos de 1,5 e 28,5 cm foram sobrepostas, com um máximo de eficiência de aproximadamente 40%, mesmo com o campo elétrico de 3,38 kV/cm (Figura 75d).

#### 4.3.3 Eletrodos de Descarga: 3 Fios

##### 4.3.3.1 Características Elétricas

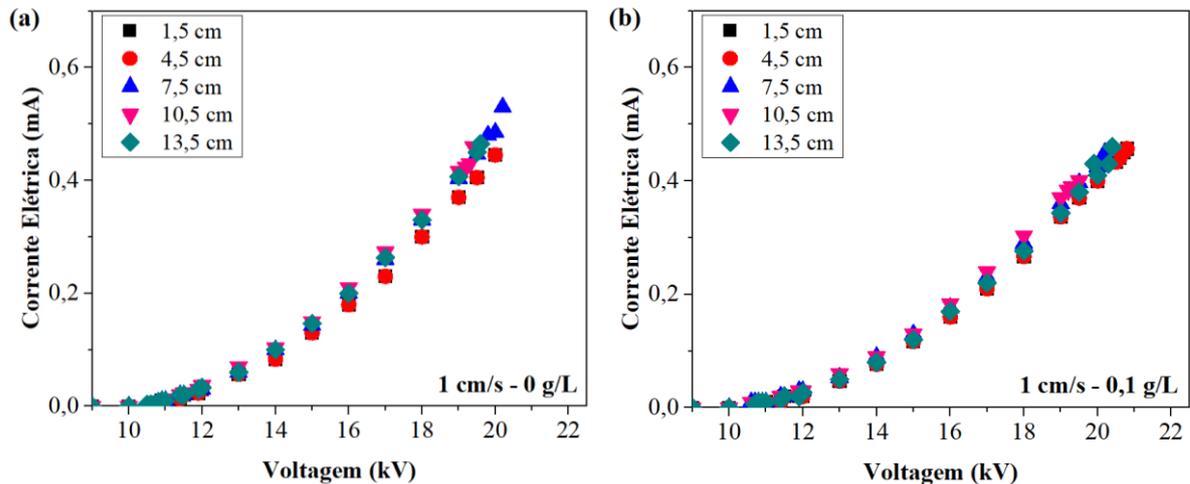
- Curvas Corrente-tensão

Os comportamentos das curvas com 3 eletrodos de descarga também foram muito semelhantes entre si. Assim, na Figura 26 estão expostos os resultados para a velocidade de 1 cm/s, com as concentrações de solução de NaCl de 0 e 0,1 g/L, e os resultados para as demais velocidades podem ser consultados no Apêndice B (Figura 70).

De uma forma geral, as curvas apresentaram comportamento semelhante, e apresentaram voltagens de início em torno de 10 kV e voltagens de ruptura entre 20 e 22 kV. Observa-se que as curvas correspondentes aos espaçamentos de 1,5 e 4,5 cm foram sobrepostas em todas as condições avaliadas, o que indica um comportamento elétrico muito semelhante em ambos os casos. Em contrapartida, as curvas referentes aos espaçamentos de 7,5, 10,5 e 13,5 cm apresentaram menores voltagens de ruptura, exceto para a curva de 1 cm/s – 0 g/L (Figura 26a), e valores de corrente minimamente superiores. O que indica que o precipitador

eletrostático pode apresentar um melhor desempenho na coleta de partículas quando operado com espaçamentos de entrada superiores a 7,5 cm, o que será avaliado de forma mais aprofundada nas seções posteriores.

**Figura 26 - Curvas corrente-tensão com 3 eletrodos de descarga em função dos diferentes espaçamentos de entrada para: (a) 1 cm/s - 0 g/L, (b) 1 cm/s - 0,1 g/L.**

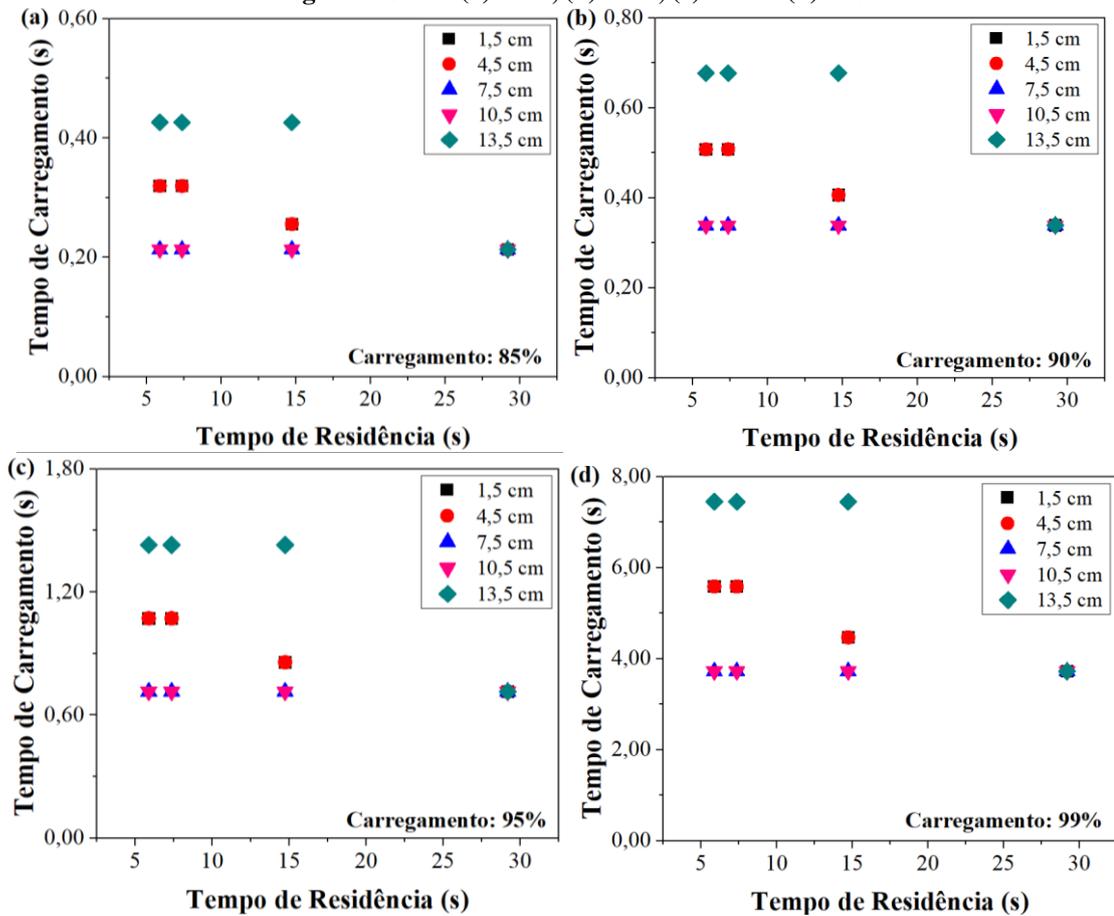


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

- Carregamento Elétrico

O tempo de carregamento elétrico das partículas foi obtido para os diferentes espaçamentos de entrada, em função dos tempos de residência, e estão exibidos na Figura 27. Os valores foram calculados assumindo que as partículas atingiriam porcentagens de carregamento de 85, 90, 95 e 99% da carga de saturação das partículas de acordo com a Equação 10. Para a realização dos cálculos foi considerado o campo elétrico de 3,53 kV/cm (referente à voltagem de 11,5 kV), uma vez que esse valor está acima da faixa de voltagem de início e o campo elétrico está bem estabelecido no interior do precipitador eletrostático. As correntes elétricas utilizadas foram obtidas pelas curvas corrente-tensão apresentadas na Figura 26. É importante observar que cada uma das subfiguras presentes na Figura 26 apresentam uma faixa de valores diferente no eixo y, para uma melhor visualização dos dados.

**Figura 27 - Tempo de carregamento elétrico das partículas de aerossol em função do tempo de residência das partículas com 3 eletrodos de descarga, para os diferentes espaçamentos de entrada, para os carregamentos de: (a) 85%, (b) 90%, (c) 95% e (d) 99%.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O perfil de carregamento das partículas foi semelhante em todos os casos e o tempo requerido para as partículas atingirem os percentuais de carregamentos definidos foi igual para alguns espaçamentos. Os resultados foram sobrepostos para os espaçamentos de 1,5 e 4,5 cm, 7,5 e 10,5 cm, e o de 13,5 cm apresentou tempos de carregamento que diferiram dos demais espaçamentos avaliados. Com 7,5 e 10,5 cm, as partículas atingiram o carregamento elétrico com um menor tempo de carregamento, seguidos pelos espaçamentos de 1,5 e 4,5 cm, e, por fim, com o espaçamento de 13,5 cm. Além disso, é possível observar que os tempos de carregamento obtidos foram iguais, em todos os casos, com os menores tempos de residência (5,88 e 7,36 s). É importante ressaltar que o tempo de residência é inversamente proporcional à velocidade do ar. Logo, para as partículas com o tempo de residência de 14,72 s, os tempos de carregamento foram inferiores aos obtidos anteriormente com os espaçamentos de 1,5 e 4,5 cm, mantendo-se inalterados para os demais espaçamentos. Por fim, com o tempo de residência de 29,18 s, os tempos de carregamento foram sobrepostos para todos os espaçamentos, com

valores iguais aos obtidos com os espaçamentos de 7,5 e 10,5 cm, em toda a faixa de tempo de residência analisada.

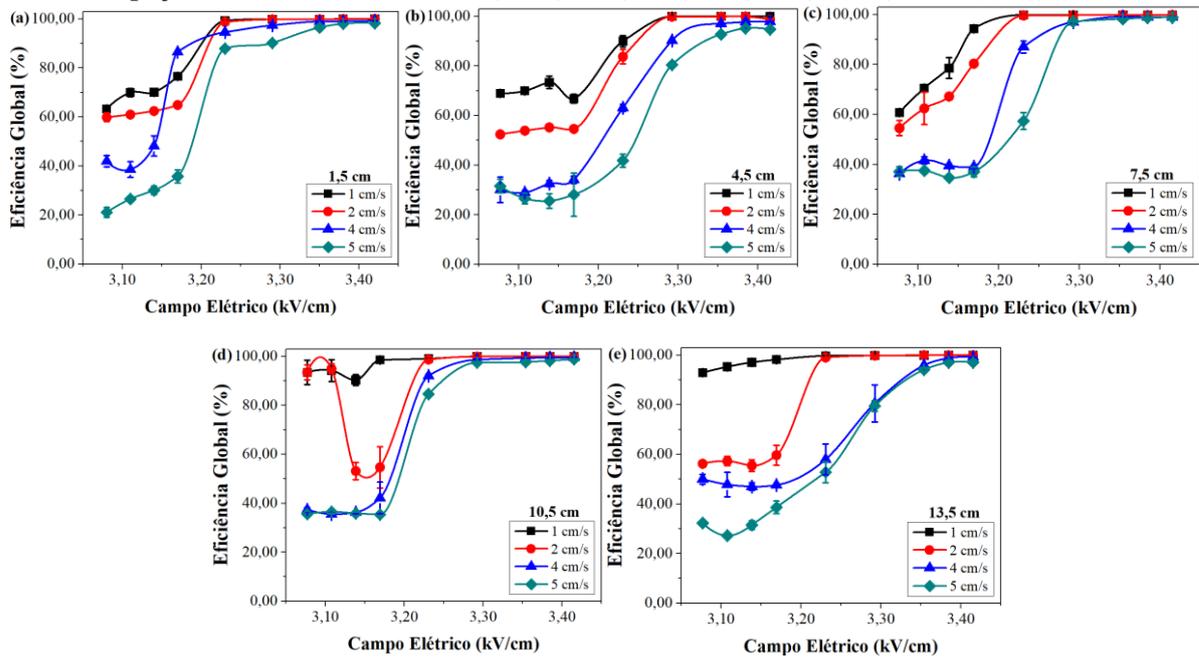
Para as partículas atingirem um carregamento elétrico de 85 % (Figura 27a), o tempo de carregamento máximo necessário foi de cerca de 0,43 s, cerca de 13 vezes inferior ao menor tempo de residência utilizado. Dessa forma, mesmo com a utilização de maiores velocidades é possível obter um carregamento de 85% em um curto período. Aumentando um pouco mais a taxa de carregamento desejada, 90% (Figura 27b), os tempos requeridos ainda mantiveram a ordem de grandeza obtida para o carregamento de 85% e variaram entre uma faixa de 0,34 e 0,68 s. Para atingir um carregamento elétrico de 95% (Figura 27c), o tempo de carregamento necessário praticamente dobrou para todos os espaçamentos, mas ainda mantendo valores inferiores aos tempos de residências utilizados. No entanto, para o carregamento de 99% (Figura 27d) foi observado um aumento significativo do tempo de carregamento, com valores entre 3,72 e 7,45 s. Nesse caso, observa-se que para os tempos de residência de 5,88 e 7,36 s, o tempo de carregamento requerido é muito próximo, ou até mesmo superior, a esses tempos de residência. Essa constatação implica na menor probabilidade de se obter esse percentual de carregamento com as maiores velocidades utilizadas.

#### 4.3.3.2 Eficiências Globais de Coleta de Partículas

As eficiências globais para os diferentes espaçamentos e velocidades do ar avaliados, estão exibidas na Figura 29 e na Figura 29.

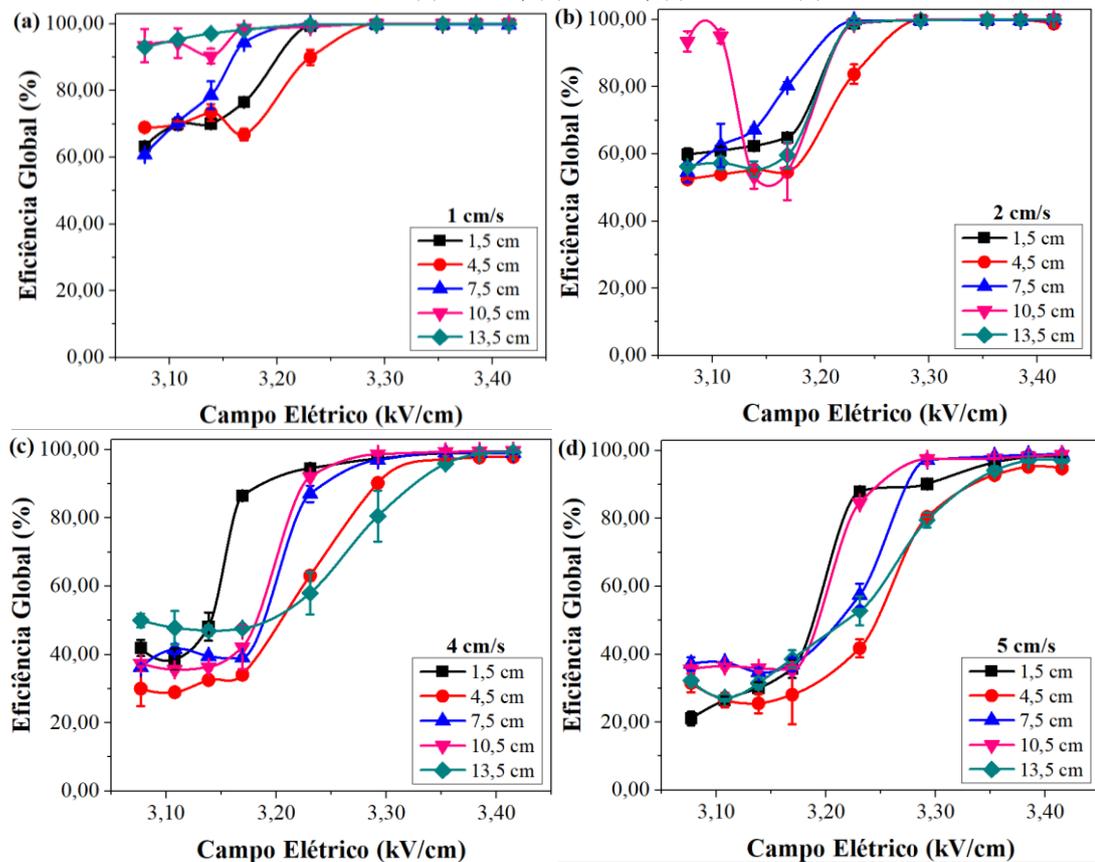
O efeito da velocidade do ar apresentou o comportamento esperado (Figura 28), ou seja, a redução da eficiência de coleta de partículas com o aumento da velocidade do ar utilizada, com a exceção de algumas condições. A primeira delas foi com o espaçamento de entrada de 1,5 cm, com a velocidade do ar de 4 cm/s e o campo elétrico de 3,17 kV/cm (Figura 28a). Nessa condição, esperava-se que a eficiência de coleta de partículas fosse inferior à obtida com as velocidades de 1 e 2 cm/s, contrário ao resultado obtido. Os outros pontos foram observados com o espaçamento de entrada de 10,5 cm, com a velocidade do ar de 2 cm/s (Figura 28d). Essa curva apresenta um decaimento brusco nos pontos com 3,14 e 3,17 kV/cm. Nesse caso, esperava-se que esses pontos apresentassem uma alta eficiência, como observado com os demais campos elétricos nessa velocidade, ou que os pontos iniciais de 3,08 e 3,11 kV/cm apresentassem menores eficiências, seguindo o perfil das velocidades do ar de 4 e 5 cm/s.

Figura 28 – Eficiências globais com 3 eletrodos de descarga para diferentes velocidades do ar com os espaçamentos de entrada de: (a) 1,5 cm, (b) 4,5 cm, (c) 7,5 cm, (d) 10,5 cm e (e) 13,5 cm.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 29 - Eficiências globais com 3 eletrodos de descarga para diferentes espaçamentos de entrada com as velocidades de: (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Esses pontos de menor eficiência podem indicar um efeito da blindagem elétrica nessas condições (CHEN *et al.*, 2021), ou os pontos iniciais de alta eficiência ocorreram em

decorrência da menor velocidade do ar combinada com a distribuição do campo elétrico com o espaçamento de 10,5 cm. É interessante observar como o comportamento das curvas com 1 e 2 cm/s se alteraram com os diferentes espaçamentos de entrada, especialmente até o campo elétrico de 3,23 kV/cm, sendo a maior diferença entre as duas velocidades (cerca de 30%) com o espaçamento de 13,5 cm (Figura 28e).

Com a velocidade do ar de 1 cm/s (Figura 29a), a partir de 3,29 kV/cm, todos os espaçamentos de entrada apresentaram uma eficiência global acima de 95%. Entretanto, na faixa inicial de operação do campo elétrico (3,08 – 3,14 kV/cm), o espaçamento de entrada apresentou uma elevada influência na eficiência de coleta de partículas. Para os resultados com a velocidade do ar de 2 cm/s (Figura 29b), todos os espaçamentos apresentaram uma eficiência muito elevada a partir de 3,29 kV/cm (> 95%). Porém, para os menores valores de campo elétrico, o aumento da velocidade do ar diminuiu significativamente a eficiência de coleta de partículas, como pode ser observado principalmente com os espaçamentos de 10,5 e 13,5 cm. Para esses casos, a eficiência apresentou uma redução máxima de cerca de 40%. É importante ressaltar que a curva referente ao espaçamento de 10,5 cm obteve dois pontos de mínima eficiência em cerca de 55%, correspondentes aos campos elétricos de 3,14 e 3,17 kV/cm, não observado nos demais casos. Esse comportamento foi obtido em todas as réplicas desse experimento e pode estar relacionado com a menor região para carregamento das partículas, associado com os baixos campos elétricos utilizados. Com a velocidade do ar de 4 cm/s (Figura 29c), as curvas dos diferentes espaçamentos apresentaram um comportamento mais semelhante entre si, variando basicamente os valores de eficiência obtidos. O comportamento das curvas de eficiência com a velocidade de 5 cm/s (Figura 29d) foram semelhantes ao observado com a velocidade de 4 cm/s (Figura 29c).

Além disso, em praticamente todos os casos as curvas apresentaram o comportamento esperado, do aumento da eficiência com o aumento do campo elétrico aplicado (EOM; KANG; CHOI, 2019; ŚWIERCZOK; JEĐRUSIK; ŁUSZKIEWICZ, 2020). Na maior parte da faixa de campo elétrico avaliada, o espaçamento de 1,5 cm apresentou o melhor desempenho na coleta de partículas, seguido pelos espaçamentos de 7,5 e 10,5 cm. Apesar do espaçamento de 13,5 cm ter apresentado a maior variação de eficiência ao longo da faixa de operação, apresentou as menores eficiências entre 3,23 e 3,35 kV/cm, com valores muito próximos dos obtidos com o espaçamento de 4,5 cm. Dessa forma, o espaçamento de 4,5 cm apresentou o pior desempenho quando avaliada todo o intervalo avaliado.

Como a maioria dos espaçamentos apresentou um bom desempenho de acordo com diferentes condições operacionais, foram levantadas algumas hipóteses a fim de buscar determinar os fatores que afetaram as eficiências de coleta, tendo como base a distribuição dos eletrodos apresentada na Figura 15.

Para os espaçamentos de 1,5 cm e 4,5 cm, nos quais os eletrodos de descarga estavam localizados mais próximos ao início da placa coletora, pode ser concluído que as partículas entraram em contato com a região de maior intensidade do campo elétrico imediatamente após entrarem no duto do precipitador. Dessa forma, uma grande parte das partículas deve ter sido coletada na parte inicial da placa coletora. Entretanto, como uma região de 15,5 cm do precipitador eletrostático não possuía nenhum fio de descarga, ou seja, uma região em que a intensidade do campo elétrico era inferior, uma parte das partículas perdeu a carga elétrica adquirida e não foi coletada. Por isso para esses espaçamentos o melhor desempenho ocorreu com os campos elétricos superiores a 3,23 kV/cm, favorecendo a coleta de partículas. O espaçamento de 4,5 cm apresentou as menores eficiências de coleta em grande parte da faixa de campo elétrico utilizada e o aumento de velocidade reduziu a coleta de partículas, mas os espaçamentos de 1,5 e 4,5 cm ainda apresentaram acima de 90% para maiores campos elétricos. Isso pode ter ocorrido devido ao fato de as partículas terem sido carregadas de forma intensa no início do precipitador eletrostático e percorrerem o duto do equipamento em um menor tempo, evitando que tivessem mais tempo para serem descarregadas. A diferença entre o desempenho de ambos os espaçamentos pode estar associada a distribuição das linhas de campo elétrico no interior do equipamento.

Para os espaçamentos de 7,5 e 10,5 cm, a disposição de fios no precipitador eletrostático foi tal que esses se encontraram na região central do equipamento, promovendo uma distribuição de campo elétrico mais uniforme em toda a extensão do eletrodo de coleta. Essas configurações aumentaram o percentual de coleta de partículas com menores campos elétricos, para as velocidades de 1 e 2 cm/s. Apesar do aumento da velocidade afetar o desempenho do precipitador com esses espaçamentos, esses atingiram uma eficiência de coleta maior que os demais espaçamentos avaliados, com os campos elétricos superiores a 3,29 kV/cm. O espaçamento de entrada que foi menos afetado pelo aumento da velocidade foi o de 7,5 cm (Figura 28c), e apresentou as maiores eficiências entre 3,14 e 3,23 kV/cm. Isso pode estar relacionado com o fato desse espaçamento apresentar uma distribuição de fios mais centralizada no duto do precipitador eletrostático, promovendo uma melhor distribuição do campo elétrico, de modo a compensar a redução do tempo de residência das partículas de 29,18 para 14,72 s.

Para o espaçamento de 13,5 cm, as partículas percorrem essa distância em uma região de baixa intensidade do campo elétrico quando entram no precipitador eletrostático, por isso, a coleta de partículas foi favorecida com a menor velocidade do ar. Uma vez que o tempo de residência das partículas foi maior, essas tiveram um maior tempo para adquirirem carga na região de menor campo elétrico. Logo, ao invés de perderem carga na região final do duto do precipitador, essa carga foi aumentada, pois as partículas passaram pela região de maior intensidade de campo elétrico antes de saírem do equipamento. Por isso, esse espaçamento apresentou um aumento considerável na coleta de partículas com a velocidade do ar de 1 cm/s, mesmo com menores campos elétricos. Com a velocidade do ar de 2 cm/s, esse espaçamento teve seu desempenho bastante reduzido na faixa inicial de campo elétrico, mas com valores superiores a coleta de partículas foi praticamente igual à obtida com a velocidade de 1 cm/s. Entretanto, um aumento ainda maior da velocidade do ar, para 4 e 5 cm/s, resultou em uma brusca queda na eficiência de coleta. Esse comportamento pode ser explicado pelo menor tempo de residência das partículas no duto do precipitador, que fez com que as partículas não fossem carregadas de forma satisfatória na região de menor intensidade do campo elétrico. Além disso, ao passar pela região final de maior intensidade do campo elétrico, o tempo não foi suficiente para as partículas adquirirem uma carga suficientemente alta e serem coletadas antes de sair do precipitador eletrostático. De acordo com Zhou *et al.*, (2021), o aumento da velocidade do ar reduz os impactos da distribuição do fluxo são enfraquecidos, pela redução do vórtex causado pelo vento iônico.

Esses resultados podem ser corroborados pelo gráfico apresentado na Figura 27, que mostra que os espaçamentos de 7,5 e 10,5 cm requer um menor tempo para que as partículas sejam carregadas. No caso dos espaçamentos de 1,5 e 4,5 cm, o tempo requerido é um pouco maior, mas pelos motivos discutidos anteriormente, esses espaçamentos conseguiram apresentar um bom desempenho. Entretanto, para o espaçamento de 13,5 cm, o tempo requerido para o carregamento das partículas foi muito maior que os demais espaçamentos. Ao serem utilizadas as maiores velocidades, esse tempo foi superior ao tempo de residência das partículas no interior do precipitador eletrostático, o que explica a redução significativa de eficiência nessas condições.

#### 4.3.3.3 Eficiências Fracionárias

As eficiências fracionárias referentes aos experimentos com 3 eletrodos de descarga estão discutidas a seguir. Visando uma discussão mais objetiva dos resultados, foi feita uma

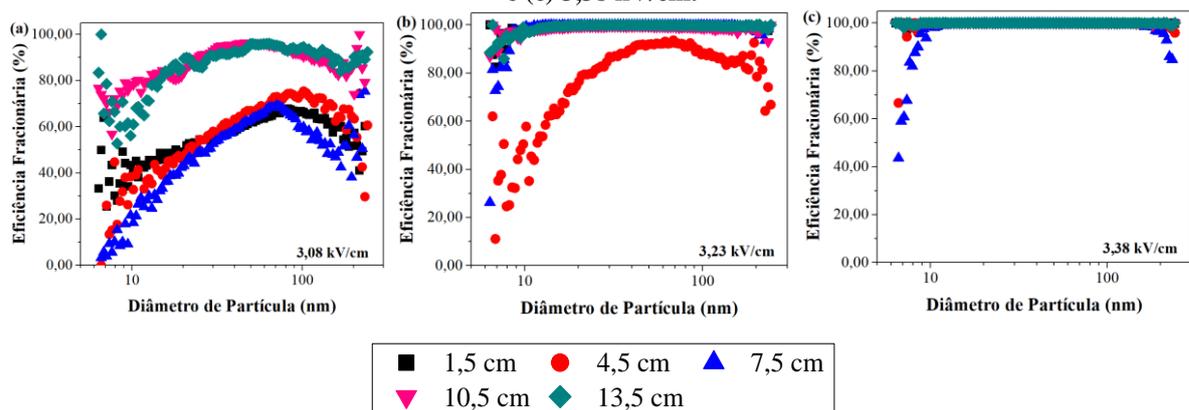
seleção dos gráficos mais relevantes para serem apresentados no texto e os demais podem ser consultados no Apêndice C.

- Influência do Campo Elétrico

Para a avaliação da influência do campo elétrico, foram selecionadas as curvas com a velocidade de 1 cm/s e com os valores de 3,08, 3,23 e 3,38 kV/cm e as demais curvas podem ser consultadas no Apêndice C (Figura 76 - Figura 79).

Com a velocidade de 1 cm/s, os espaçamentos de entrada de 10,5 e 13,5 cm atingiram as maiores eficiências de coleta de partículas com menores campos elétricos. Além disso, não apresentaram uma faixa de operação ótima bem definida, mas em alguns casos (Figura 30a) observa-se uma eficiência superior entre os diâmetros de partícula de 30 e 80 nm. Com os demais espaçamentos de entrada, essa faixa ótima foi muito evidente com o menor campo elétrico (Figura 30a), para partículas com diâmetros entre 70 e 100 nm. Esses picos de maior eficiência vão assumindo um perfil mais parabólico à medida que o campo elétrico aplicado aumenta, até atingir um perfil linear. Ou seja, à medida que o campo elétrico aumenta, a coleta de partículas apresenta uma alta eficiência em praticamente toda a faixa de diâmetro avaliada. Esse comportamento pode ser melhor visualizado através dos resultados com o espaçamento de entrada de 4,5 cm, que obteve as menores eficiências de coleta.

**Figura 30 - Eficiências fracionárias obtidas com 3 eletrodos de descarga e com a velocidade do ar de 1 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,23 kV/cm e (c) 3,38 kV/cm.**

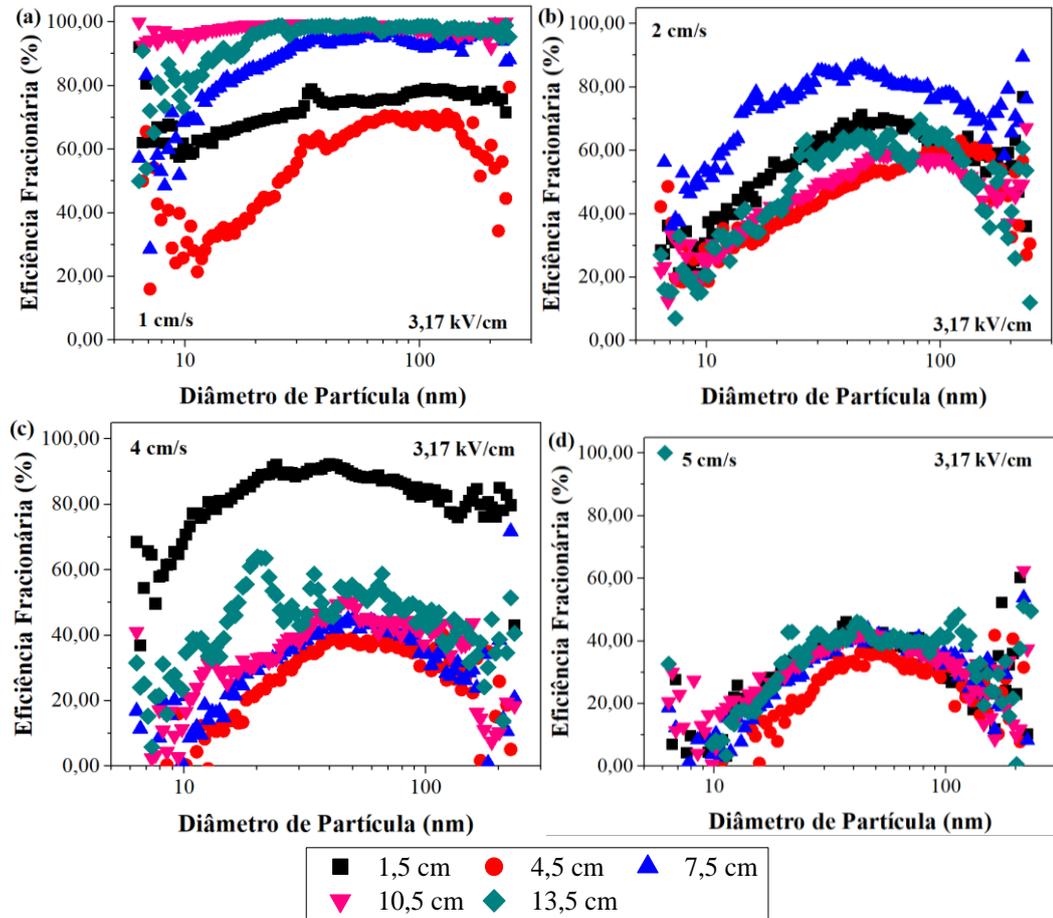


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

- Influência da Velocidade do Ar

Para a avaliação da influência da velocidade do ar, foram selecionadas as curvas com o campo elétrico de 3,17 kV/cm, para todas as velocidades do ar estudadas. As demais curvas podem ser consultadas no Apêndice C (Figura 76 - Figura 79).

**Figura 31 - Eficiências fracionárias obtidas com 3 eletrodos de descarga e com o campo elétrico de 3,14 kV/cm, em função dos espaçamentos de entrada, com as velocidades do ar: (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Com todas as velocidades podem ser identificadas regiões de menores eficiências de coleta nas faixas inicial e final do diâmetro de partícula. Para a velocidade de 1 cm/s e com o campo elétrico de 3,17 kV/cm (Figura 31a), o espaçamento de 7,5 cm se mostrou mais eficiente em relação aos de 1,5 e 4,5 cm, atingindo valores superiores a 90%.

O espaçamento de 13,5 cm foi o mais afetado pelo aumento da velocidade para 2 cm/s (Figura 31b), atingindo uma eficiência máxima em torno de 70%. Com o espaçamento de entrada de 10,5 cm, as eficiências foram elevadas para os menores campos elétricos, mas decaíram com 3,17 kV/cm, como detalhado na subseção 4.3.3.2. A redução das eficiências de coleta também foi observada com os demais espaçamentos de entrada avaliados.

Dobrando a velocidade do ar de 2 para 4 cm/s (Figura 31c), as eficiências fracionárias obtidas foram ainda menores, para todos os espaçamentos de entrada. Com 3,17 kV/cm (Figura 31c) o espaçamento de 1,5 cm teve o melhor desempenho, o qual melhorou progressivamente pelo restante da faixa de operação do campo elétrico.

Por fim, a velocidade de 5 cm/s foi a que mais afetou o desempenho do precipitador eletrostático, em decorrência do curto tempo de residência das partículas no interior do equipamento. Com o campo elétrico de 3,17 kV/cm (Figura 31d), a máxima eficiência de coleta foi em torno de 50% para todos os espaçamentos de entrada.

#### 4.3.4 Comparação entre 1 e 3 eletrodos de descarga

Após a discussão dos resultados com 1 e 3 eletrodos de descarga de forma individual, é possível fazer uma comparação geral entre essas 2 configurações. Os resultados com 1 eletrodo de descarga apresentaram um comportamento mais coerente e fácil de compreender, pois ao utilizar apenas 1 fio, alguns efeitos secundários são eliminados ou reduzidos (como o da blindagem elétrica). Além disso, essa configuração permitiu uma análise mais clara da variação da eficiência de coleta com a alteração do espaçamento de entrada, por não ocorrer as influências de campo elétrico observadas na configuração de múltiplos fios. Por outro lado, com 1 eletrodo de descarga foram atingidas menores correntes elétricas e, conseqüentemente, foram necessários maiores valores de campo elétrico para obter elevadas eficiências de coleta. Isso ocorreu principalmente para os espaçamentos de 1,5 e 28,5 cm.

No caso da configuração de 3 eletrodos de descarga, o precipitador eletrostático apresentou um desempenho mais eficiente no geral, por conta da maior corrente elétrica e menor tempo de carregamento necessário para que fossem alcançadas elevadas percentagens de carregamento. Para ambos os casos, os espaçamentos de entrada que promoveram os melhores e mais estáveis resultados foram aqueles em que os eletrodos estavam distribuídos na região central do precipitador eletrostático. Além disso, as eficiências de coleta alcançadas com 1 eletrodo de descarga e com o espaçamento de entrada de 15 cm se equiparam às obtidas com a configuração de 3 eletrodos de descarga. Esse resultado indica que, a depender do objetivo da aplicação do precipitador eletrostático, pode ser mais vantajoso, sob um ponto de vista econômico, utilizar apenas 1 eletrodo de descarga.

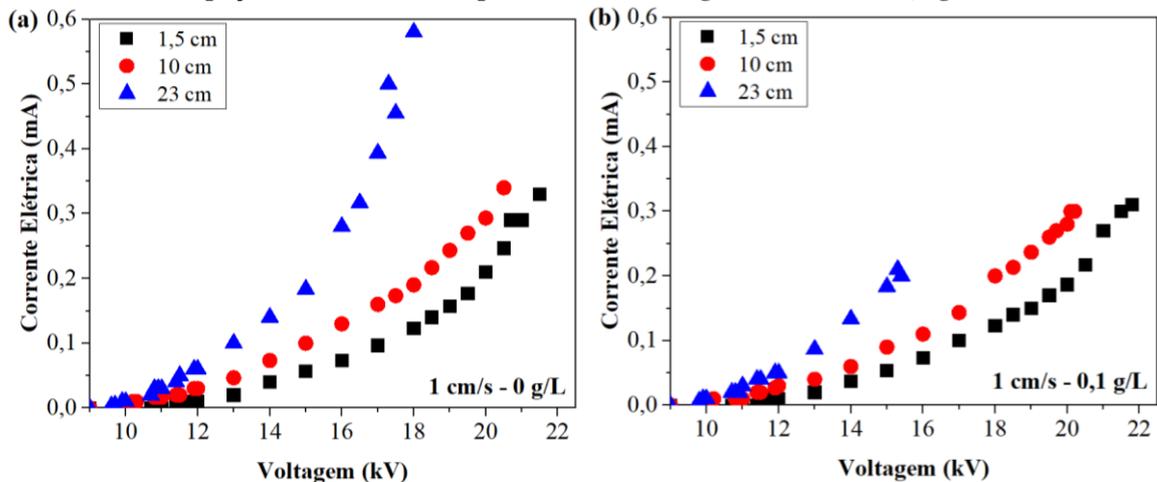
#### 4.3.5 Inclusão da Tela Coletora e 1 Eletrodo de Descarga

##### 4.3.5.1 Características Elétricas

- Curvas Corrente-tensão

As curvas corrente-tensão para a configuração com a tela coletora e 1 eletrodo de descarga, com a velocidade do ar de 1 cm/s, estão expostas na Figura 32.

**Figura 32 - Curvas corrente-tensão com a tela coletora e 1 eletrodo de descarga em função dos diferentes espaçamentos de entrada para: (a) 1 cm/s - 0 g/L e (b) 1 cm/s - 0,1 g/L.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

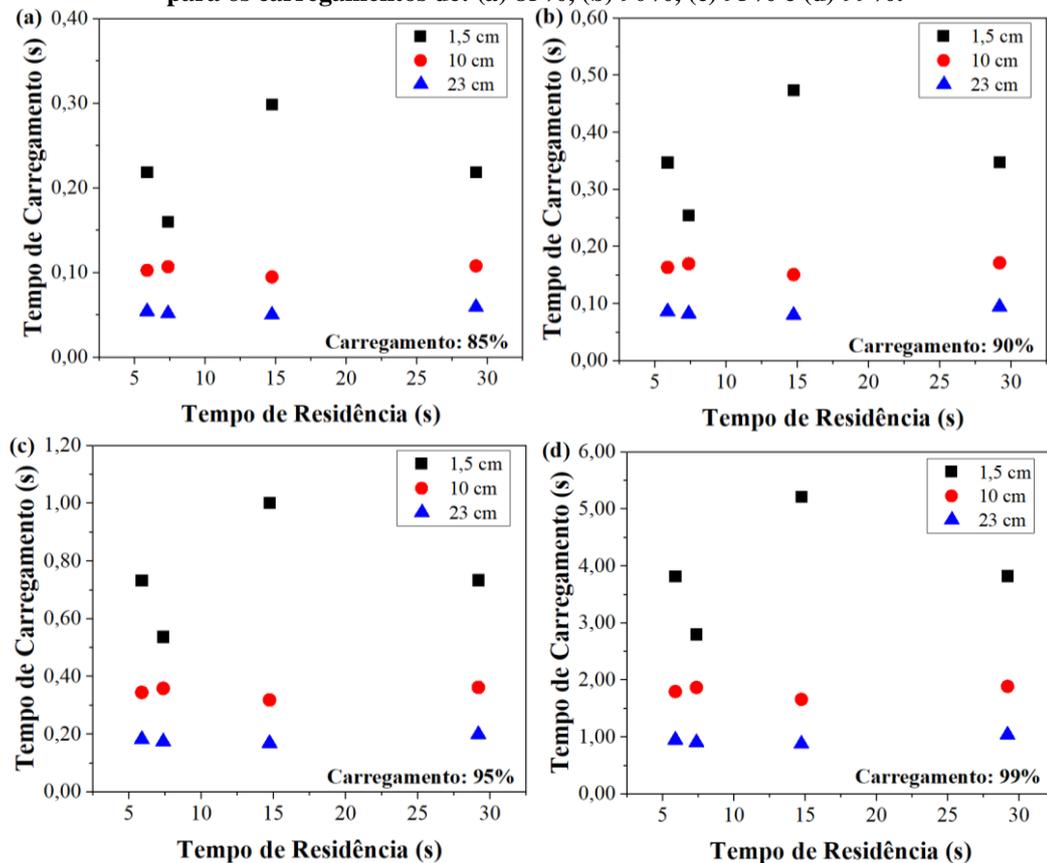
Os resultados para as outras velocidades avaliadas estão disponíveis no Apêndice B (Figura 71). Observa-se que as curvas apresentaram menores valores na ausência de partículas (Figura 32a) do que com a concentração da solução de NaCl de 0,1 g/L (Figura 32b). Além disso, foi obtido um perfil crescente para todas as três posições e as correntes elétricas alcançadas foram muito maiores para a posição de 23 cm (com diferenças de até 0,4 mA), em comparação com as demais posições. As posições de 1,5 e 10 cm apresentaram resultados mais próximos, com uma diferença em torno de 0,1 mA, mas sem se sobreporem, como aconteceu nas configurações sem a tela coletora. Logo, espera-se que a configuração de 23 cm seja a mais eficiente na posterior coleta de partículas, e que as posições de 1,5 e 10 cm apresentem desempenhos semelhantes.

- Carregamento Elétrico

Os tempos de carregamento elétrico necessários para as partículas alcançarem as percentagens da carga de saturação entre 85 e 99% podem ser visualizadas na Figura 33. Cada subfigura possui uma escala diferente no eixo y, para melhor visualização dos dados. Os resultados mostraram que o tempo de carregamento foi muito menor que o tempo de residência para todos os casos, até mesmo para um percentual de 99% de carregamento. Para realizar o carregamento das partículas até 85% (Figura 33a) e 90% (Figura 33b) é necessário um máximo de 0,5 s. Esse tempo aumentou para os carregamentos de 95% (Figura 33c) e 99% (Figura 33d), com tempos máximos de 1 e 5 s. A posição de 23 cm necessita dos menores tempos de carregamento, seguida pela posição de 10 cm, e, por fim, a posição de 1,5 cm é a que demanda os maiores tempos, com diferenças de até 4 s (Figura 33d). Logo, a inclusão da tela coletora

melhorou o carregamento elétrico, corroborando as informações obtidas através das curvas corrente-tensão (Figura 32).

**Figura 33 - Tempo de carregamento elétrico das partículas de aerossol em função do tempo de residência das partículas com a tela coletora e 1 eletrodo de descarga, para os diferentes espaçamentos de entrada, para os carregamentos de: (a) 85%, (b) 90%, (c) 95% e (d) 99%.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

#### 4.3.5.2 Comparação das Eficiências Globais Sem e Com a Presença da Tela Coletora

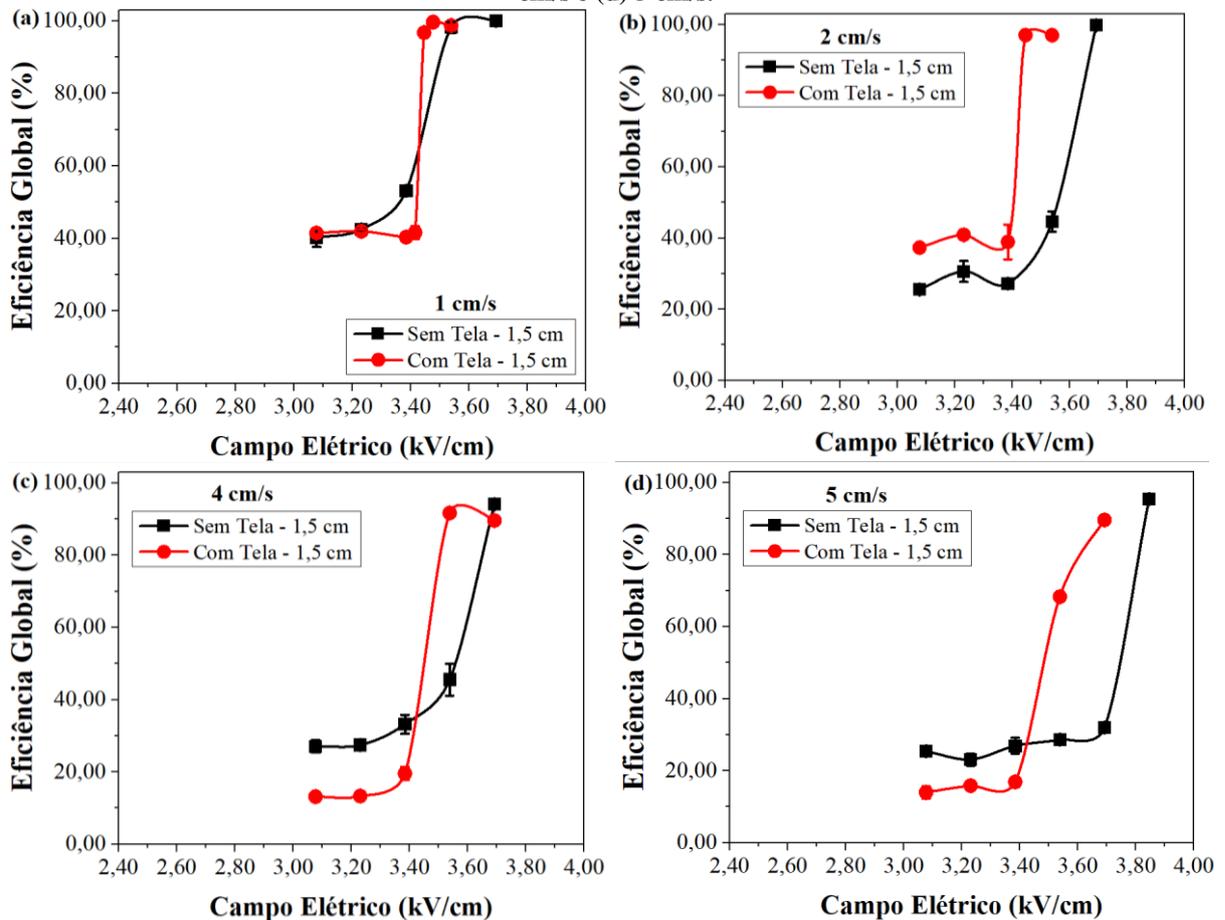
Visando avaliar melhor o efeito da tela coletora no desempenho do precipitador eletrostático, os resultados serão comparados com aqueles obtidos com 1 eletrodo de descarga na subseção 4.3.2. Por conta de limitações no precipitador eletrostático, não foi possível utilizar os mesmos espaçamentos nas configurações com e sem a tela coletora (subseção 4.3.2). Entretanto, esses são suficientemente próximos para permitir uma comparação e análise da influência da tela coletora.

- Distância de 1,5 cm

Os resultados de eficiência de coleta para a posição de 1,5 cm estão expostos na Figura 34. Como pode ser observado, para ambas as configurações (sem e com a tela coletora), foi utilizada a mesma faixa de campo elétrico, indicando que as características elétricas nos dois casos foram semelhantes.

Com a velocidade do ar de 1 cm/s (Figura 34a), as curvas com e sem a tela coletora apresentaram o mesmo perfil, com valores muito próximos e alguns pontos sobrepostos. Porém, com a presença da tela coletora o aumento de eficiência foi mais brusco entre 3,38 e 3,54 kV/cm. Além disso, com os maiores campos elétricos foi possível alcançar elevadas eficiências de coleta de partículas com ambas as configurações.

**Figura 34 - Comparação entre as eficiências de coleta, em função do campo elétrico, obtidas com os espaçamentos de 1,5 cm (sem tela) e 1,5 cm (com tela) para as velocidades de (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Ao aumentar a velocidade do ar para 2 cm/s (Figura 34b), o perfil foi muito semelhante ao obtido com a velocidade do ar de 1 cm/s, porém, com a maior velocidade ficou mais evidente o melhor desempenho do precipitador eletrostático ao utilizar a tela coletora, que pode ter melhorado o movimento difusivo das partículas no interior do equipamento. Até 3,38 kV/cm, a eficiência com a presença da tela coletora foi entre 10 – 12% superior em relação à configuração sem tela. Entretanto, com 3,54 kV/cm, a eficiência de coleta com a presença da tela coletora é 43% maior do que a configuração sem a tela coletora, indicando um melhor desempenho do precipitador eletrostático com a tela coletora, principalmente com elevados campos elétricos.

Com a velocidade do ar de 4 cm/s (Figura 34c), a eficiência de coleta com a tela coletora foi cerca de 15% menor do que a configuração sem a tela coletora, até o campo elétrico de 3,38 kV/cm. Contudo, ao aumentar o campo elétrico para 3,54 kV/cm, a eficiência de coleta com a tela coletora foi 46% maior. Desse modo, os resultados indicam que a configuração com a tela pode ser mais eficiente que sem a tela, com maiores velocidades, ao ser utilizado um campo elétrico suficientemente alto.

Com a velocidade de 5 cm/s (Figura 34d), a curva apresentou o mesmo comportamento que com a velocidade do ar de 4 cm/s, ou seja, com os menores campos elétricos, a configuração com a tela coletora foi menos eficiente. Ao aumentar o campo elétrico para 3,54 kV/cm, a configuração com a tela coletora foi 40% maior e com 3,69 kV/cm foi 56% maior, ratificando o melhor desempenho com a presença da tela coletora com maiores velocidades e campos elétricos. Esse comportamento pode estar associado ao menor tempo de residência das maiores velocidades, e consequentemente, o menor tempo para o carregamento elétrico e a posterior coleta das partículas. Logo, o aumento da área coletora com a presença da tela favorece o desempenho do equipamento sob determinadas condições.

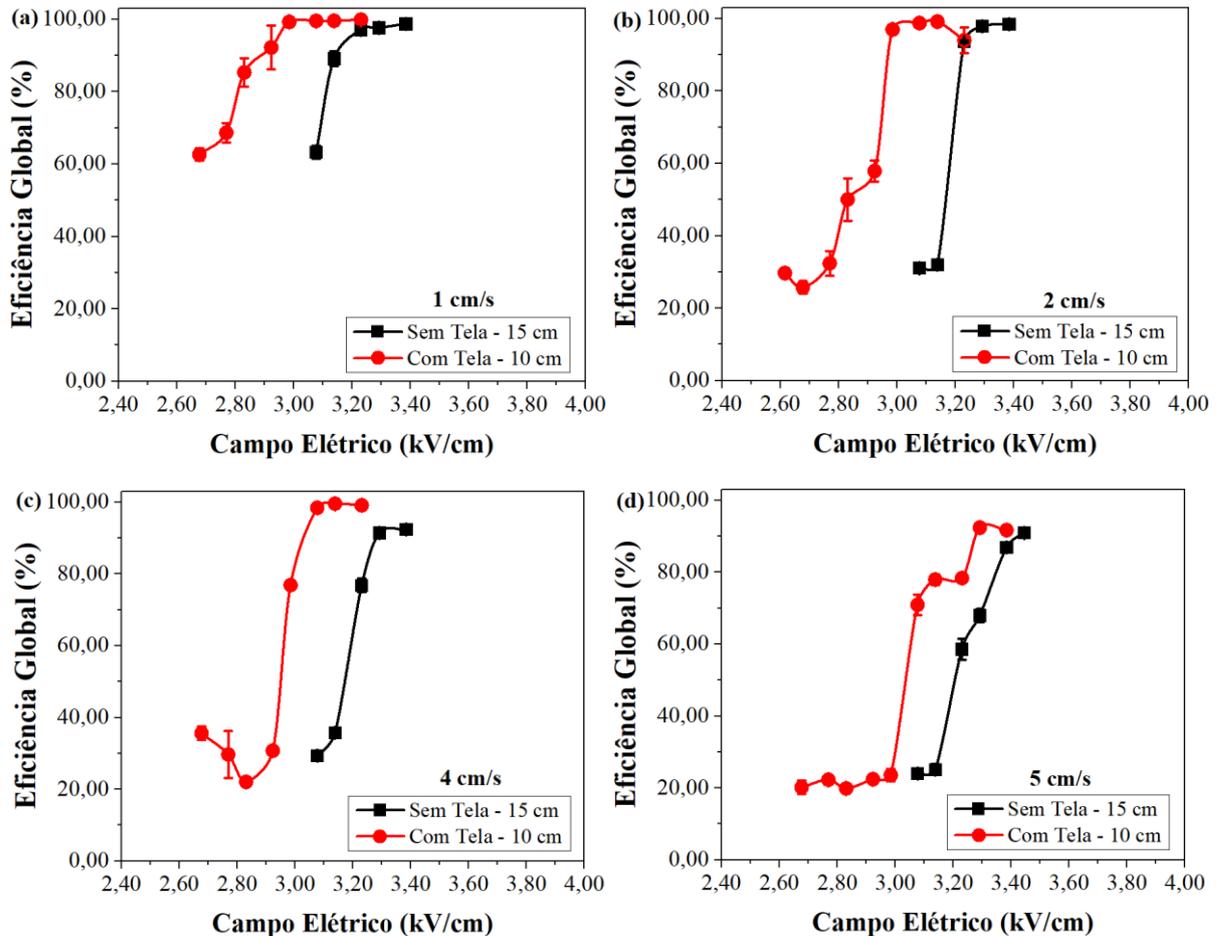
- Distância de 10 cm

As eficiências de coleta para a posição de 10 cm (Figura 35) foram mais eficientes com a presença da placa coletora, com todas as velocidades do ar utilizadas. Além disso, os comportamentos das curvas sem e com a tela coletora foram muito semelhantes. Porém, a configuração com a tela coletora necessitou de um campo elétrico menor para alcançar as eficiências obtidas com a configuração sem a tela coletora. Enquanto a configuração sem a tela utilizou os campos elétricos entre 3,08 e 3,38 kV/cm, a configuração com a tela utilizou a faixa de 2,62 a 3,38 kV/cm para obter eficiências bastante próximas. Para todos os casos, as eficiências máximas foram superiores a 90%.

Como discutido no Capítulo 4, a configuração mais eficiente foi a que o eletrodo de descarga estava localizado na região central do precipitador eletrostático (15 cm), dessa forma, ao inserir a placa coletora em uma configuração semelhante a essa, era esperado que ocorresse o aumento da eficiência de coleta.

Com a velocidade de 1 cm/s (Figura 35a), as eficiências de coleta do precipitador eletrostático com os campos elétricos de 3,08, 3,14 e 3,23 kV/cm foram 36%, 10% e 2% maiores, respectivamente, ao ser utilizado a tela coletora.

**Figura 35 - Comparação entre as eficiências de coleta, em função do campo elétrico, obtidas com os espaçamentos de 15 cm (sem tela) e 10 cm (com tela) para as velocidades de (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Para a velocidade de 2 cm/s (Figura 35b), o aumento da eficiência de coleta foi ainda maior do que com a velocidade de 1 cm/s. Ao serem aplicados os campos elétricos de 3,08 e 3,14 kV/cm as eficiências de coleta foram 57% maiores com a presença da tela. Porém, para um campo elétrico suficientemente elevado, 3,23 kV/cm, a diferença com a tela coletora foi de apenas 0,37%.

Ao aumentar a velocidade do ar para 4 cm/s (Figura 35c), foram obtidas eficiências de coleta elevadas, para a configuração com a tela coletora, entre 2,68 e 2,92 kV/cm. Para obter valores muito próximos, com a configuração sem a tela coletora, foi necessário utilizar campos elétricos entre 3,08 e 3,14 kV/cm. Os valores finais com a presença da tela coletora foram ainda maiores do que sem a tela, alcançando valores acima de 99%. Além disso, eficiências de coleta acima de 90% foram alcançadas com os campos elétricos acima de 3,29 kV/cm, sem a presença da tela coletora, e acima de 3,08 kV/cm, com a tela coletora.

Ao utilizar a velocidade do ar de 5 cm/s (Figura 35d), as eficiências de coleta foram semelhantes entre si para os menores campos elétricos, com a maior diferença ocorrendo com o valor do campo elétrico de 3,08 kV/cm. Com esse valor, a eficiência de coleta foi 46% maior ao utilizar a tela coletora. Aumentando o campo elétrico, a diferença das eficiências obtidas com ambas as configurações foi entre 5 e 10%, e a eficiência máxima obtida foi praticamente a mesma, para a faixa de campo elétrico avaliada.

- Distância de 23 cm

Os resultados para a posição de 23 cm podem ser visualizados na Figura 36. Analisando as eficiências de maneira geral, a configuração com a tela coletora foi bem mais eficiente do que sem a tela. Isso pode ter ocorrido por essa distância ter um carregamento elétrico e uma coleta de partículas mais prejudicada, principalmente quando associada à elevadas velocidades do ar. Dessa forma, a inclusão de uma outra superfície coletora tende a favorecer a coleta de partículas, além de permitir a passagem das partículas através do superfície de coleta.

Com a velocidade do ar de 1 cm/s (Figura 36a), os valores foram próximos entre si, porém, para obter valores muito semelhantes, com a configuração com a tela foi utilizado o campo elétrico entre 2,46 e 3,08 kV/cm e a configuração sem tela é entre 3,08 e 3,69 kV/cm. Ao ser aplicado o campo elétrico de 3,08 kV/cm, a eficiência de coleta foi 43% maior para a configuração com a tela coletora.

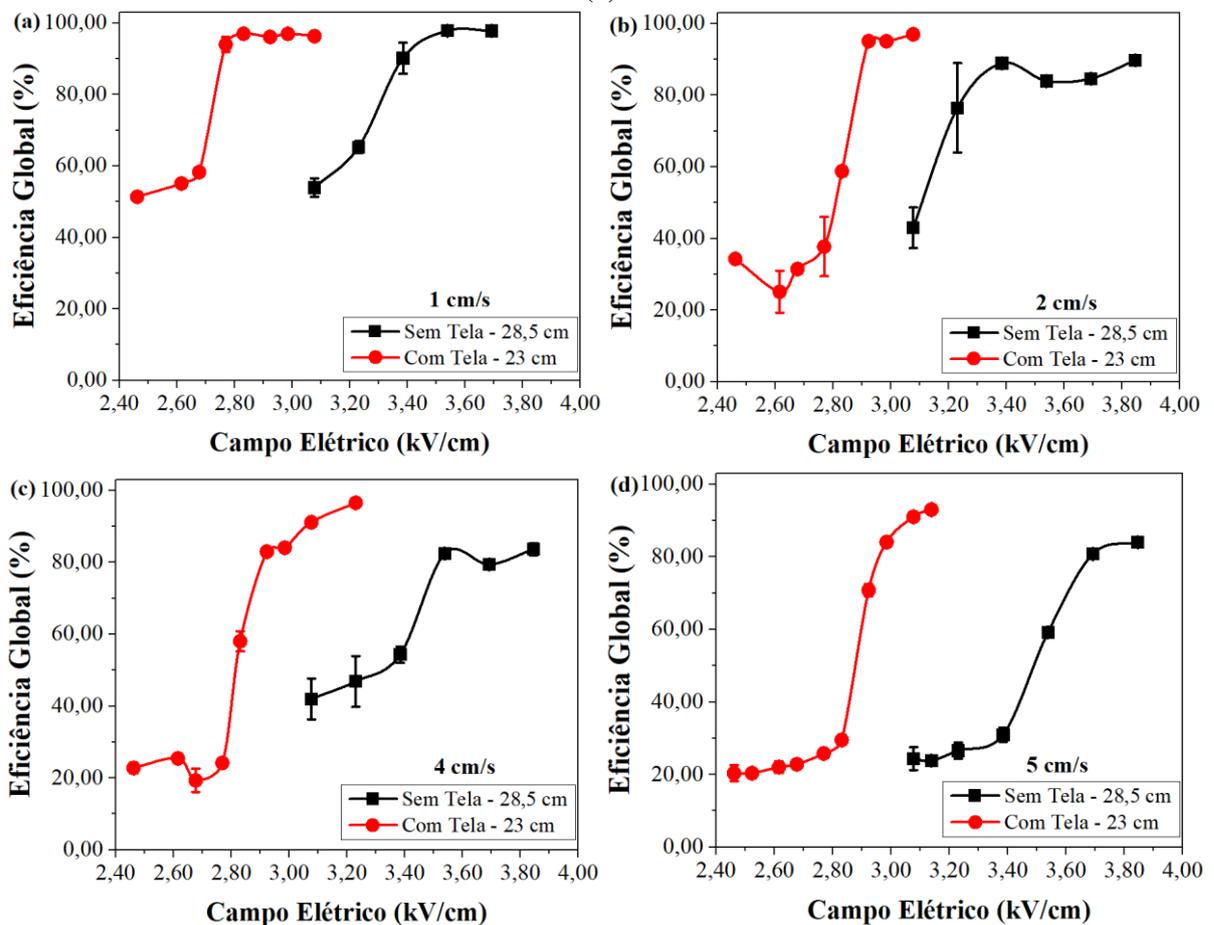
Com a velocidade de 2 cm/s (Figura 36b), as curvas também apresentaram um comportamento semelhante e com o campo elétrico de 3,08 kV/cm, a eficiência foi 54% maior do que sem a tela coletora.

Ao aumentar a velocidade do ar para 4 cm/s (Figura 36c), o comportamento da curva foi diferente. Além disso, foi necessária uma maior faixa de campo elétrico para alcançar elevadas eficiências de coleta. Com a presença da tela coletora, o campo elétrico foi até 3,23 kV/cm, enquanto sem a tela foi até 3,85 kV/cm. Para o campo elétrico de 3,08 kV/cm, o valor da eficiência foi 39% maior com a tela coletora, e com o campo elétrico de 3,23 kV/cm foi 50% maior.

Para a velocidade do ar de 5 cm/s (Figura 36d), o comportamento das curvas foi muito parecido, porém, para o campo elétrico de 3,08 kV/cm, foi 67% maior com a presença da tela coletora, e com 3,24 kV/cm foi 70% maior.

A análise desses resultados indica que a posição do eletrodo de coleta na região final do precipitador eletrostático foi a que mais se beneficiou da inserção da tela coletora, uma vez que apresentou as melhores eficiências de coleta e o maior aumento em comparação com a configuração sem a tela coletora. É importante ressaltar que as distâncias analisadas apresentam uma diferença de cerca de 5 cm, que contribui para um melhor carregamento na configuração com a tela coletora. Mesmo assim, um aumento tão significativo da eficiência provavelmente está atrelado a outros fatores, ou seja, o aumento da região de coleta com a adição da tela.

**Figura 36 - Comparação entre as eficiências de coleta, em função do campo elétrico, obtidas com os espaçamentos de 28,5 cm (sem tela) e 23 cm (com tela) para as velocidades de (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

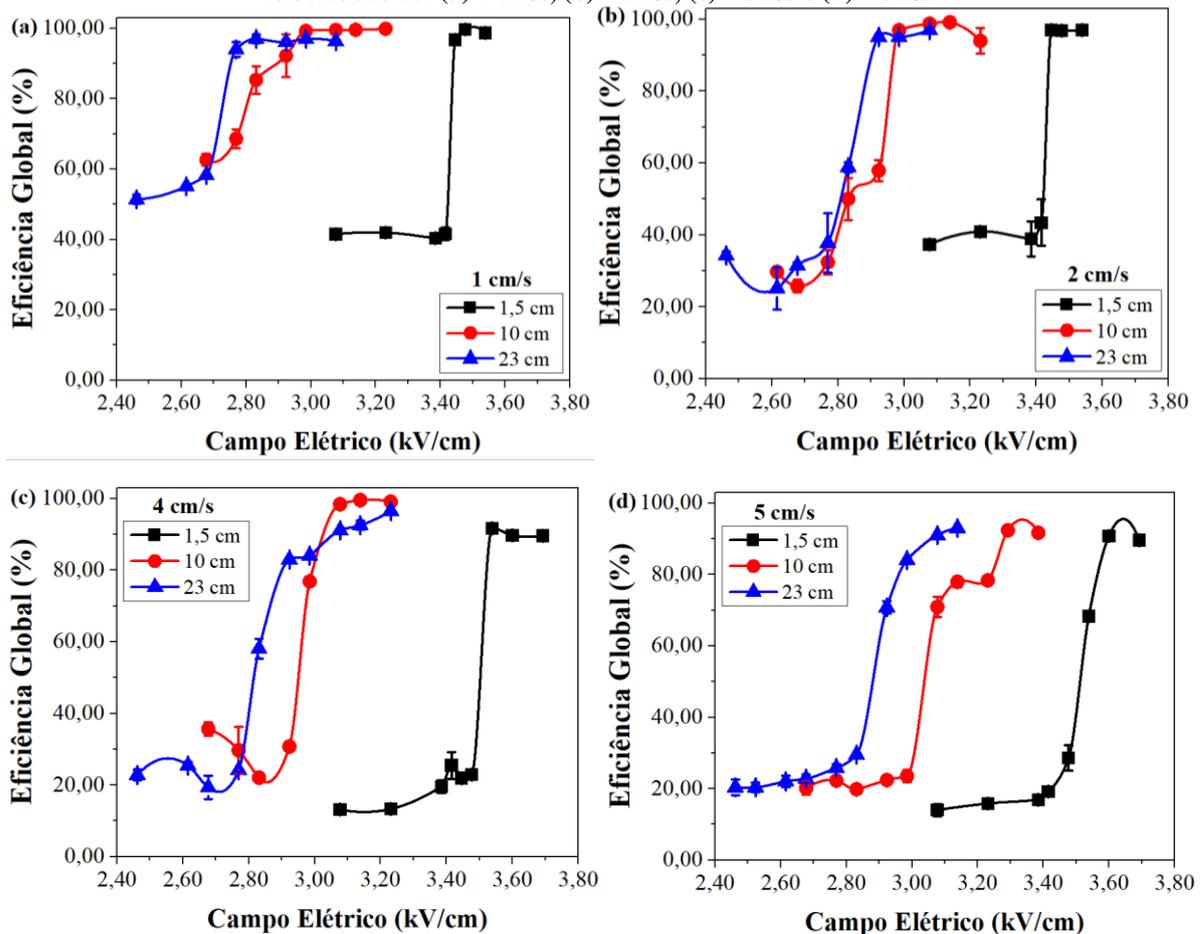
#### 4.3.5.3 Influência da Distância

As eficiências globais para a configuração com a presença da tela coletora para as 3 distâncias avaliadas, e com as 3 velocidades do ar aplicadas, estão expostas na Figura 37. Para todas as velocidades do ar aplicadas, a distância de 1,5 cm foi a menos eficiente, enquanto as distâncias de 10 e 23 cm apresentaram valores relativamente próximos, devido ao melhor

carregamento elétrico das partículas. Isso é claramente observado pela faixa de campo elétrico aplicada, para obter valores elevados de eficiência, a distância de 1,5 cm precisou utilizar campos elétricos entre 3,08 e 3,69 kV/cm, enquanto para as distâncias de 10 e 23 cm, foram utilizados campos elétricos entre 2,46 e 3,38 kV/cm. Além disso, a menor distância teve um aumento muito brusco de eficiência ao aumentar o campo elétrico de 3,42 para 3,45 kV/cm (1 e 2 cm/s) ou de 3,48 para 3,54 kV/cm (4 e 5 cm/s).

Com a velocidade de 1 cm/s (Figura 37a), o perfil da curva foi muito semelhante e a maior diferença dos valores de eficiência ocorreu na faixa inicial de campo elétrico, sendo entre 10 e 13%. Com 2,83 kV/cm, a distância de 23 cm foi 27% mais eficiente que a de 10 cm, mas acima desse campo elétrico, as eficiências foram praticamente iguais. Entretanto, com 1,5 cm, as diferenças em relação às outras configurações foram de até 50%.

**Figura 37 - Eficiências globais com 1 eletrodo de descarga (com tela) para diferentes espaçamentos com as velocidades de: (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Um comportamento bem semelhante ocorreu com a velocidade de 2 cm/s (Figura 37b), e as curvas com 10 e 23 cm foram praticamente sobrepostas com essa velocidade. Essas

configurações sofreram uma queda de eficiência de até 36% por conta da redução do tempo de residência das partículas no interior do precipitador eletrostático. A configuração de 1,5 cm não teve uma mudança significativa dos valores com o aumento da velocidade do ar, mas a eficiência com 3,08 kV/cm foi cerca de 50% menor em relação às demais configurações.

O aumento da velocidade para 4 cm/s (Figura 37c) resultou em uma oscilação na eficiência de coleta de partículas na faixa inicial do campo elétrico para as distâncias de 1,5 e 10 cm. Esse comportamento provavelmente está associado à redução do tempo de residência das partículas no interior do equipamento juntamente com os baixos valores de campo elétrico aplicados. Nesse caso, houve uma diferença de eficiência de coleta de até 52%, para o campo elétrico de 2,92 kV/cm. Comparando com a configuração de 1,5 cm, as maiores distâncias foram até 86% mais eficientes, com os campos elétricos entre 3,08 e 3,23 kV/cm. Além disso, a menor distância teve sua eficiência de coleta reduzida na faixa de campo elétrico inicial.

Com a velocidade de 5 cm/s (Figura 37d), as 3 curvas apresentaram um perfil muito parecido, mas é evidente que a distância de 23 cm foi a que alcançou uma maior eficiência de coleta com menores valores de campos elétricos do que as demais distâncias. Com o campo elétrico de 2,98 kV/cm, a configuração de 23 cm foi 70% mais eficiente do que a configuração de 10 cm. Para o campo elétrico de 3,08 kV/cm, a distância de 1,5 cm foi 57% menos eficiente que a de 10 cm e 77% menos eficiente que a de 23 cm.

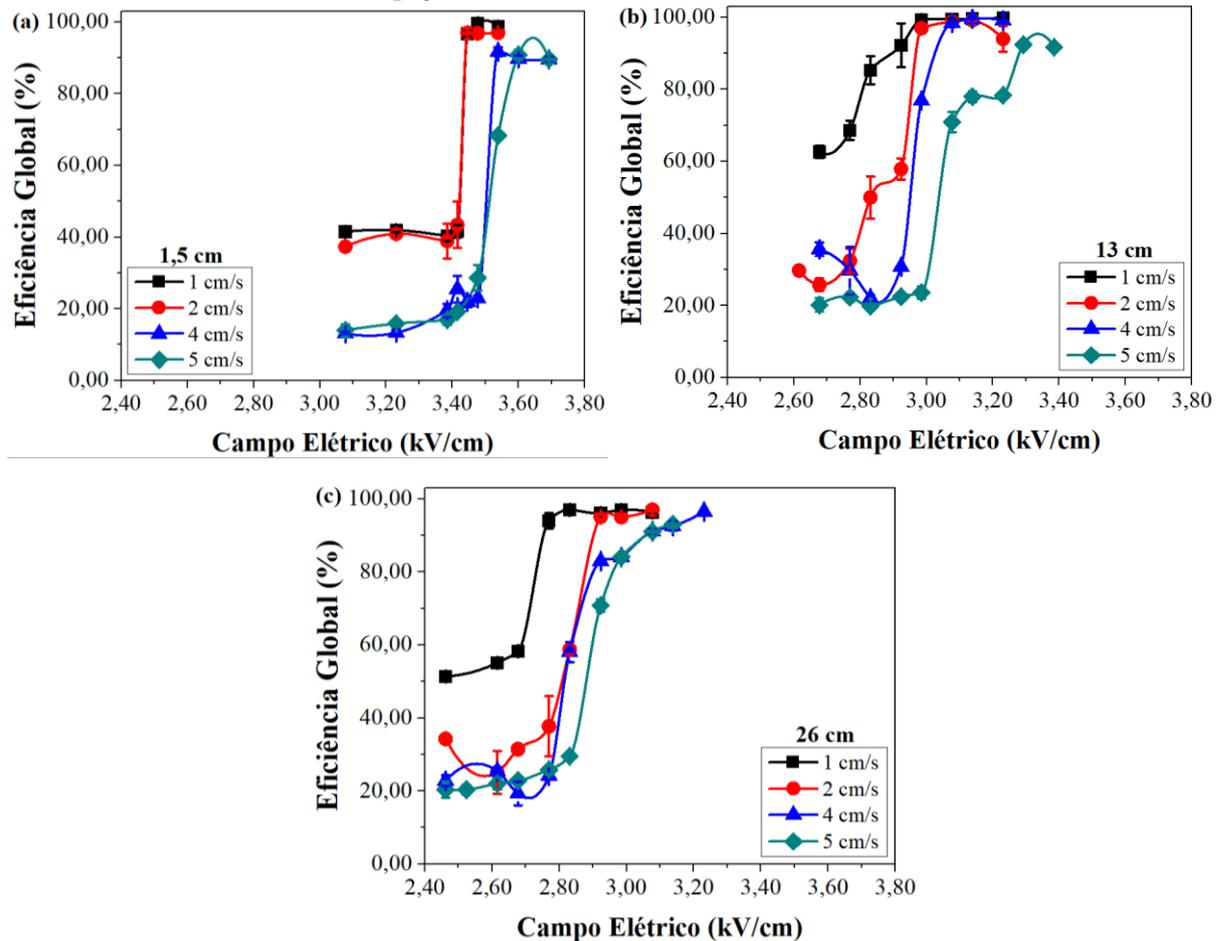
#### 4.3.5.4 Influência da Velocidade do Ar

Uma outra forma interessante de analisar esses dados é através da comparação direta dos resultados com cada uma das distâncias, para as diferentes velocidades do ar (Figura 38). Através desses gráficos, é possível visualizar mais claramente os comportamentos descritos anteriormente. A configuração de 1,5 cm (Figura 38a) é menos eficiente, especialmente com as maiores velocidades do ar, e necessita de maiores campos elétricos para alcançar as elevadas eficiências de coleta. Porém, as eficiências não sofreram um impacto tão significativo da velocidade do ar com os maiores campos elétricos, apresentando resultados bem semelhantes com as velocidades de 1 e 2 cm/s e com 4 e 5 cm/s.

Com a distância de 10 cm (Figura 38b), o aumento da velocidade do ar teve um efeito considerável nos resultados, e o precipitador eletrostático foi mais eficiente quanto menor a velocidade utilizada. Além disso, o aumento da velocidade também demandou a aplicação de uma faixa de campo elétrico um pouco mais extensa, a fim de alcançar as eficiências de coleta próxima a 90%.

Por fim, a distância de 23 cm (Figura 38c) foi a mais eficiente, além de necessitar de menores campos elétricos, as eficiências de coleta não diminuíram tanto com o aumento da velocidade do ar. A maior diferença foi em relação à velocidade de 1 cm/s, mas, os resultados com as velocidades entre 2 e 5 cm/s foram semelhantes.

**Figura 38 - Eficiências globais com 1 eletrodo de descarga (com tela) para diferentes velocidades do ar com os espaçamentos de: (a) 1,5 cm, (b) 10 cm e (c) 23 cm.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

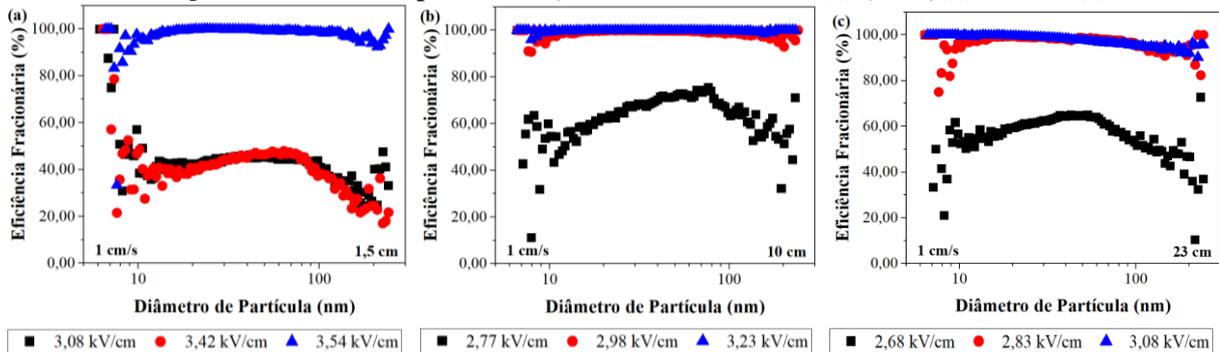
#### 4.3.5.5 Eficiência Fracionárias com a Tela Coletora

- Influência do Campo Elétrico

As eficiências fracionárias com a presença da tela coletora para a velocidade de 1 cm/s, com as 3 distâncias avaliadas podem ser visualizadas na Figura 39. Como para cada uma das distâncias foi utilizada uma faixa de campo elétrico diferente, foram selecionados os campos elétricos nos quais esse parâmetro teve mais influência. Os respectivos campos elétricos para cada uma das distâncias estão localizados na legenda para cada uma das distâncias. Como as

curvas apresentaram um perfil semelhante, serão exibidos os dados obtidos com a velocidade de 1 cm/s e os resultados com as demais velocidades avaliadas, para cada uma das distâncias, podem ser consultados no Apêndice C (Figura 80 - Figura 82).

**Figura 39 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga (com tela) e com a velocidade do ar de 1 cm/s para diferentes campos elétricos, com as distâncias de: (a) 1,5 cm, (b) 10 cm e (c) 23 cm.**



Para a distância de 1,5 cm (Figura 39a), os campos elétricos de 3,08 e 3,42 kV/cm apresentaram praticamente a mesma eficiência de coleta, mas ocorreu um aumento de cerca de 60% ao aumentar esse parâmetro para 3,54 kV/cm.

Para a distância de 10 cm (Figura 39b), a eficiência com o campo elétrico de 2,77 kV/cm foi a mais baixa, com um máximo de 70%, mas para os campos elétricos de 2,98 e 3,23 kV/cm as eficiências foram maiores que 95%. A eficiência de coleta com o campo elétrico de 3,23 kV/cm foi afetada e apresentou reduções na coleta de partículas maiores, mas ainda assim conseguiu manter uma elevada eficiência de coleta com quase todas as velocidades.

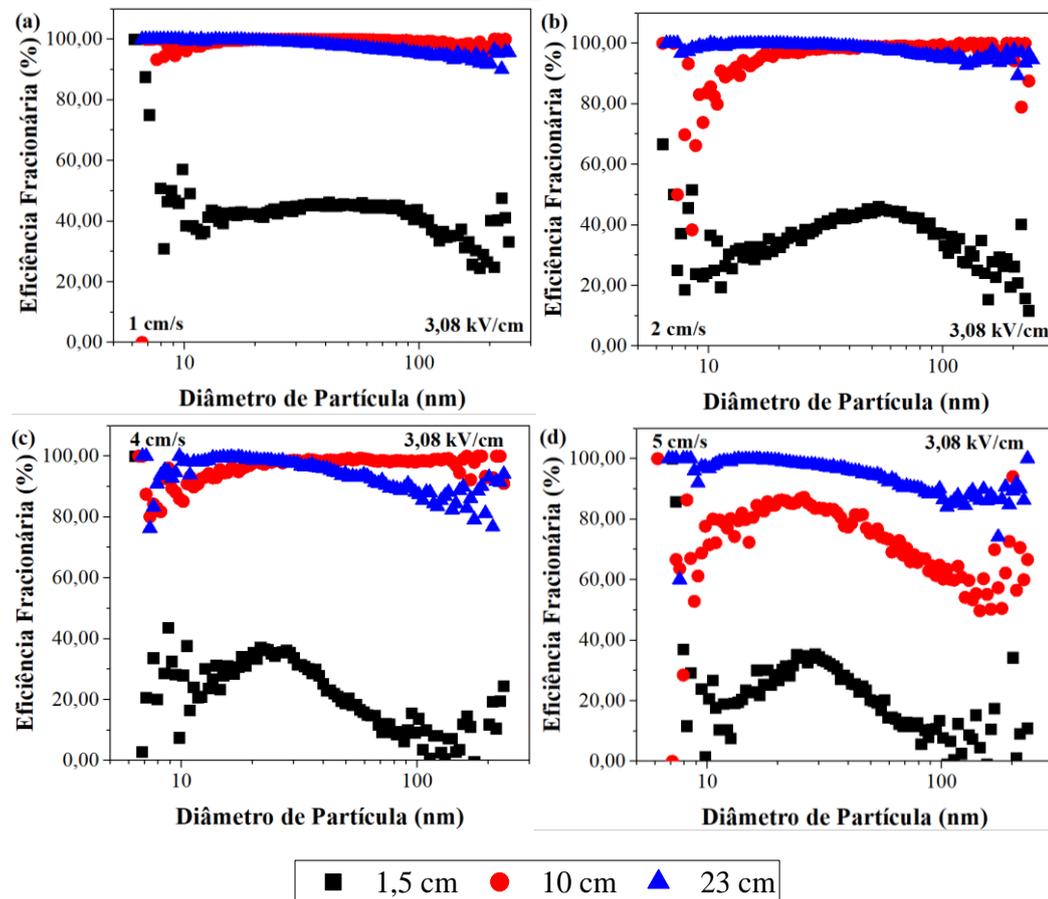
Com a distância de 23 cm (Figura 39c), o campo elétrico de 2,68 kV/cm não apresentou uma elevada eficiência de coleta para todas as velocidades avaliadas. O campo elétrico de 3,08 kV/cm sofreu uma leve redução na coleta de partículas para diâmetros de partículas maiores que 70 nm.

- **Influência da Velocidade do Ar**

Para avaliar o efeito da velocidade do ar nos resultados foi selecionado o campo elétrico de 3,08 kV/cm, por ter sido utilizada essa condição para todas as distâncias e velocidades avaliadas. Pela Figura 40 observa-se que o aumento da velocidade do ar reduziu a eficiência de coleta para a distância de 1,5 cm de forma mais evidente nas regiões finais e iniciais da curva. Com as distâncias de 10 e 23 cm, o aumento da velocidade para 2 cm/s (Figura 40b) e 4 cm/s (Figura 40c) teve pouca influência nos resultados, indicando que essas configurações podem

reduzir o efeito negativo da velocidade, mas um aumento ainda maior para 5 cm/s (Figura 40d) reduziu em até 40% a coleta de partículas com a distância de 10 cm.

**Figura 40 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga (com tela) e com o campo elétrico de 3,08 kV/cm, em função das distâncias, com as velocidades do ar: (a) 1 cm/s, (b) 2 cm/s, (c) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

#### 4.4 Considerações Finais

O desempenho do precipitador eletrostático é influenciado diretamente pelas condições operacionais e parâmetros geométricos utilizados. O presente capítulo avaliou o impacto da variação do espaçamento de entrada, entre a entrada do duto do precipitador eletrostático e o primeiro eletrodo de descarga, na eficiência de coleta de partículas. Também foram realizados experimentos com 1 e 3 eletrodos de descarga, para diversas velocidades do ar e campos elétricos. Posteriormente, avaliou-se se o aumento da área de coleta, através da inserção de uma tela coletora em contato direto com o aerossol que percorre o interior do precipitador eletrostático, teve um efeito positivo na eficiência de coleta.

Comparando os resultados com 1 e 3 eletrodos de descarga, foi observado que a configuração de 3 eletrodos obteve um desempenho mais eficiente na coleta de nanopartículas, mas os resultados com a configuração de 1 eletrodo conseguiram se equiparar à configuração de 3 eletrodos ao utilizar o espaçamento de 15 cm. Esse resultado pode ser atribuído à distribuição mais uniforme do campo elétrico com o eletrodo de descarga posicionado na região central do precipitador eletrostático.

Para a configuração de 1 eletrodo de descarga, o espaçamento de entrada de 1,5 cm apresentou o pior desempenho, provavelmente associado a um carregamento elétrico pouco eficiente e um maior descarregamento das partículas. Ainda assim, foram obtidas elevadas eficiências de coleta para os campos elétricos acima de 3,6 kV/cm. Em contrapartida, o espaçamento de entrada de 15 cm foi o mais eficiente, uma vez que o carregamento elétrico e coleta das partículas foi mais uniforme e não demandou campos elétricos tão elevados. O espaçamento de 28,5 cm conseguiu obter resultados de eficiência de coleta razoáveis quando utilizadas as velocidades de 1 e 2 cm/s. Para as velocidades de 4 e 5 cm/s, essas eficiências foram alcançadas para campos elétricos maiores a 3,54 kV/cm. Além disso, o efeito do aumento da velocidade e redução do tempo de residência na redução de eficiência de coleta foi evidente para todos os espaçamentos.

Para a configuração de 3 eletrodos de descarga, os resultados indicaram que não ocorreu uma variação linear entre o espaçamento de entrada e a eficiência de coleta de partículas. Cada espaçamento apresentou uma condição ótima de operação de acordo com a velocidade do ar e campos elétricos utilizados. Entretanto, alguns espaçamentos se destacaram pelo bom desempenho na maior parte das condições testadas, como os de 7,5 e 10,5 cm. Mas os espaçamentos de 1,5 e 13,5 cm também atingiram elevadas eficiências de coleta principalmente com campos elétricos superiores a 3,23 kV/cm. Apenas o espaçamento de 4,5 cm apresentou a menor eficiência de coleta na maior parte das condições avaliadas. Esses resultados evidenciam que a distribuição dos eletrodos de descarga no interior do precipitador eletrostático afeta de forma significativa as linhas do campo elétrico gerado. Essa conclusão é reforçada pelo desempenho obtido com o espaçamento de 4,5 cm. Os espaçamentos de 1,5 e 4,5 cm apresentaram as curvas corrente-tensão praticamente iguais nos testes realizados. Dessa forma, era esperado que os resultados de eficiência também fossem bastante semelhantes, o que não ocorreu, confirmando novamente a influência do espaçamento de entrada e do tempo de carregamento das partículas.

Os resultados com a presença da tela coletora foram comparados com os da configuração de 1 eletrodo de descarga, onde foram utilizadas distâncias relativamente próximas das avaliadas com a tela. Através dos resultados foi possível constatar que não apenas houve o aumento de até 70% na eficiência de coleta com a inserção da tela coletora, como também esse aumento foi mais expressivo na região final do duto do precipitador eletrostático. As demais distâncias também alcançaram elevados valores de eficiência de coleta, mas precisaram de uma faixa mais ampla de campo elétrico.

Esses resultados permitem a abordagem do estudo da geometria do precipitador eletrostático sob uma nova perspectiva, com a avaliação de novos parâmetros e configurações. Além da modificação da posição dos eletrodos de descarga, também é possível adicionar um eletrodo de coleta em uma posição não convencional e favorecer a coleta de nanopartículas. Dependendo da aplicação desejada, pode ser mais vantajoso adicionar uma tela coletora do que incluir eletrodos de descarga ou até mesmo modificar a disposição desses no interior do equipamento. Entretanto, para aplicações que utilizam partículas maiores, como na faixa de tamanho micrométrica, deve ser considerada a deposição das partículas na superfície da tela coletora.

## **CAPÍTULO 5 – PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO DE DUPLO ESTÁGIO**

### **5.1 Introdução**

O estudo do presente capítulo é voltado para um precipitador eletrostático de duplo estágio, formado por um ionizador e um coletor. O objetivo é avaliar o desempenho desse equipamento ao separar as etapas de ionização e coleta de partículas. Para isso, essa investigação foi conduzida em 3 etapas. A primeira e a segunda etapas avaliaram a influência das voltagens na eficiência de coleta, sendo a primeira etapa realizada com a variação da voltagem do coletor, mantendo a voltagem do ionizador constante, e a segunda etapa variando a voltagem do ionizador com a voltagem do coletor constante. Por fim, a terceira etapa investigou se o aumento da distância entre o ionizador e o coletor afetam o desempenho do precipitador eletrostático. Em todas essas etapas, foram medidas as concentrações de ozônio geradas pelo processo de ionização das partículas.

### **5.2 Metodologia**

Os experimentos realizados nesse capítulo foram desenvolvidos durante o período de Doutorado Sanduíche Capes PrInt, no Locie - Laboratoire procédés énergie bâtiment, localizado na Université Savoie Mont Blanc (Campus Le-Bourget-du-Lac), na França. Esse estudo foi supervisionado pelos professores Evelyne Gonze e Michel Ondarts.

Por ter sido desenvolvido em outro laboratório, a unidade e o procedimento experimental utilizados para o estudo desenvolvido nesse capítulo diferem bastante dos descritos nos Capítulos 4 e 5. Por isso, a metodologia desse capítulo está bastante detalhada, a fim de fornecer todas as informações necessárias para compreender os resultados.

#### **5.2.1 Unidade Experimental**

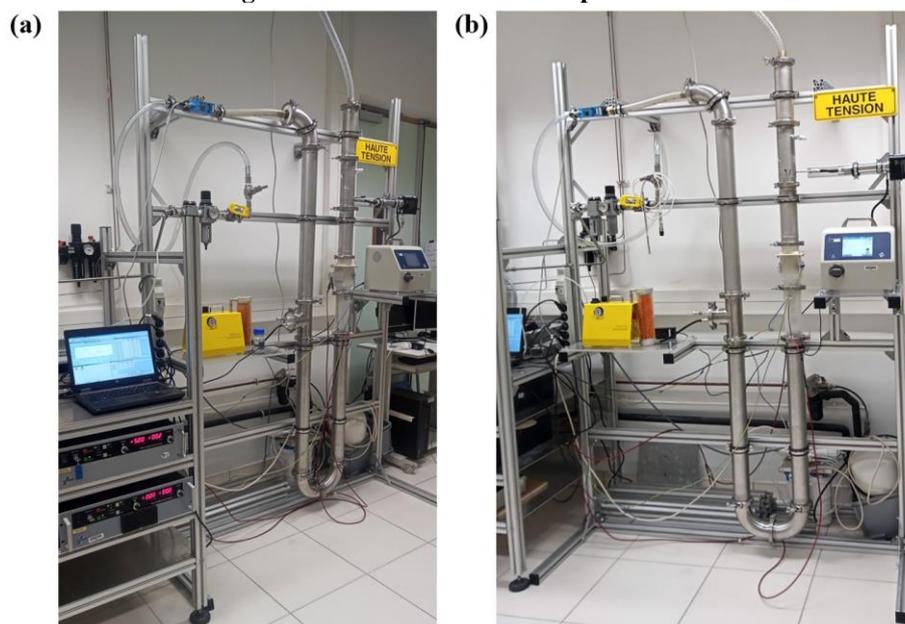
A unidade experimental utilizada para a realização dos experimentos pode ser visualizada na Figura 41 e uma representação mais detalhada dos equipamentos e do ionizador e coletor estão na Figura 42. Diversos testes preliminares foram realizados até a escolha da configuração final e das condições operacionais, que serão descritas no subtópico 5.2.2. A seguir, são detalhados os equipamentos que compõem a unidade experimental.

Primeiramente, o ar comprimido entra na unidade experimental com uma pressão de 3 bar e segue pela tubulação até o ponto de injeção de partículas. Nesse ponto, está conectado em paralelo um atomizador de aerossol (modelo ATM 220, TOPAS), no qual é inserida uma

solução de NaCl 5 g/L, operando com pressão de 1 bar e a o fluxo volumétrico correspondente de 8 L/h. É importante destacar que foi utilizada uma solução de NaCl mais concentrada do que aquela utilizada no estudo do Capítulo 4. Isso ocorreu porque nos experimentos do presente capítulo foram utilizadas velocidades do ar mais altas, que iriam diluir muito o aerossol, dificultando a execução dos experimentos. Em seguida, o fluxo de ar e de aerossol se unem e seguem pela tubulação, passando pelo precipitador eletrostático. Como é utilizada a configuração de duplo estágio, o aerossol passa primeiro pelo ionizador e em seguida pelo coletor, conectados a duas fontes de alta tensão (TECHNIX), sendo a fonte com tensão negativa conectada ao ionizador e a fonte com tensão positiva conectada ao coletor. O ionizador é responsável pela ionização do ar e das partículas, que são coletadas pelo coletor.

Após passar pelo coletor, o aerossol segue para um neutralizador (modelo 3088, TSI) para neutralizar as cargas adquiridas no interior do precipitador eletrostático e a concentração de partículas é medida com o NanoScan SMPS (modelo 3910, TSI). Além disso, alguns dispositivos são utilizados para medir diferentes parâmetros durante os experimentos. Para medir o fluxo de aerossol, a concentração de ozônio e o número de íons, são utilizados, respectivamente, um medidor de vazão (modelo SteelMass 640S, SIERRA), um analisador de ozônio (modelo O342e, ENVEA) e um eletrômetro de aerossol (modelo Charme, PALAS).

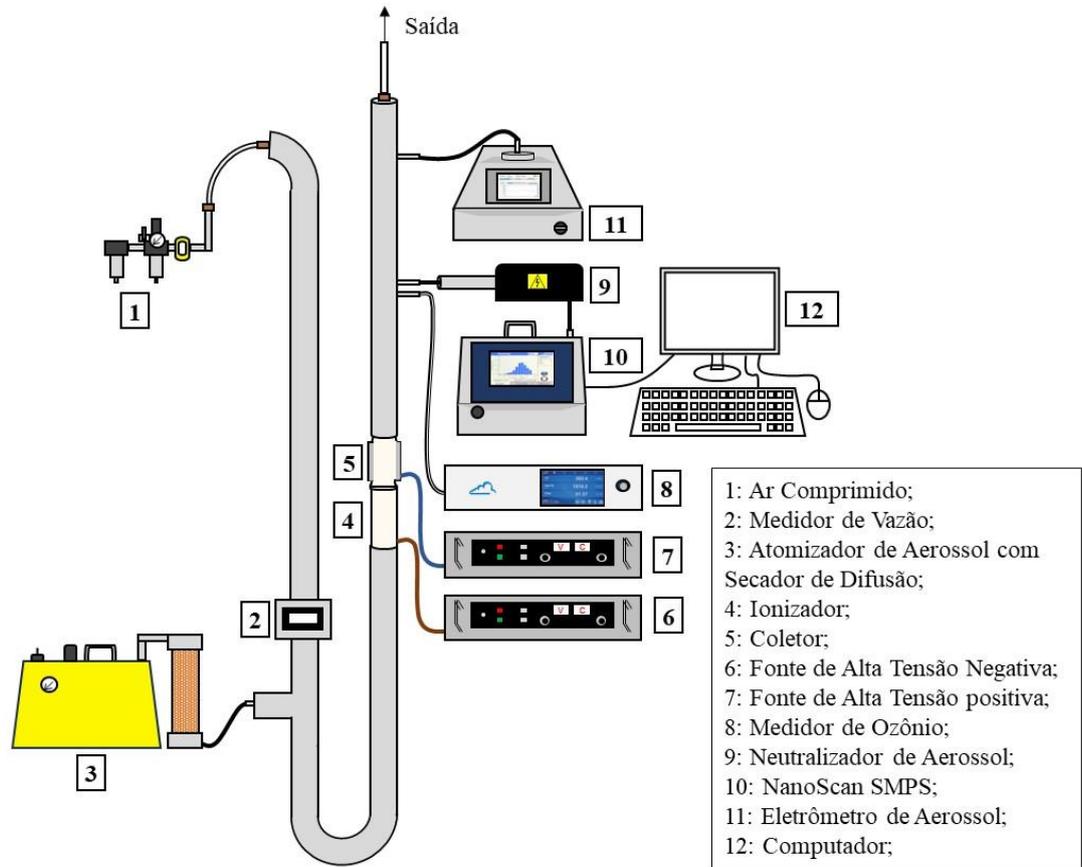
**Figura 41 - Fotos da unidade experimental.**



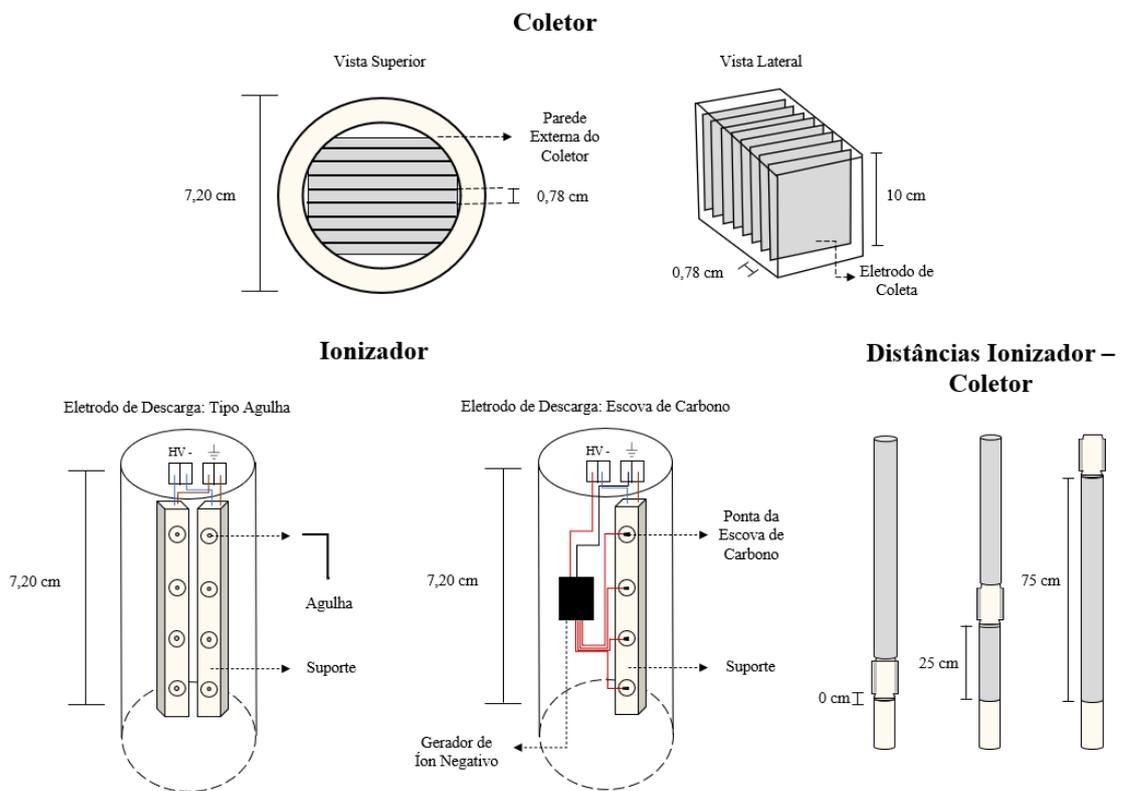
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 42 - Representação da unidade experimental contendo o precipitador eletrostático de dois estágios.

(a)



(b)

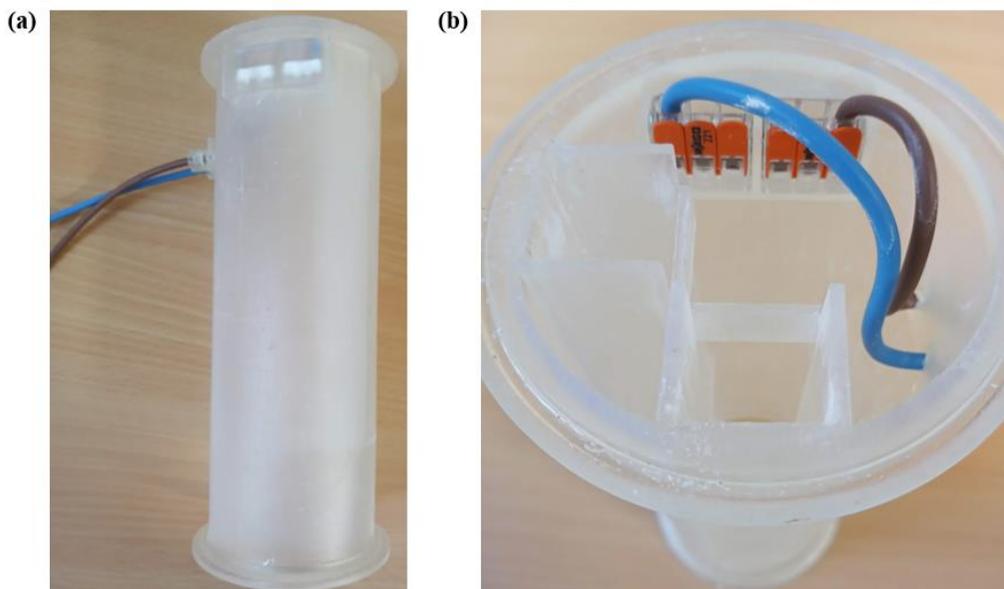


### 5.2.2 Precipitador Eletrostático e Procedimento Experimental

Os experimentos foram realizados em um precipitador eletrostático de duplo estágio, contendo um ionizador e um coletor, impressos em uma impressora 3D.

O ionizador possui duas estruturas para posterior inserção dos eletrodos de descarga e é conectado aos cabos de alta tensão e aterrado, como exibido na Figura 43. O ionizador foi operado com duas configurações, utilizando os eletrodos de descarga do tipo agulha e do tipo escova de carbono (exibidos posteriormente na Figura 45). Para a inserção dos eletrodos de descarga, são utilizados dois suportes, cada um com capacidade para 4 eletrodos de descarga. Assim, o ionizador contém um total 8 eletrodos de descarga, do tipo agulha, carregados negativamente (Figura 44). Por outro lado, foi utilizado um suporte para inserir um Gerador de Íons Negativos com quatro pontas de escova de carbono. Para garantir que não ocorreriam arcos elétricos no interior do ionizador, as áreas externas das peças suportes foram revestidas com fita de alumínio *scotch* (Figura 45) e posteriormente inseridas na estrutura do ionizador e conectadas eletricamente (Figura 46). A tubulação da unidade experimental e o ionizador possuem 9 cm de diâmetro externo e 7 cm de diâmetro interno. Além disso, o ionizador possui 15 cm de altura.

**Figura 43 - Ionizador sem os eletrodos de descarga: (a) vista lateral e (b) vista superior.**



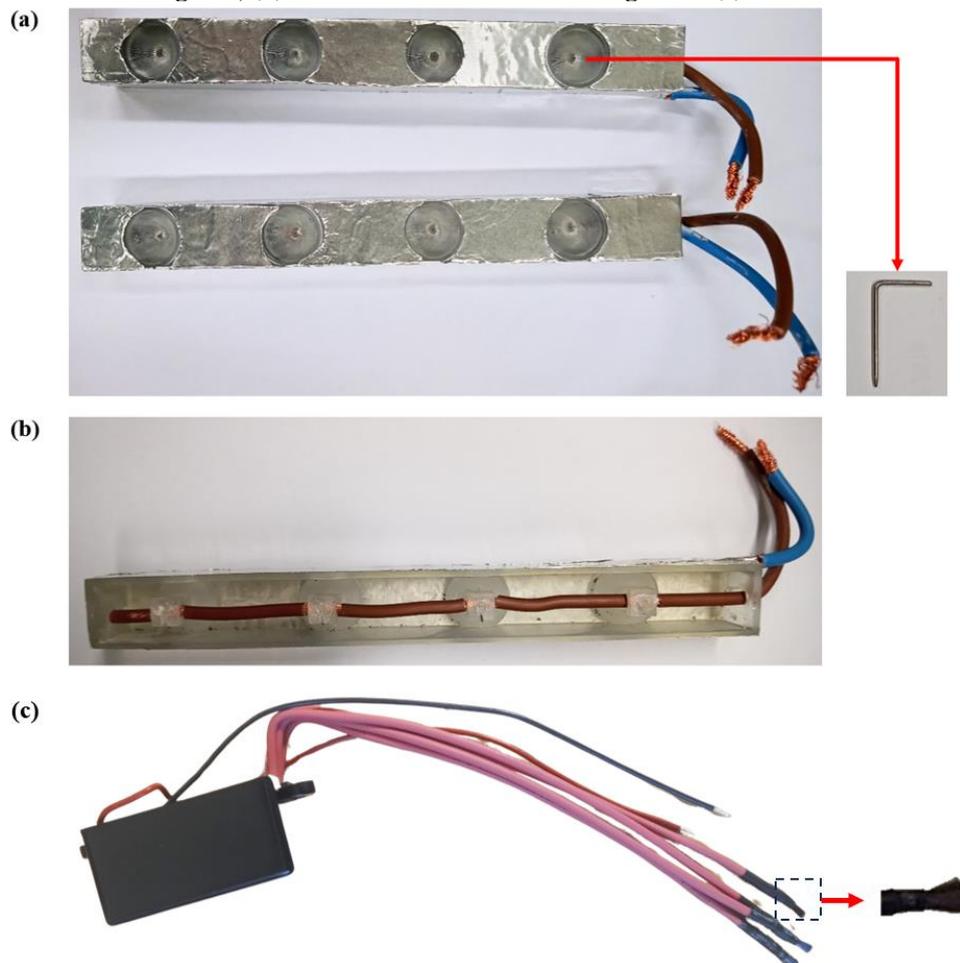
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

**Figura 44 - Peça suporte para os eletrodos de descarga: (a) vista frontal e (b) vista traseira (com os eletrodos).**



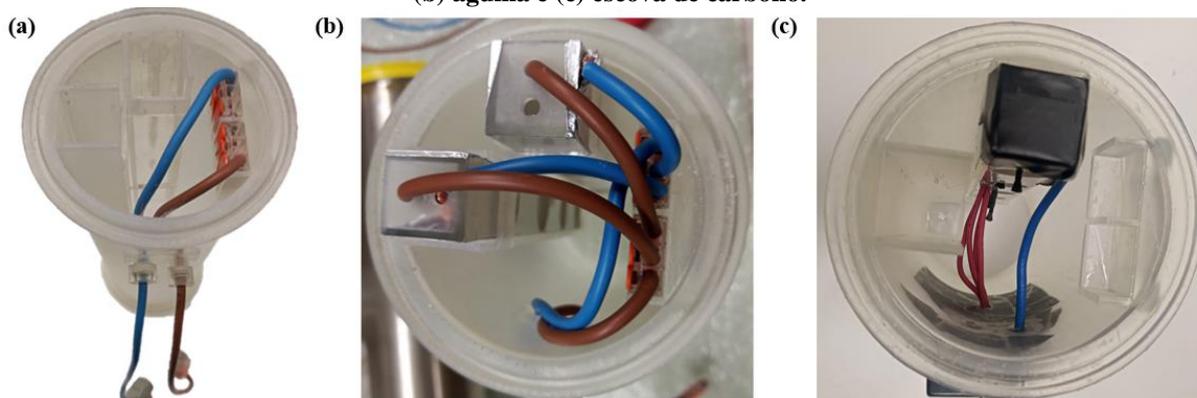
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

**Figura 45 - Peças suporte para os eletrodos de descarga revestida com fita de alumínio scotch (a) lado superior com ionizador agulha, (b) lado inferior com ionizador agulha e (c) ionizador escova de carbono.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

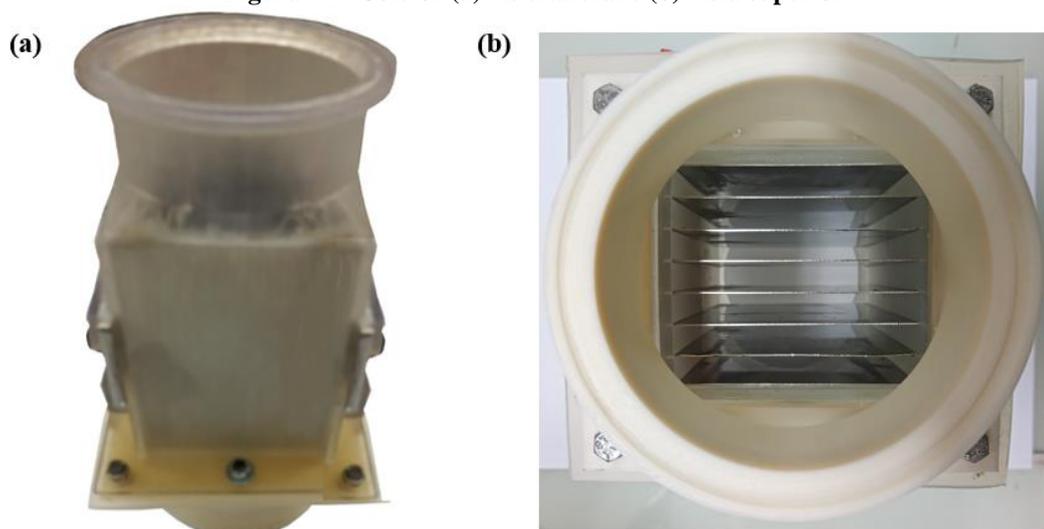
**Figura 46 – Vista superior do ionizador (a) sem os eletrodos de descarga e com os eletrodos de descarga (b) agulha e (c) escova de carbono.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

No caso do coletor (Figura 47), esse era composto por 8 placas de aço de 10 cm de altura, 7 cm de comprimento, 0,5 mm de espessura, espaçadas em 7,8 mm. Dessas 8 placas, 4 eram carregadas positivamente e 4 eram aterradas, de maneira alternada.

**Figura 47 - Coletor (a) vista lateral e (b) vista superior.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

### 5.2.2.1 Etapas do Estudo

Esse estudo foi dividido em 5 etapas, para analisar a influência da voltagem do coletor, da voltagem do ionizador, da velocidade do ar, da distância entre o ionizador e o coletor e do tipo de ionizador.

#### Etapa 1: Influência da voltagem do coletor

Nesta etapa, os experimentos foram realizados com a velocidade do ar de 50 cm/s, a voltagem do ionizador constante em -5 kV e as voltagens do coletor de +2, +3, +4 e +5 kV.

### Etapa 2: Influência da voltagem do ionizador

Nesta etapa, os experimentos foram realizados com a velocidade do ar de 50 cm/s. Com esta velocidade, avaliou-se o efeito da voltagem do ionizador com -3, -4 e -5 kV, com a voltagem do coletor constante em +5 kV.

### Etapa 3: Influência da velocidade do ar

Para analisar a influência do tempo de residência na eficiência de coleta, foram utilizadas as velocidades de 75 cm/s e 20 cm/s. Para a velocidade de 75 cm/s, a voltagem do ionizador foi mantida constante em -5 kV, com as voltagens do coletor de +2, +3, +4 e +5 kV. Para confirmar a velocidade do ar de 20 cm/s, foram realizados experimentos com a voltagem do ionizador de -5 kV, e a voltagem do coletor de +5 kV (voltagens de referência).

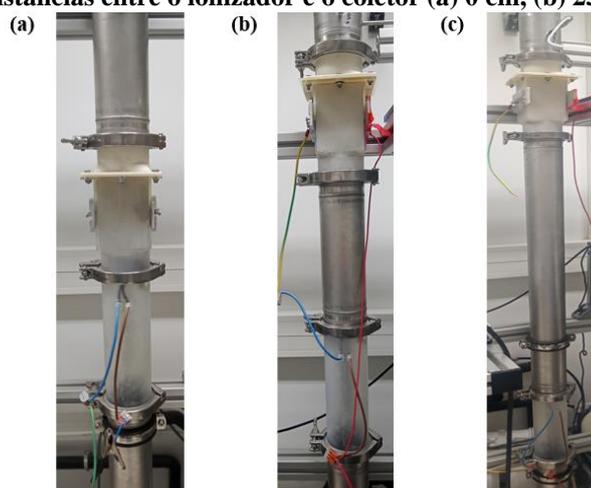
### Etapa 4: Influência da distância entre o ionizador e o coletor

Para as etapas 1, 2 e 3, o coletor foi conectado diretamente ao ionizador. Na etapa 4, foi estudada a influência da distância entre o ionizador e o coletor, para 25 e 75 cm, com a velocidade de 50 cm/s. Para isso, foram inseridos dois tubos, idênticos aos utilizados no restante da unidade experimental, cada um com a altura correspondente à distância desejada, como mostra a Figura 48. Para a distância de 25 cm, a voltagem do ionizador foi de -5 kV e a voltagem do coletor foi de +5 kV, e para a distância de 75 cm, as voltagens do ionizador aplicadas de -3, -4 e -5 kV, com a voltagem do coletor constante em +5 kV.

### Etapa 5: Influência do tipo de ionizador

Na etapa 5 foi avaliada a influência do tipo de ionizador na coleta de partículas do precipitador eletrostático. Desse modo, os eletrodos de descarga do tipo agulha utilizados para realizar os experimentos das etapas 1 a 4 foram substituídos pela escova de carbono. As condições operacionais escolhidas foram a velocidade do ar de 50 cm/s, a voltagem do ionizador de -5 kV e as voltagens do coletor de +2, +3, +4 e +5 kV.

**Figura 48 - Distâncias entre o ionizador e o coletor (a) 0 cm, (b) 25 cm e (c) 75 cm.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Todos os experimentos realizados nas 5 etapas estão resumidos na Tabela 7.

**Tabela 7 - Experimentos realizados com o precipitador eletrostático de duplo estágio.**

Etapa	Tipo de Ionizador	Distância Ionizador – Coletor (cm)	Velocidade (cm/s)	Voltagem do Ionizador (kV)	Voltagem do Coletor (kV)			
1	Agulha	0	50	- 5	+ 2			
					+ 3			
					+ 4			
					+ 5			
2	Agulha	0	50	- 3	+ 5			
				- 4				
				- 5				
3	Agulha	0	75	-5	+5			
					+ 2			
					+ 3			
4	Agulha	25	50	- 5	+ 5			
					- 3			
					75	50	- 4	+ 5
					- 5			
5	Escova de Carbono	0	50	- 5	+ 2			
					+ 3			
					+ 5			

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

### 5.2.2.2 Eficiência de Coleta

Para obter a eficiência de coleta, a concentração de partículas foi medida com as voltagens do ionizador e do coletor desligadas, representando o aerossol de entrada, e com as voltagens ligadas, representando o aerossol de saída. Todos os experimentos foram realizados em duplicata.

O equipamento utilizado para obter as concentrações de partículas (NanoScan) pode ser operado pelos modos Scan Mode e Single Mode. Quando operado em Scan Mode, é obtida a concentração de partículas durante 1 min para uma determinada faixa de diâmetro. Por outro lado, em Single Mode, a concentração de partículas é medida durante um tempo determinado para as partículas de um único diâmetro. A operação em Single Mode fornece resultados mais precisos, por medir a concentração de partículas durante um tempo maior, mas a operação em Scan Mode fornece informações de concentração total e distribuição do tamanho das partículas.

Desse modo, em todas as 3 etapas de estudo, os experimentos foram conduzidos em Scan Mode e Single Mode. Com Scan Mode, as concentrações de partículas com os diâmetros de 11,5, 15,4, 20,5, 27,4, 36,5, 48,7, 64,9, 86,6, 115,5 e 154,0 nm, foram medidas durante 1 min. Para determinar a concentração do aerossol de entrada, 10 amostras foram analisadas com as voltagens do ionizador e do coletor desligadas, totalizando um tempo de 10 min. Em seguida, para obter a concentração do aerossol de saída, foram analisadas mais 10 amostras, com as voltagens do ionizador e do coletor ligadas. Por fim, foi repetido o mesmo procedimento para obter a duplicata do experimento. Logo, cada experimento em Scan Mode teve uma duração de 40 min.

Com Single Mode, as concentrações de partículas foram medidas para partículas com os diâmetros de 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100, 110 e 120 nm. Para cada diâmetro, foi determinada a concentração do aerossol na entrada (voltagens desligadas) durante 5 min e, em seguida, a concentração do aerossol na saída (voltagens ligadas). Novamente, os experimentos foram realizados em duplicata. Assim, cada experimento em Single Mode teve uma duração total de 20 min.

Para obter o número de íons, o eletrômetro de aerossol (modelo Charme, PALAS) foi operado em Scan Mode durante 10 min com as voltagens do ionizador e do coletor desligadas, em seguida, 10 min com a voltagem do ionizador ligada e a do coletor desligada, e, por fim, 10 min com as voltagens do ionizador e do coletor ligadas. Os valores foram medidos a cada

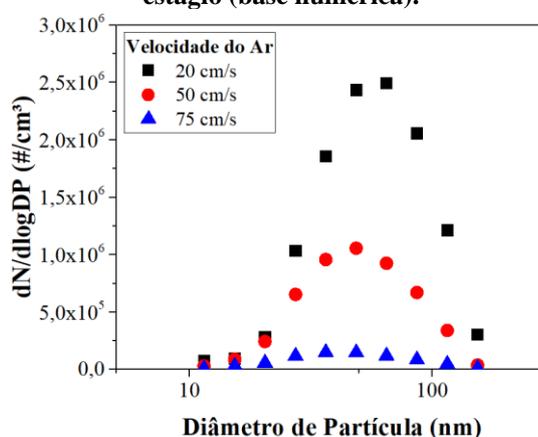
segundo e foi calculada a média por minuto e o número de íons total foi dividido pelo número total de partículas. Além disso, as concentrações de ozônio foram medidas com um analisador de ozônio (modelo O342e, ENVEA) durante os experimentos com o Scan Mode, com medições de ozônio a cada 30 segundos, e posterior cálculo da média desses valores.

### 5.3 Resultados e Discussão

#### 5.3.1 Propriedades do Aerossol na Entrada

As curvas de distribuição granulométrica com o precipitador de duplo estágio, para as velocidades utilizadas podem ser visualizadas na Figura 49. Pelas curvas, observa-se que a velocidade do ar foi um parâmetro de grande influência e um aumento nesse parâmetro resultou em uma redução de até 94% na concentração do número de partículas e no diâmetro correspondente à máxima eficiência. Para a velocidade do ar de 20 cm/s, a concentração máxima foi de  $2,49 \times 10^6$  para um diâmetro de 64,9 nm, e com a velocidade de 50 cm/s diminuiu para apenas  $1,06 \times 10^6$  para um diâmetro de 48,7 nm. A menor concentração foi observada com 75 cm/s, com um valor máximo de  $1,50 \times 10^5$  em 36,5 nm.

**Figura 49 - Distribuição granulométrica do aerossol na entrada do precipitador eletrostático de duplo estágio (base numérica).**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A concentração de entrada de partículas e os tempos de residência para as velocidades do ar avaliadas podem ser vistas na Tabela 8. O aumento da velocidade do ar de 50 para 75 cm/s reduziu em cerca de 33,5% a concentração de partículas no aerossol. Além disso, o tempo de residência das partículas reduziu em 0,17 s. Ao aumentar a distância entre o ionizador e o coletor para 25 e 75 cm, o tempo de residência das partículas aumentou em 0,5 e 1,5 s, respectivamente.

É interessante observar que apesar da concentração da solução de NaCl ser 50 vezes maior do que a utilizada nos experimentos do Capítulo 4, as concentrações de entrada das partículas com 50 e 75 cm/s foram muito próximas das obtidas anteriormente com as velocidades de 4 e 5 cm/s, respectivamente. Isso ocorreu por conta da maior diluição do aerossol ao serem utilizadas maiores velocidades.

**Tabela 8 - Concentração de entrada das partículas e tempo de residência para cada velocidade do ar (precipitador de duplo estágio).**

Velocidade do ar (cm/s)	Concentração do aerossol ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Tempo total de residência (s)		
		Distância ionizador – coletor (cm)		
		0	25	75
20	—	3,22		
50	$47,80 \pm 0,06$	0,51	1,01	2,01
75	$31,78 \pm 0,08$	0,34	—	—

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os dados de mediana e do desvio padrão geométrico para ambas as velocidades, em base mássica e numérica, estão exibidos na Tabela 9. Como pode ser observado, a mediana do diâmetro de partículas foi muito diferente em base mássica e em base numérica. Em base numérica, um maior número de partículas possuía um diâmetro entre 42 e 46 nm, como pode ser visto na distribuição da Figura 49. Por outro lado, pelas medianas em base mássica é possível observar que a maior parte da massa é referente às partículas de cerca de 103 nm, uma vez que as maiores partículas possuem uma massa maior. Os resultados foram bastante precisos, pois os desvios padrões geométricos em todos os casos foi entre 1,49 e 1,82 nm.

**Tabela 9 - Mediana e desvio padrão geométrico ( $\sigma$ ), para as diferentes velocidades do ar, em bases mássica e numérica (precipitador de duplo estágio).**

Velocidade do ar (cm/s)	Mediana (nm)		$\sigma$ (nm)	
	Base mássica	Base numérica	Base mássica	Base numérica
	50	$103,93 \pm 0,80$	$42,25 \pm 4,47$	$1,49 \pm 0,00$
75	$103,93 \pm 0,07$	$46,02 \pm 0,22$	$1,49 \pm 0,00$	$1,74 \pm 0,00$

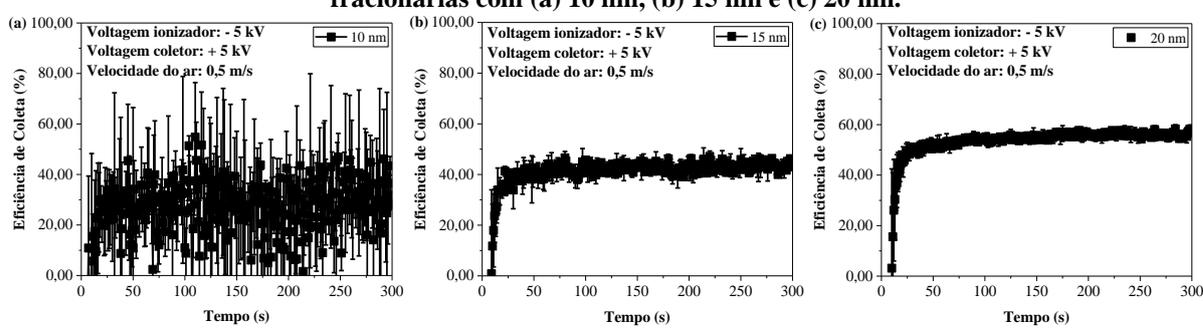
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

### 5.3.2 Eficiência de Coleta de Partículas

Os resultados de eficiência com Scan Mode que são apresentados nesse capítulo foram obtidos pela média das eficiências de coleta das duplicatas, uma vez que esse modo de operação fez o escaneamento das concentrações para uma faixa de diâmetro de partículas. Por outro lado, os resultados com Single Mode foram obtidos para cada diâmetro de partícula. Logo, os valores médios de eficiência foram calculados a partir das médias temporais das eficiências de coleta obtidas ao longo do tempo de execução do experimento. Para cada diâmetro de partícula, foi

obtido um gráfico da eficiência em função do tempo, como demonstrado para alguns diâmetros na Figura 50. Para o cálculo das eficiências médias, foram utilizados os valores na região mais estável da curva, sendo desconsiderados os valores iniciais crescentes. Na maior parte dos casos, as eficiências de coleta com um diâmetro de partícula de 10 nm apresentaram um comportamento muito oscilatório e com desvios padrões elevados, como exemplificado pela Figura 50a. Isso pode ter ocorrido devido ao menor número de partículas com esse diâmetro e no baixo carregamento elétrico e coleta de partículas tão pequenas. Porém, a partir do diâmetro de 15 nm (Figura 50b), as eficiências já apresentaram um perfil muito estável e com baixos desvios padrões.

**Figura 50 - Eficiências de carregamento em função do tempo utilizados para o cálculo das eficiências fracionárias com (a) 10 nm, (b) 15 nm e (c) 20 nm.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

### 5.3.2.1 Etapa 1: Influência da Voltagem do Coletor

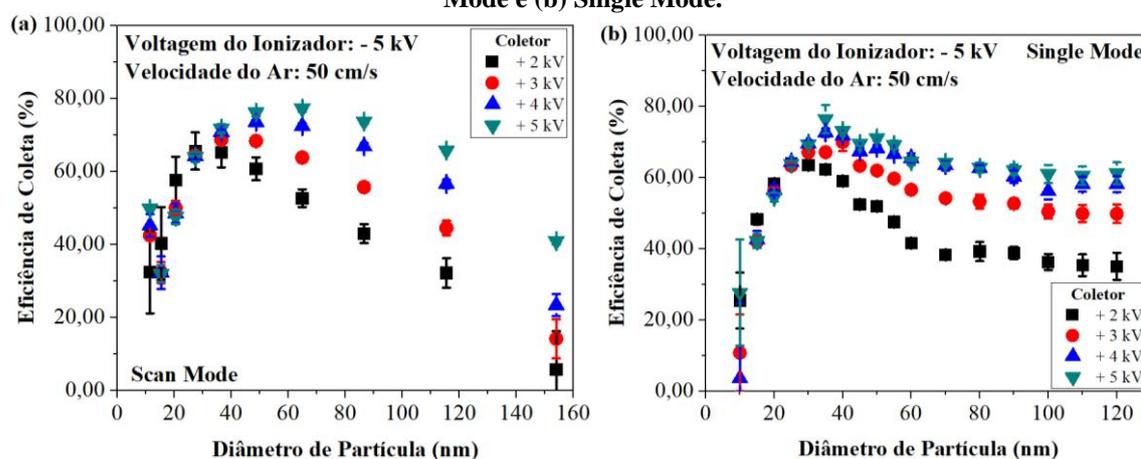
As eficiências de coleta obtidas com o Scan Mode para a etapa 1 (diferentes voltagens do coletor), com a velocidade de 50 cm/s, podem ser visualizadas na Figura 51. O aumento da voltagem de coleta resultou no aumento da eficiência de coleta de partículas, devido ao campo elétrico mais intenso (KANG *et al.*, 2021). Portanto, as maiores eficiências de coleta de partículas foram obtidas com a voltagem do coletor de +5 kV, mas os valores foram próximos aos obtidos com +4 kV.

Os resultados em Scan Mode (Figura 51a) indicaram uma tendência de aumento da eficiência máxima, juntamente com o diâmetro de partícula correspondente, com as voltagens do coletor mais altas. Com +2 kV, a eficiência máxima atingiu 65,66%, para o diâmetro de partícula de 27,4 nm. Este comportamento continuou com +3 kV, obtendo um valor de 68,67% para um maior tamanho de partícula, 36,5 nm. Aumentos adicionais na voltagem do coletor para +4 kV resultaram em uma eficiência de 73,53%, correspondendo a um diâmetro de partícula de 48,7 nm. A maior eficiência observada foi em +5 kV, onde atingiu o pico de 77,24% para um diâmetro de partícula de 64,9 nm. Kim *et al.* (2011) associam o aumento da tensão

aplicada ao aumento da velocidade de migração das partículas em direção às placas coletoras e, conseqüentemente, ao aumento coleta de partículas.

Antes da eficiência máxima, a coleta de partículas parecia inalterada em diferentes voltagens do coletor, indicando que essas partículas não estavam sendo carregadas (LIN; CHEN; TSAI, 2012). Após o ponto máximo houve uma diminuição contínua da eficiência, atingindo valores muito baixos para o diâmetro de 160 nm.

**Figura 51 - Eficiências de coleta com o precipitador de duplo estágio para a etapa 1 (voltagem do ionizador constante) para a velocidade do ar de 50 cm/s com diferentes voltagens do coletor em (a) Scan Mode e (b) Single Mode.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

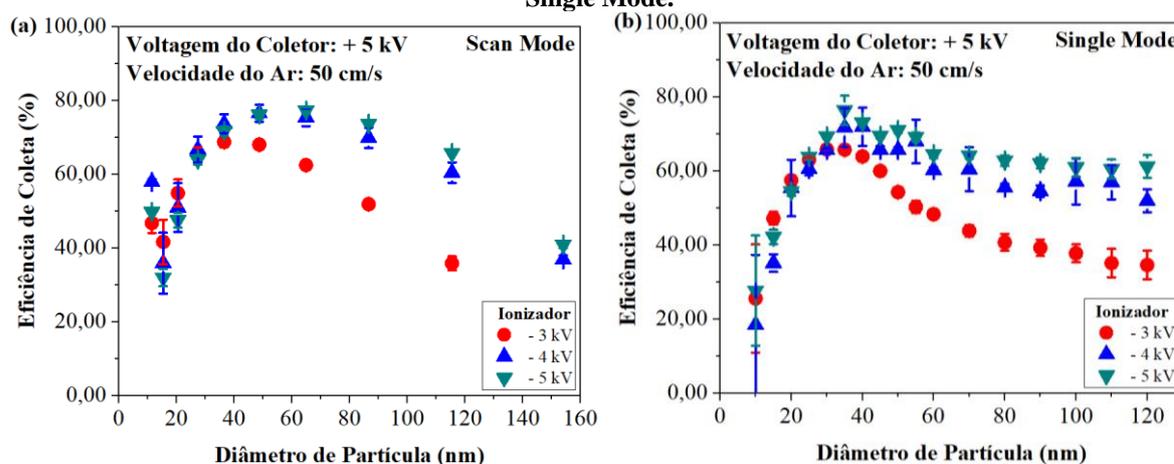
Avaliando os resultados em Single Mode (Figura 51b), observa-se que não ocorreram diminuições significativas de eficiência. Isso pode ter ocorrido porque ao ser operado em Scan Mode o equipamento mediu as concentrações das partículas para toda a faixa de diâmetro, enquanto com Single Mode foi realizado um experimento para cada diâmetro de partícula avaliado. Logo, para obter uma curva da Figura 51a foi realizado um experimento em duplicata, totalizando 40 min. Por outro lado, para obter uma curva da Figura 51b foram necessários 340 min, pois cada ponto da curva é o resultado de um experimento em duplicata que demandou 20 min no total.

Da mesma forma que no Scan Mode, as curvas no Single Mode (Figura 51b) apresentaram uma eficiência máxima, porém não apresentaram a tendência de decréscimo contínuo. Houve uma redução na eficiência de coleta, que começou a se estabilizar com diâmetros de partículas maiores (LIN *et al.*, 2010; MOLCHANOV *et al.*, 2021).

### 5.3.2.2 Etapa 2: Influência da Voltagem do Ionizador

As eficiências de coleta em Scan Mode e Single Mode para a etapa 2 (diferentes voltagens do ionizador) podem ser vistas na Figura 52. As curvas em Scan Mode (Figura 52a) exibiram um padrão similar ao da etapa 1, indicando um ponto de eficiência mínima em torno de 15 nm. Bem como ocorreu na etapa 1 com a voltagem do coletor, uma alteração na voltagem do ionizador deslocou o ponto de máxima eficiência para um maior diâmetro de partícula. Com -3kV, a maior eficiência foi alcançada com o tamanho de partícula de 36,5 nm, alcançando 68,76% de remoção. O aumento da voltagem do ionizador para -4 kV resultou em um pico de eficiência de 76,52% com o tamanho de partícula de 48,7 nm. Além disso, a eficiência de remoção máxima de 77,24% ocorreu com -5 kV, correspondendo ao diâmetro de 64,9 nm. Novamente, um decréscimo na eficiência foi observado ao longo da faixa de diâmetro analisada e quanto maior a voltagem do ionizador, maior a eficiência de coleta.

**Figura 52 – Eficiências de coleta com o precipitador de duplo estágio para a etapa 2 (voltagem do coletor constante) para diferentes voltagens do ionizador, com a velocidade de 50 cm/s, em (a) Scan Mode e (b) Single Mode.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

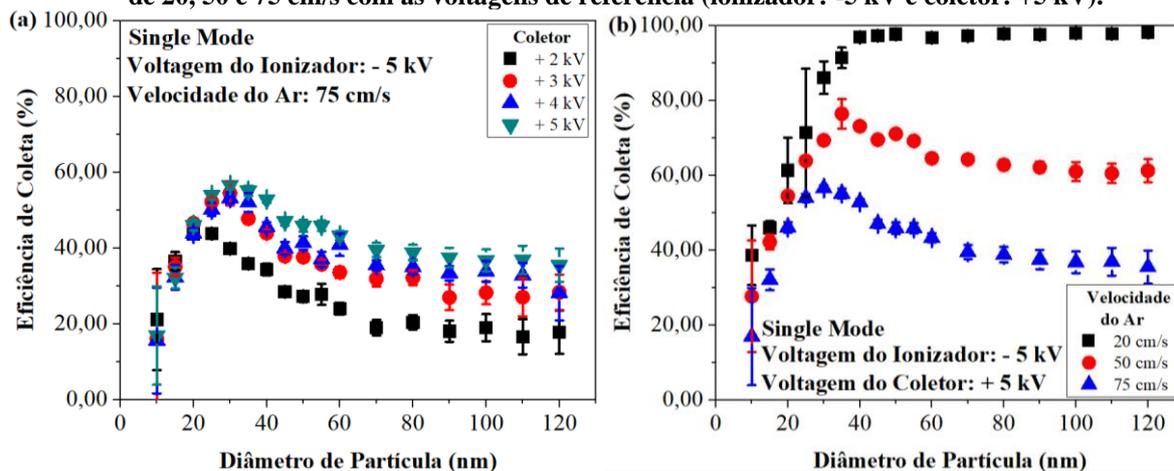
Entretanto, a diferença entre as voltagens do ionizador de -4 e -5 kV não foi tão grande, e as curvas foram quase idênticas até um diâmetro de partícula de 70 nm. Para os maiores diâmetros, a diferença foi em torno de 5%. A maior diferença foi com a voltagem do ionizador de -3 kV, de até 25% em relação à voltagem de -4 kV e até 29,87% em relação à voltagem de -5 kV. A melhora no desempenho do precipitador eletrostático quando utilizadas maiores voltagens no ionizador está relacionada com o aumento na intensidade do campo elétrico na zona de ionização e um consequente aumento na corrente elétrica, favorecendo a coleta de partículas no coletor.

As curvas em Single Mode (Figura 52b) corroboraram a influência da voltagem do ionizador na eficiência de coleta, mas mostraram um comportamento mais estável para os maiores diâmetros de partículas. Mesmo que a faixa de diâmetro de partícula avaliada seja um pouco menor em Single Mode (até 120 nm), fica claro que a curva quase atinge a estabilidade, o que não ocorre para a curva em Scan Mode (Figura 52a). Também pode ser observado que antes da eficiência máxima a voltagem do ionizador não teve uma influência significativa na remoção de partículas. Esse comportamento pode estar relacionado com o carregamento por difusão nessa região e pelo curto tempo de residência de 0,51 s (Tabela 8), nessa velocidade do ar. Uma vez que as partículas pequenas estão passando muito rápido pelo ionizador, o aumento na voltagem aplicada não é o suficiente para melhorar a coleta de partícula nessa faixa de diâmetro, sob as condições avaliadas.

### 5.3.2.3 Etapa 3: Influência da Velocidade do Ar

Os experimentos também foram conduzidos com as velocidades do ar de 20 e 75 cm/s para avaliar a influência desse parâmetro no desempenho do precipitador eletrostático e os resultados estão apresentados na Figura 53. Com a velocidade do ar de 75 cm/s (Figura 53a) foi alcançada uma eficiência máxima de 77,24%. À medida que a voltagem do coletor aumentou, a remoção de partículas seguiu uma tendência similar a observada anteriormente para a velocidade do ar de 50 cm/s (Figura 51b).

**Figura 53 - Eficiências de coleta (Single Mode) para a etapa 3 (influência da velocidade do ar) nas velocidades de (a) 75 cm/s, com a voltagem constante do ionizador, e (b) a comparação com as velocidades de 20, 50 e 75 cm/s com as voltagens de referência (ionizador: -5 kV e coletor: +5 kV).**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O efeito da velocidade do ar é mais evidente na Figura 53b, que compara as eficiências de coleta com todas as velocidades avaliadas nas voltagens de referência. A velocidade de 20 cm/s alcançou uma máxima eficiência de 99,64%, esse valor apresentou um decréscimo quando utilizadas velocidades maiores (LI *et al.*, 2019a; ZHU *et al.*, 2020), especialmente com

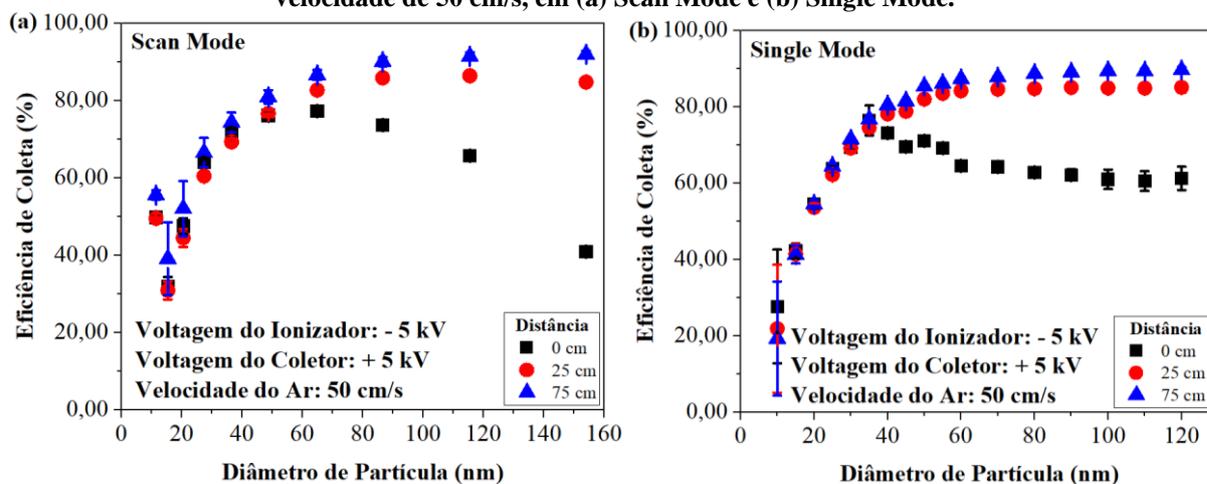
partículas maiores que 30 nm. A partir da comparação dos resultados, foram observadas variações significativas na eficiência de coleta, particularmente com os diâmetros de partículas de 110 e 120 nm. Quando a velocidade do ar aumentou de 20 para 50 cm/s, a remoção de partículas diminuiu em até 37,31%. Em seguida, com um aumento ainda maior na velocidade do ar de 50 para 75 cm/s, a diferença máxima observada foi de 25,76%. Logo, um aumento na velocidade do ar de 20 para 75 cm/s acarretou um decréscimo substancial na coleta de partículas, alcançando 62,66%. Isso foi consequência de uma redução de 2,88 s no tempo de residência, que reduziu tanto o tempo de carregamento quanto de coleta, afetando o desempenho do precipitador na coleta de nanopartículas.

Na região anterior à eficiência máxima, a coleta de partículas foi maior com menores velocidades do ar e as curvas não foram sobrepostas, como ocorreu nas etapas anteriores do presente capítulo. Esse comportamento pode ser associado com a redução do efeito do carregamento parcial devido ao tempo de residência mais longo (LIN; CHEN; TSAI, 2012). É interessante observar que o diâmetro de partícula correspondente à máxima eficiência permaneceu consistente ao longo de todas as velocidades do ar testadas. Com a velocidade do ar de 20 cm/s, embora a maior eficiência de coleta tenha sido observada com um diâmetro de partícula de 120 nm (98,13%), ela não mostrou uma grande diferença em relação à coleta com o diâmetro de partícula de 40 nm (98,86%). Com um aumento na velocidade do ar para 50 cm/s, a eficiência máxima reduziu para 76,43% e o diâmetro correspondente mudou para 35 nm. Essa tendência manteve-se com a velocidade do ar de 75 cm/s, alcançando a eficiência de coleta de 56,57% com o diâmetro de partícula de 30 nm.

#### 5.3.2.4 Etapa 4: Influência da Distância entre o Ionizador e o Coletor

As eficiências de coleta para a etapa 4, com diferentes distâncias entre o ionizador e o coletor, estão expostas na Figura 54. Esses resultados foram obtidos com a voltagem do coletor de + 5 kV e com a voltagem do ionizador de - 5 kV, que foram escolhidas como as voltagens de referência para os experimentos comparativos com diferentes distâncias. Nesse caso, as curvas com Scan Mode (Figura 54a) tiveram novamente uma eficiência mínima em torno de 20 nm e apresentaram um decaimento de eficiência na região final da curva, para a distância de 0 cm. Em contrapartida, as curvas de eficiência de coleta com as distâncias de 25 e 75 cm se tornaram quase constantes com os maiores diâmetros de partículas, se assemelhando ao comportamento das curvas em Single Mode (Figura 54b).

**Figura 54 - Eficiências de coleta com o precipitador de duplo estágio para a etapa 4 (influência da distância entre o ionizador e o coletor) com as voltagens do coletor e do ionizador constantes, com a velocidade de 50 cm/s, em (a) Scan Mode e (b) Single Mode.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Com o Scan Mode (Figura 54a), a máxima eficiência com a distância de 0 cm foi de 77,24% com o diâmetro de 64,9 nm, e para as distâncias de 25 e 75 cm foi de 86,41% e 91,96%, respectivamente, na faixa de diâmetro entre 115,5 e 154 nm.

Com o Single Mode (Figura 54b), as eficiências de coleta com todas as distâncias testadas aumentaram com o diâmetro de partícula e foram basicamente as mesmas até um diâmetro de partícula em torno de 40 nm. Supõe-se que esse comportamento está associado à ausência de eletrodos de descarga nos tubos adicionados para aumentar a distância entre os dois estágios do precipitador eletrostático, criando uma zona de menor ionização (LU *et al.*, 2016), especialmente com a distância de 75 cm. Como o carregamento das nanopartículas ocorre pelo mecanismo de difusão, o aumento no tempo de residência não aumentou significativamente a probabilidade de colisão para partículas tão pequenas. Além disso, a maior distância contribuiu para a deposição das partículas na tubulação, uma vez que partículas menores possuem uma maior tendência de serem depositadas, em comparação com partículas maiores (MACHADO; MERCURI; NOE, 2022), sem de fato serem coletadas.

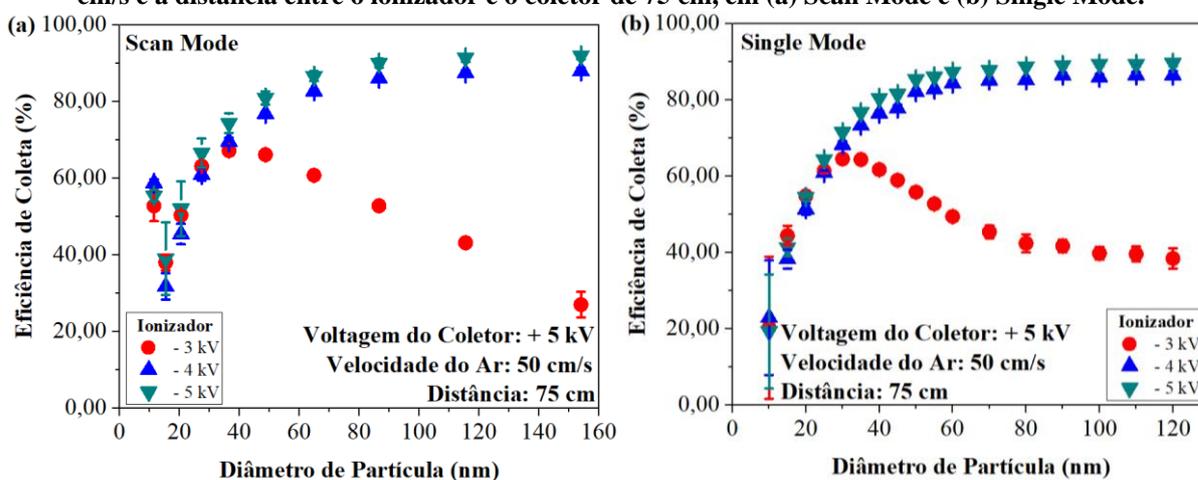
Para partículas maiores, com a distância de 0 cm, a remoção de partículas decaiu aproximadamente 61%. Entretanto, ela aumentou progressivamente até cerca de 85% e 89% para as distâncias de 25 e 75 cm, respectivamente. Kim *et al.* (2022) estudaram a influência na eficiência de coleta de partículas ( $dp = 300$  nm) da distância entre o carregador (ionizador de escova de carbono) e o coletor, variando de 2 a 100 cm. As voltagens aplicadas foram -15 kV no ionizador e -7 kV no coletor, em um precipitador eletrostático de duplo estágio. Os autores observaram um aumento de 5% quando a distância aumentou de 2 para 20 cm, mas um aumento

subsequente de 20 para 100 cm aumentou apenas 1,5% na eficiência de coleta. Os valores com as distâncias de 25 e 75 cm foram em torno de 77,6% e 79%, respectivamente.

O aumento na coleta de partículas pode ser atribuído ao tempo de residência mais longo das partículas (Tabela 8) antes de entrar no estágio de coleta. Ao inserir uma distância de 25 cm entre os estágios de ionização e coleta ocorreu o aumento de 0,5 s no tempo de residência, e esse tempo aumentou mais 1 s com a distância de 75 cm. As curvas sugerem que a distância de 25 cm contribuiu para melhorar o desempenho do precipitador, mas aumentar para 75 cm resultou em uma eficiência de coleta apenas 4% maior comparada com a distância de 25 cm. Uma hipótese é que isso representa o desempenho ótimo possível com as condições operacionais aplicadas, ou que um aumento de 1,50 s no tempo de residência, comparado com a distância de 0 cm, fornece uma duração longa o suficiente para o carregamento de partícula, com uma porção dessas partículas perdendo a carga adquirida.

Também é possível avaliar separadamente os resultados com a distância de 75 cm com diferentes voltagens do ionizador (Figura 55). Da mesma forma como discutido anteriormente, o aumento da voltagem do ionizador favoreceu a coleta de partículas, mas os valores com  $-4$  e  $-5$  kV foram praticamente iguais. Porém, é evidente o aumento de eficiência ao alterar a voltagem de  $-3$  kV para  $-4$  kV, com aumentos de até 50%. É interessante destacar que os diâmetros correspondentes às eficiências máximas foram muito próximos para a configuração de  $-3$  kV com Scan Mode (36,5 nm) e Single Mode (30 nm). Para as demais voltagens, os valores máximos foram alcançados na região final da curva, com os maiores diâmetros de partículas.

**Figura 55 - Eficiências de coleta com o precipitador de duplo estágio para a etapa 4 (influência da distância entre o ionizador e o coletor) para diferentes voltagens do ionizador, com a velocidade de 50 cm/s e a distância entre o ionizador e o coletor de 75 cm, em (a) Scan Mode e (b) Single Mode.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

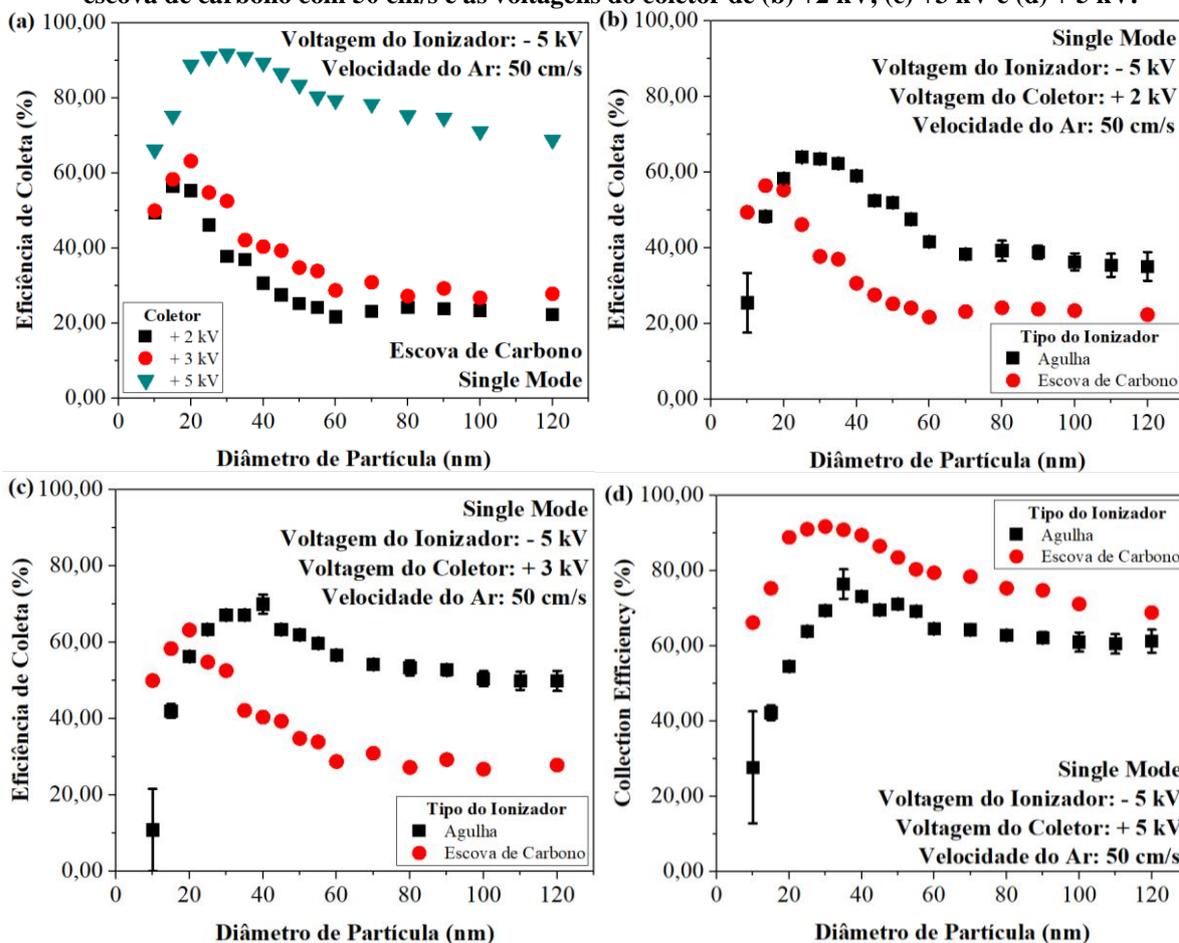
### 5.3.2.5 Etapa 5: Influência do Tipo de Ionizador

Dois tipos de ionizadores (agulha e escova de carbono) foram testados para analisar a influência desse componente na coleta de partículas e os resultados estão apresentados na Figura 56. Os resultados com a escova de carbono com diferentes voltagens do coletor estão exibidos na Figura 56a e pode ser visto que com +2 kV e +3 kV as eficiências de coleta apresentaram comportamentos e valores semelhantes, que aumentaram com +5 kV, como observado na etapa 1 (Figura 51). As curvas atingiram uma eficiência máxima que decaiu continuamente até quase estabilizar com valores cerca de 25-36% menores, com a redução mais significativa na faixa de diâmetro entre 30 e 60 nm. Além disso, foi observado uma redução na eficiência de coleta para partículas na faixa de tamanho de 50-60 nm devido ao efeito de carga parcial.

As máximas eficiências de coleta ocorreram com o diâmetro de partícula de 15 nm com +2 kV (56,40%), 20 nm com +3 kV (63,18%) e 30 nm com +5 kV (91,67%). Contudo, com +5 kV um valor semelhante foi obtido com o diâmetro de partícula de 20 nm (88,83%), indicando que os valores máximos foram obtidos principalmente entre 15 e 20 nm e que a voltagem do coletor não apresentou uma grande influência nesses resultados. Além disso, os picos de eficiência com menores diâmetros de partículas podem ser associados com o menor número de íons necessários para o carregar essas partículas, e uma vez que um número suficiente de íons é alcançados, eles são efetivamente coletados (KIM *et al.*, 2011).

Em seguida, os resultados com a escova de carbono foram comparados com aqueles com o ionizador do tipo agulha com a velocidade do ar de 50 cm/s e as voltagens do coletor de +2, +3 e +5 kV (Figura 56b-d). Com +2 kV (Figura 56b) e +3 kV (Figura 56c), houve uma melhora na remoção de partículas com a escova de carbono, particularmente alcançando 39% para as partículas na faixa de diâmetro entre 10-20 nm. Porém, para partículas maiores, o tipo agulha exibiu maior eficiência, com a diferença mais notável em 40 nm, aproximadamente 29% para ambas as voltagens do coletor. Por outro lado, com +5 kV (Figura 56d) as eficiências de coleta com a escova de carbono foram maiores com o ionizador agulha em toda a faixa de diâmetro analisada. Logo, esses resultados sugerem que o ionizador escova de carbono provavelmente requer uma maior voltagem aplicada para alcançar elevadas eficiências de coleta (LEE *et al.*, 2022).

**Figura 56 - Eficiências de coleta (Single Mode) para a etapa 5 (influência do tipo de ionizador) com (a) 20 cm/s (escova de carbono) com diferentes voltagens do coletor, e a comparação entre o tipo agulha e a escova de carbono com 50 cm/s e as voltagens do coletor de (b) +2 kV, (c) +3 kV e (d) +5 kV.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

### 5.3.3 Carga das Partículas

A carga da partícula por número de partículas foi medida para os experimentos selecionados (Tabela 10) e os resultados estão apresentados na Figura 57. Para os experimentos com o ionizador do tipo agulha, o aumento na distância entre o ionizador e o coletor reduziu a carga no estágio de ionização (on-off), com uma voltagem do coletor constante, e aumentou a carga no estágio de coleta (on-on) juntamente com a voltagem do coletor aplicada.

Além disso, quando a velocidade do ar reduziu de 50 cm/s (A-1) para 20 cm/s (A-4) com as mesmas voltagens do ionizador e do coletor, a carga para ambos os casos também reduziu, mas a eficiência de coleta (Figura 53) aumentou. Isso sugere que mesmo com uma pequena carga elétrica, as partículas podem ser eficientemente coletadas com baixas velocidades do ar.

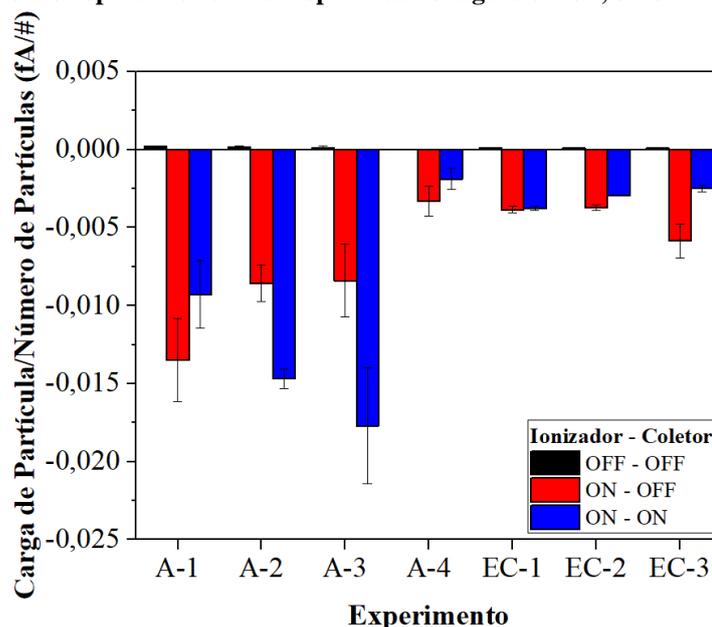
Com a escova de carvão, a carga das partículas no estágio de ionização aumentou com maiores voltagens do ionizador, como esperado (HEO; LEE; PARK, 2022), e reduziu a carga quando a voltagem do coletor estava ligada (on-on). Além disso, as cargas das partículas foram menores do que com o tipo agulha, o que justifica as menores eficiências de coleta (Figura 56). Sob as voltagens de referência (Figura 56d), a remoção de partículas usando a escova de carbono foi superior à remoção utilizando o ionizador agulha, apesar da menor carga das partículas. Essa observação sugere que a distribuição do campo elétrico no interior do precipitador eletrostático com a escova de carbono é favorável à coleta de partículas com as maiores voltagens sem necessitar de uma carga de partícula elevada.

**Tabela 10 - Experimentos selecionados para medição da carga das partículas.**

<b>Experimento</b>	A-1	A-2	A-3	A-4	EC-1	EC-2	EC-3
<b>Tipo de Ionizador</b>	Agulha	Agulha	Agulha	Agulha	Escova de Carbono	Escova de Carbono	Escova de Carbono
<b>Velocidade do Ar (cm/s)</b>	50	50	50	20	50	50	50
<b>Distância Ionizador-Coletor (cm)</b>	0	25	75	0	0	0	0
<b>Voltagem do Ionizador (kV)</b>	- 5	- 5	- 5	- 5	- 5	- 5	- 5
<b>Voltagem do Coletor (kV)</b>	+ 5	+ 5	+ 5	+ 5	+ 2	+ 3	+ 5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

**Figura 57 - Carga por número de partículas para os experimentos descritos na Tabela 3, com o ionizador e o coletor operando com as respectivas voltagens off-off, on-off e on-on.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

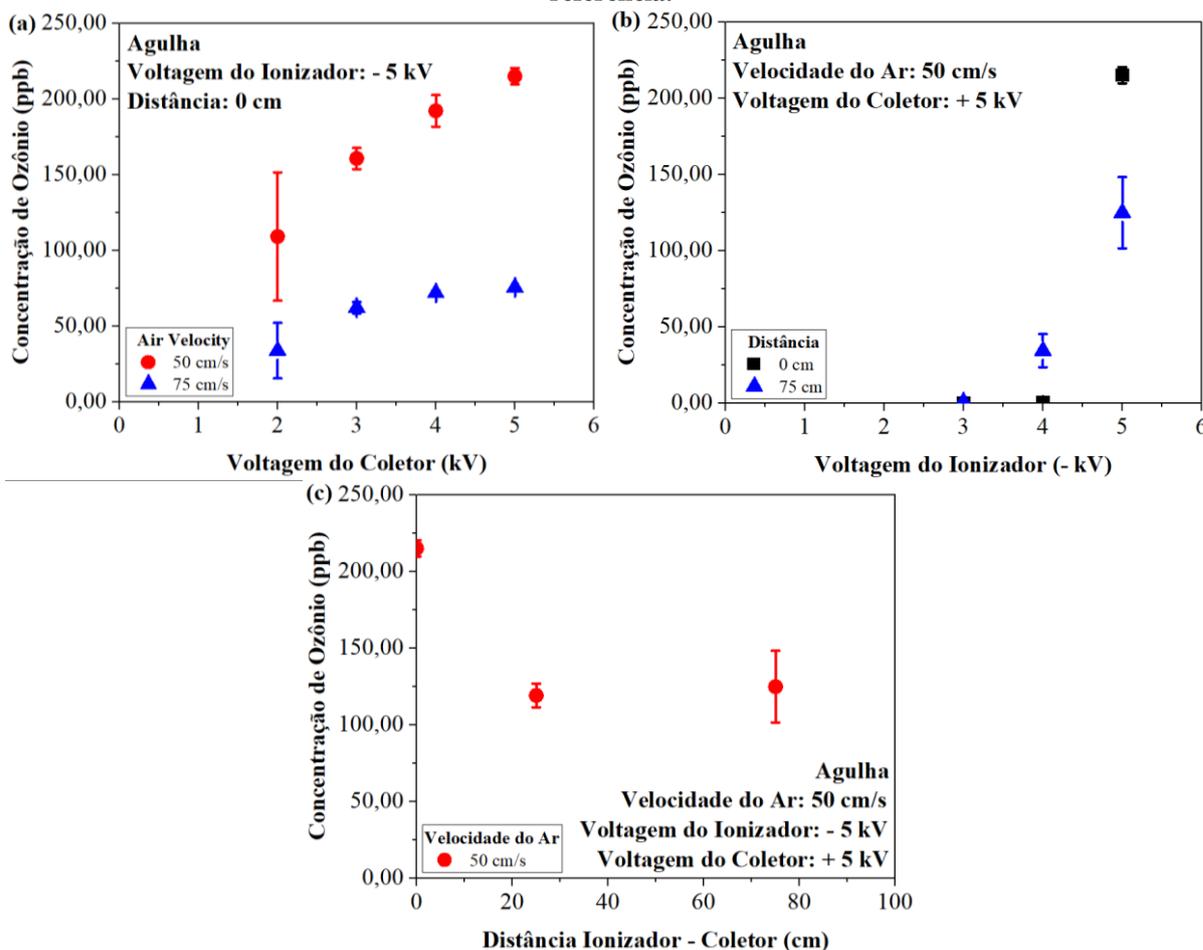
#### 5.3.4 Concentração de Ozônio

As concentrações de ozônio para diferentes condições operacionais estão expostas na Figura 58. A Figura 58a apresenta a concentração de ozônio em função da voltagem do coletor, para as velocidades de 50 e 75 cm/s. Como pode ser observado, quanto maior a voltagem do coletor utilizada, maior foi a concentração de ozônio gerada pelo precipitador eletrostático e o maior desvio padrão das medidas foi obtido com a voltagem de + 2 kV. Além disso, a velocidade de 50 cm/s gerou uma concentração de ozônio muito maior (até 170 ppb) em comparação à velocidade de 75 cm/s. Isso pode estar associado ao maior tempo de residência das partículas, que fornece um maior tempo para o processo de ionização, e consequente geração de ozônio, das partículas. Também pode ser observado que o aumento da voltagem do coletor teve uma menor influência na velocidade de 75 cm/s, e que a curva para essa velocidade apresentou um perfil mais estável, enquanto com a velocidade de 50 cm/s o perfil foi crescente.

A Figura 58b exibe a concentração de ozônio em função da voltagem do ionizador para as distâncias de 0 e 75 cm. A concentração de ozônio aumentou com maiores voltagens do ionizador para ambas as distâncias (ZUKERAN *et al.*, 2023), o que está relacionado ao aumento da dissociação de O<sub>2</sub> como consequência do aumento da transferência de energia pelos íons no estágio de ionização (BADAMI *et al.*, 2023). Com -3 kV, a concentração de ozônio foi praticamente nula para ambas as distâncias, provavelmente devido à baixa corrente elétrica sob essa condição. Aumentando a voltagem para -4 kV resultou em uma concentração muito

pequena com 0 cm (0,47 ppb), mas em torno de 34 ppb com 75 cm. As eficiências de remoção sob essas condições (Figura 52b e Figura 55b) indicam uma maior coleta de partícula ao ser utilizada uma maior distância, sugerindo uma ionização mais forte e, conseqüentemente, uma maior geração de ozônio.

**Figura 58 - Concentrações de ozônio com (a) as velocidades de 50 e 75 cm/s e com a distância de 0 cm em função da voltagem do coletor, (b) velocidade de 50 cm/s e as distâncias de 0 cm e 75 cm como função da voltagem do ionizador e (c) em função da distância entre o ionizador e o coletor com as voltagens de referência.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Entretanto, um aumento ainda maior na voltagem para -5 kV gerou uma elevação substancial na geração de ozônio, alcançando aproximadamente 215 ppb e 125 ppb com as distâncias de 0 e 75 cm, respectivamente. A diminuição da concentração de ozônio com 75 cm, comparada com 0 cm e -5 kV, pode ser relacionada com a dispersão do gás ao longo do tubo inserido entre o ionizador e o coletor. Também é importante destacar que a concentração das partículas é medida pelo NanoScan após a passagem pelo coletor.

Pelos resultados de eficiência (Figura 52) foi observado que a diferença na coleta com -4 kV e -5 kV não foi muito significativa, mas a geração de ozônio foi muito maior. Esse

resultado indica que provavelmente é preferível aplicar a voltagem de -4 kV, obtendo uma boa coleta de partícula e uma baixa concentração de ozônio.

Por fim, foram comparadas as concentrações de ozônio com as 3 distâncias entre o ionizador e o coletor avaliadas, para as condições de referência (voltagem do coletor de + 5 kV e voltagem do ionizador de - 5 kV) (Figura 58c). O aumento da distância de 0 cm para 25 cm reduziu em aproximadamente 100 ppb a concentração de ozônio, mas ao aumentar a distância de 25 cm para 75 cm a concentração se manteve praticamente constante. Ou seja, as distâncias de 25 cm e 75 cm apresentaram características semelhantes tanto nos resultados de eficiência quanto nos das concentrações de ozônio, indicando que essa alteração não deve ter um efeito significativo nas características elétricas do precipitador eletrostático.

#### **5.4 Considerações Finais**

O presente capítulo teve como foco um precipitador eletrostático de duplo estágio em uma unidade experimental distinta do capítulo 4. O desempenho desse equipamento foi avaliado em 3 etapas, que exploraram a influência na eficiência de coleta de partículas do precipitador eletrostático operando com diferentes voltagens do coletor, do ionizador e com a alteração da distância entre o ionizador e o coletor.

Os resultados mostraram que quanto maior a voltagem do coletor, maior foi a eficiência de coleta de partículas. Além disso, a coleta de partículas foi prejudicada pelo aumento da velocidade do ar, com reduções na eficiência de até 20%. Porém, o aumento da voltagem do coletor também acarretou uma maior concentração do ozônio gerado.

A influência na eficiência de partículas foi ainda mais significativa com a alteração da voltagem do ionizador. Ao aumentar as voltagens de - 3 kV para - 5 kV o precipitador foi até 25% mais eficiente, devido ao aumento da corrente elétrica fornecida. Entretanto, a diferença na eficiência obtida com as voltagens de - 4 e - 5 kV não teve uma diferença tão expressiva, especialmente em Single Mode. Por outro lado, a concentração de ozônio gerada com a concentração de - 5 kV foi de cerca de 200 ppb maior.

Por fim, o aumento da distância entre o ionizador e o coletor contribuiu para o aumento de eficiência de até 28%, comparando os resultados com 0 e 75 cm. A maior diferença, na eficiência e na concentração de ozônio, foi com o aumento da distância de 0 cm para 25 cm. Isso provavelmente ocorreu pelo aumento do tempo de residência das partículas no interior do precipitador eletrostático. O maior tempo de residência permitiu que as partículas tivessem um

melhor carregamento elétrico, e posterior coleta. Contudo, ao aumentar ainda mais, para 75 cm, a distância entre o ionizador e o coletor não se apresentou como um fator de grande influência.

Esses resultados indicam que por vezes pode ser melhor, sob o ponto de vista ambiental, utilizar voltagens um pouco menores, mas capazes de desempenhar uma boa coleta de partículas. Porém, as voltagens não podem ser muito baixas porque o campo elétrico não vai ser elevado o suficiente para coletar as partículas de forma satisfatória.

## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou o desempenho do precipitador eletrostático em duas geometrias diferentes, simples e duplo estágio. Para cada uma dessas geometrias foi utilizada uma unidade experimental distinta, bem como as condições operacionais. O precipitador de simples estágio foi operado com velocidades bem mais baixas e com um aerossol mais concentrado em comparação ao de duplo estágio.

Entretanto, ambos os estudos convergiram para alguns resultados semelhantes. Por exemplo, a influência negativa do aumento da velocidade do ar foi identificada nas eficiências de coleta de ambos os equipamentos. Além disso, o aumento da voltagem, e conseqüentemente do campo elétrico, contribuiu para a coleta de partículas. Porém, o aumento desse parâmetro em determinadas faixas de valores não teve um efeito tão significativo nos resultados de eficiência de coleta.

Pelo estudo do capítulo 4, pode-se concluir que o precipitador eletrostático de simples estágio apresenta um melhor desempenho quando os eletrodos de descarga estão dispostos na região central do equipamento, mas ele também pode ser eficiente com algumas condições nas regiões inicial ou final do precipitador eletrostático. Além disso, com maiores campos elétricos é possível utilizar apenas 1 eletrodo de descarga e obter eficiências de coleta tão eficientes quanto às obtidas com 3 eletrodos de descarga. A inserção de uma tela coletora no duto do equipamento também favoreceu a coleta de partículas.

Pelo estudo do capítulo 5, foi observado que o precipitador eletrostático de duplo estágio não foi tão eficiente quanto o de simples estágio do capítulo 4, mas foram obtidos resultados interessantes. Além disso, os parâmetros foram divididos em 5 etapas para avaliar a influência da voltagem do ionizador, da voltagem do coletor, da velocidade do ar, da distância entre o ionizador e o coletor e do tipo de ionizador. As condições mais eficientes foram as com as maiores voltagens do coletor (+ 5 kV) e do ionizador (- 5 kV). O aumento dessas voltagens também aumentou o ozônio formado, especialmente com o aumento da voltagem do ionizador. Também ocorreu o aumento da eficiência de coleta com as distâncias de 25 e 75 cm, mas esse aumento foi significativo quando comparado aos resultados com a distância de 0 cm.

Logo, através desse trabalho fica evidente a versatilidade do precipitador eletrostático e de como as condições operacionais e os parâmetros geométricos influenciam na coleta de nanopartículas. Dessa forma, para cada caso é possível utilizar diferentes configurações

geométricas, que devem ser selecionadas de acordo com o objetivo final daquele processo, a fim de equilibrar um bom desempenho do equipamento com um menor custo energético e com os efeitos para o meio ambiente.

## CAPÍTULO 7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho investigou a coleta de nanopartículas em precipitadores eletrostáticos de simples e duplo estágio, com modificações na geometria dos eletrodos de descarga e seu posicionamento no interior do equipamento. A partir das conclusões desse trabalho, podem ser feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

Em relação ao tipo de precipitador eletrostático, a utilização do equipamento de duplo estágio facilita a compreensão dos fenômenos que ocorrem no seu interior, uma vez que estes não conseguem ser observados a olho nu. Logo, essa configuração permite controlar separadamente os estágios de ionização e coleta. Entretanto, as eficiências de coleta não foram tão elevadas quanto as obtidas com o precipitador eletrostático de simples estágio. Dessa forma, sugere-se ampliar a investigação da configuração de duplo estágio, a fim de explorar outras condições operacionais e geométricas que possam favorecer a coleta de partículas, como por exemplo, utilizar um coletor maior.

Em relação ao posicionamento dos eletrodos de descarga, é recomendado utilizar os eletrodos de descarga dispostos na região central do precipitador eletrostático, pela melhor distribuição do campo elétrico e pelas elevadas eficiências de coleta na maior parte das condições avaliadas. Em relação à geometria dos eletrodos de descarga, os fios cilíndricos forneceram elevadas correntes elétricas, mas ao serem utilizadas altas velocidades recomenda-se o uso dos eletrodos do tipo agulha, por serem mais rígidos. Também sugere-se explorar mais a utilização do eletrodo escova de carbono, pois os resultados preliminares obtidos no presente trabalho indicaram que esse eletrodo pode obter elevadas eficiências de coleta com maiores voltagens.

Quanto à utilização da tela coletora, essa configuração deve ser mais explorada pois aumentou a coleta de partículas em até 70%. Sugere-se fazer a inclusão de mais telas coletoras ao longo do precipitador eletrostático e investigar a influência da posição dos eletrodos de descarga em relação à tela coletora. Por fim, podem ser exploradas configurações alternativas, como por exemplo, posicionar os fios e as telas coletoras de forma alternada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, S.; SMAIL, J. **The Optimum Operation Conditions for Electrostatic Precipitator (ESP) in Particulate Emitter Industries**. 2018 International Conference on Pure and Applied Science. **Anais...** Em: 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON PURE AND APPLIED SCIENCE. Koya University, 1 ago. 2018. Disponível em: <<http://conferences.koyauniversity.org/index.php/pas/2018/paper/view/106>>. Acesso em: 7 jan. 2024
- AIT SAID, H.; NOURI, H.; ZEBBOUDJ, Y. Effect of air flow on corona discharge in wire-to-plate electrostatic precipitator. **Journal of Electrostatics**, v. 73, p. 19–25, 2015.
- ALI, M. et al. Novel hybrid composite discharge electrode for electrostatic precipitator. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 67, n. 9, p. 1036–1045, 2017.
- ANDRADE, R. G. S. A. A. **Precipitador eletrostático: influência das condições operacionais e dos eletrodos de descarga na eficiência de remoção de nanopartículas**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2020.
- ANDRADE, R. G. S. A.; GUERRA, V. G. Discharge electrode influence on electrostatic precipitation of nanoparticles. **Powder Technology**, v. 379, p. 417–427, fev. 2021.
- ARIF, S. et al. The influence of design parameters on the occurrence of shielding in multi-electrode ESPs and its effect on performance. **Journal of Electrostatics**, v. 93, n. June, p. 17–30, 2018.
- BADAMI, M. M. et al. Design, optimization, and evaluation of a wet electrostatic precipitator (ESP) for aerosol collection. **Atmospheric Environment**, v. 308, p. 119858, set. 2023.
- BYJU'S – The Learning App. Electrostatic Precipitator. 2020. Disponível em: <<https://byjus.com/physics/electrostatic-precipitator/>>. Acesso em: 14 maio 2020.
- CHEN, B. et al. Research on electrostatic shielding characteristics of electrostatic precipitator. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 0, n. 0, 2021.
- CRESPO, B. et al. Performance of a lab-scale tubular-type electrostatic precipitator using a diesel engine particle emission source. **Energy**, v. 116, p. 1444–1453, 2016.
- DE NEVERS, N. **Air Pollution Control Engineering**. [s.l.] McGraw-Hill, 2000.
- DE 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. July, p. 1–9, 2018.
- DE OLIVEIRA, A. E.; GUERRA, V. G. Effect of low gas velocity on the nanoparticle collection performance of an electrostatic precipitator. **Separation Science and Technology (Philadelphia)**, v. 54, n. 7, p. 1211–1220, 2019.
- DONG, M. et al. Numerical study on electrohydrodynamic flow and fine-particle collection efficiency in a spike electrode-plate electrostatic precipitator. **Powder Technology**, v. 351, p. 71–83, 2019.

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, 2014.

EOM, Y. S.; KANG, D. H.; CHOI, D. H. Numerical analysis of PM<sub>2.5</sub> particle collection efficiency of an electrostatic precipitator integrated with double skin façade in a residential home. **Building and Environment**, v. 162, n. June, p. 106245, 2019.

EPA Region 1. EPA, 2023. Disponível em:  
<<https://www3.epa.gov/region1/airquality/avg8hr.html>>. Acesso em: 07 jan. 2024.

ESP Centralised. Purified Air, 2023. Disponível em: <<https://www.purifiedair.com/our-products/esp-ind-centralised/>>. Acesso em: 30 jan. 2024.

FALAGUASTA, M. C. R. et al. Overall collection efficiency of a plate-wire electrostatic precipitator operating on the removal of PM<sub>2.5</sub>. **Latin American Applied Research**, v. 38, n. 2, p. 179–186, 2008.

GAO, M. et al. Dust removal performance of two-stage electrostatic precipitators and its influencing factors. **Powder Technology**, v. 348, p. 13–23, abr. 2019.

GAO, W. et al. Numerical simulation of particle migration in electrostatic precipitator with different electrode configurations. **Powder Technology**, v. 361, p. 238–247, 2020.

GLOBALSPEC, 2012. Electrostatic Precipitators Information. Disponível em:  
<[https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing\\_process\\_equipment/air\\_quality/electrostatic\\_precipitators](https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/air_quality/electrostatic_precipitators)>. Acesso em: 07 jan. 2024.

GUO, B. Y. et al. Process modelling of low temperature electrostatic precipitators. **Powder Technology**, v. 314, p. 567–576, 2017.

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, 2018a.

HE, Z.; DASS, E. T. M. Correlation of design parameters with performance for electrostatic Precipitator. Part I. 3D model development and validation. **Applied Mathematical Modelling**, v. 57, p. 633–655, 2018b.

HEO, J.; LEE, J.; PARK, D. Effects of Brush-Type Ionizer Materials on Virus Inactivation. **Toxics**, v. 10, n. 10, p. 611, 14 out. 2022.

HINDS, W. C. Electrical Properties. In: \_\_\_\_\_. *Aerosol Technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. 2. ed. New York: John Wiley, 1999. Cap 15, p 316–348.

HUANG, Y. et al. Recent progress of dry electrostatic precipitation for PM<sub>2.5</sub> emission control from coal-fired boilers. **International Journal of Plasma Environmental Science and Technology**, v. 9, n. 2, p. 69–126, 2015.

JAWOREK, A. et al. Two-stage electrostatic precipitators for the reduction of PM<sub>2.5</sub> particle emission. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 67, p. 206–233, 2018.

- JIANAN, W. et al. Experimental study on the impact of electrostatic effect on the movement of charged particles. **Journal of Electrostatics**, v. 94, n. January, p. 14–20, 2018.
- KACI, M. et al. Investigation on the Corona Discharge in Blade-to-Plane Electrode Configuration. **Brazilian Journal of Physics**, v. 45, n. 6, p. 643–655, 2015.
- KANG, M. S. et al. Collection and decomposition of oil mist via corona discharge and surface dielectric barrier discharge. **Journal of Hazardous Materials**, v. 411, p. 125038, jun. 2021.
- KARLSSON, H. L. et al. Size-dependent toxicity of metal oxide particles—A comparison between nano- and micrometer size. **Toxicology Letters**, v. 188, n. 2, p. 112–118, jul. 2009.
- 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, 2016a.
- 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, 2016b.
- 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, 2017.
- KIM, H.-J. et al. Fine Particle Removal Performance of a Two-Stage Wet Electrostatic Precipitator Using a Nonmetallic Pre-Charger. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 61, n. 12, p. 1334–1343, dez. 2011.
- KIM, Y.-S. et al. Improvement of an In-Duct Two-Stage Electrostatic Precipitator via Diffusion Charging. **Toxics**, v. 10, n. 11, p. 686, 12 nov. 2022.
- KRUPA, A. et al. Velocity field of EHD flow during back corona discharge in electrostatic precipitator. **Powder Technology**, v. 344, p. 475–486, 2019.
- LARSEN, P. S.; SØRENSEN, S. K. Effect of secondary flows and turbulence on electrostatic precipitator efficiency. **Atmospheric Environment (1967)**, v. 18, n. 10, p. 1963–1967, 1984.
- LEE, Y. et al. Removal of Mist Particles by a Two-Stage Electrostatic Precipitator Featuring Plastic Plate Electrodes. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 58, n. 3, p. 3985–3991, maio 2022.
- LI, S. et al. Experimental and theoretical study of the collection efficiency of the two-stage electrostatic precipitator. **Powder Technology**, v. 356, p. 1–10, 2019a.
- LI, S. et al. A numerical model for predicting particle collection efficiency of electrostatic precipitators. **Powder Technology**, v. 347, p. 170–178, 2019b.
- LI, Z. et al. Novel Wire-on-Plate Electrostatic Precipitator (WOP-EP) for Controlling Fine Particle and Nanoparticle Pollution. **Environmental Science & Technology**, v. 49, n. 14, p. 8683–8690, 21 jul. 2015.

LIMA, F. DE A. **Avaliação de diferentes condições geométricas e operacionais de precipitadores eletrostáticos na coleta de nanopartículas**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2021.

LIN, G.-Y. et al. An Efficient Single-Stage Wet Electrostatic Precipitator for Fine and Nanosized Particle Control. **Aerosol Science and Technology**, v. 44, n. 1, p. 38–45, jan. 2010.

LIN, G.-Y.; CHEN, T.-M.; TSAI, C.-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.

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, set. 2016.

MACHADO, D. R.; MERCURI, E. G. F.; NOE, S. M. Approximations of the extended Graetz problem to quantify particulate matter transport and deposition in tubes. **Applied Mathematical Modelling**, v. 112, p. 708–725, dez. 2022.

MARTIN, C. et al. Environmental, health and safety assessment of nanoparticle application in drilling mud – Review. **Geoenergy Science and Engineering**, v. 226, p. 211767, jul. 2023.

MOLCHANOV, O. et al. Predicting efficiency for electrostatic precipitation of fly ash from small-scale solid fuel combustion. **Separation and Purification Technology**, v. 270, p. 118807, set. 2021.

MORAWSKA, L.; BUONANNO, G. The physics of particle formation and deposition during breathing. **Nature Reviews Physics**, v. 3, n. 5, p. 300–301, 2021.

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, 2016a.

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, 2016b.

NOURI, H. et al. Analysis of electric field and current density in an electrostatic precipitator. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 23, n. 2, p. 665–670, 2016.

OMS. Ambient (outdoor) air pollution, WHO, 2021. Disponível em: <[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)> . Acesso em: 23 jan. 2022.

PADRÕES de Qualidade do Ar. CETESB, 2023. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>>. Acesso em: 07 jan. 2024.

PARK, D. H. et al. A Study on the Particle Removal Efficiency and Durability According to the Material of the Ionizer of the Fiber Brush Type Electric Precipitator. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 59, n. 1, p. 486–491, jan. 2023.

PARK, J. W. et al. Computational fluid dynamic modelling of particle charging and collection in a wire-to-plate type single-stage electrostatic precipitator. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 18, n. 3, p. 590–601, 2018.

PARKER, K. R. **Applied Electrostatic Precipitation**. London: Blackie Academic & Professional, 1997a.

PARKER, K. R. (ED.). **Applied Electrostatic Precipitation**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997b.

PEDCo Environmental, Inc. OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL FOR ELECTROSTATIC PRECIPITATORS. EPA/625/1-85/017, 1985. Disponível em: <[https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=125968](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=125968)>. Acesso em: 07 jan. 2024.

RIBA, J. R.; MOROSINI, A.; CAPELLI, F. Comparative study of ac and positive and negative dc visual corona for sphere-plane gaps in atmospheric air. **Energies**, v. 11, n. 10, 2018.

SÃO PAULO (Estado). Decreto-lei nº 59.113, de 23 de abril de 2013. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/qualidade-ar/wp-content/uploads/sites/28/2013/12/decreto-59113de230413.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2018.

SARDARI, P. T. et al. Nano-particle deposition in the presence of electric field. **Journal of Aerosol Science**, v. 126, n. April, p. 169–179, 2018.

SENOTAY, 2018. Precipitador electrostático de espacio amplio KWD / RD. Disponível em: <<https://es.senotay.com/dust-collector/rd-wide-space-electrostatic-precipitator.html>>. Acesso em: 21 maio 2020.

SH. ISLAMOV, R. Influence of gas velocity on the particle collection and reentrainment in an air-cleaning electrostatic precipitator. **Aerosol Science and Technology**, v. 52, n. 12, p. 1415–1428, 2018.

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.

ŚWIERCZOK, A.; JĖDRUSIK, M. The collection efficiency of ESP model - Comparison of experimental results and calculations using Deutsch model. **Journal of Electrostatics**, v. 91, n. December 2017, p. 41–47, 2018.

ŚWIERCZOK, A.; JĖDRUSIK, M.; ŁUSZKIEWICZ, D. Reduction of mercury emissions from combustion processes using electrostatic precipitators. **Journal of Electrostatics**, v. 104, n. June 2019, 2020.

TAVARES, A. A. Metodologia para análise do comportamento fluidodinâmico multifásico em precipitadores eletrostáticos. 2015. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

- TIAN, Y. et al. Development and experimental investigation of the narrow-gap coated electrostatic precipitator with a shield pre-charger for indoor air cleaning. **Separation and Purification Technology**, v. 309, p. 123114, mar. 2023.
- WANG, X. Effects of corona wire distribution on characteristics of electrostatic precipitator. **Powder Technology**, v. 366, p. 36–42, 2020.
- WEN, T. Y.; SU, J. L. Corona discharge characteristics of cylindrical electrodes in a two-stage electrostatic precipitator. **Heliyon**, v. 6, n. 2, p. e03334, 2020.
- XUE, Q.-Z.; WEN, T.-Y. Separating Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles from high-speed flue gas by an induced flow recirculation in two-stage electrostatic precipitator. **Separation and Purification Technology**, v. 234, p. 116105, mar. 2020.
- YANG, Z. et al. Insights into the role of particle space charge effects in particle precipitation processes in electrostatic precipitator. **Powder Technology**, v. 339, p. 606–614, 2018.
- ZHANG, J. et al. Trapping PM<sub>2.5</sub> particles from electrostatic precipitator equipped with magnetic field under different gas velocities. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 158, p. 115–122, 2022.
- ZHENG, C. et al. Numerical simulation of corona discharge and particle transport behavior with the particle space charge effect. **Journal of Aerosol Science**, v. 118, n. January, p. 22–33, 2018a.
- ZHENG, C. et al. Numerical simulation of corona discharge and particle transport behavior with the particle space charge effect. **Journal of Aerosol Science**, v. 118, n. October 2017, p. 22–33, 2018b.
- ZHENG, C. et al. Numerical simulation of corona discharge and particle transport behavior with the particle space charge effect. **Journal of Aerosol Science**, v. 118, n. January, p. 22–33, 2018c.
- ZHOU, W. et al. Study on multi-physical field characteristics of electrostatic precipitator with different collecting electrodes. **Powder Technology**, v. 381, p. 412–420, 2021.
- ZHU, Y. et al. Enhancement of air purification by unique W-plate structure in two-stage electrostatic precipitator: A novel design for efficient capture of fine particles. **Advanced Powder Technology**, v. 31, n. 4, p. 1643–1658, abr. 2020.
- 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, 2000.
- ZIEDAN, H. et al. Onset Voltage of Corona Discharge in Wire-Duct Electrostatic Precipitators. **International Journal of Plasma Environmental Science and Technology**, v. 4, n. 1, p. 36–44, 2010.
- ZIEDAN, H. A. et al. An experimental implementation and testing of the corona discharge in wire-duct electrostatic precipitators affected by velocities of incoming flow gases. **Measurement**, v. 177, n. February, p. 109296, 2021.

ZUKERAN, A. et al. Effect of collection efficiency and reducing ozone generation in an electrostatic precipitator with knife edge disk type electrode. **Journal of Electrostatics**, v. 125, p. 103842, set. 2023.

## APÊNDICE A – DETALHAMENTO DA UNIDADE EXPERIMENTAL DO CAPÍTULO 4

A seguir, estão detalhados o funcionamento e as especificações técnicas dos principais equipamentos utilizados na unidade experimental descrita no Capítulo 4.

- Filtro de Purificação de Ar

Após ser fornecido ao sistema pelo compressor, o ar passa por um filtro de purificação de ar TSI modelo 3074B (Figura 59). Desse modo, são removidas gotículas de óleo ou outros líquidos presentes no ar por meio de dois pré-filtros utilizados. Por fim, utiliza-se um secador por membrana e um filtro externo de elevada eficiência, responsáveis por reter a umidade do ar e remover partículas finas, respectivamente. Com relação às especificações técnicas, esse equipamento opera até uma vazão máxima de ar 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 59 - Filtro de purificação.**

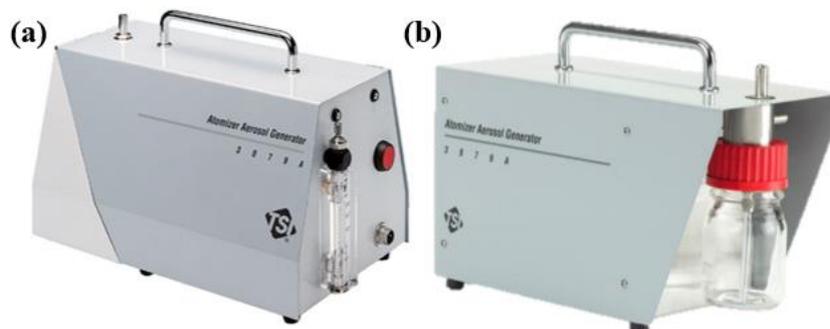


Fonte: TSI, 2019.

- Gerador de Nanopartículas

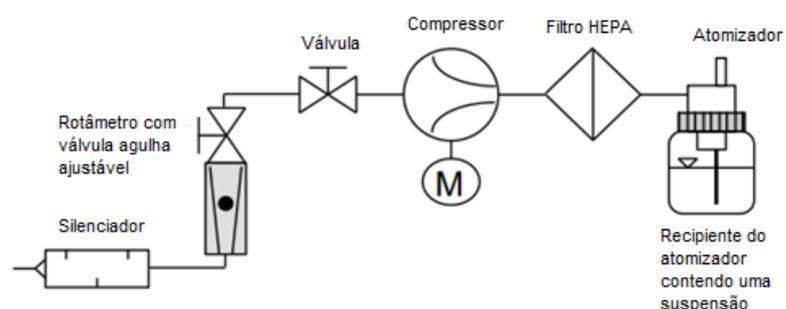
Paralelamente, o aerossol é formado no gerador (ou atomizador) de nanopartículas TSI (modelo 3019 A), como visto na Figura 60. A solução de NaCl utilizada para geração do aerossol é inserida no recipiente presente no lado anterior do atomizador (Figura 60b) e a vazão é controlada por uma válvula agulha acoplada a um rotâmetro no lado posterior do equipamento (Figura 60a). Os componentes internos do gerador de nanopartículas podem ser visualizados na Figura 61. De acordo com o manual do fabricante (TSI, 2014), o equipamento possui um compressor interno que fornece o ar comprimido utilizado. Antes de entrar no atomizador, o ar passa através de um filtro HEPA para reter quaisquer impurezas. Além disso, o equipamento possui uma válvula de alívio de pressão a fim de proteger o recipiente de vidro caso ocorra algum excesso de pressão. Os experimentos foram realizados com uma vazão de 200 L/h.

**Figura 60 - Gerador de nanopartículas, vista dos lados: (a) posterior e (b) anterior.**



Fonte: TSI, 2014.

**Figura 61 - Representação esquemática do interior do gerador de partículas.**



Fonte: Adaptado de TSI, 2014.

- Secador por Difusão

Em seguida, o aerossol gerado passa por um secador por difusão (Figura 62), que possui um extrator para coleta das gotículas de água de maior diâmetro. O secador apresenta um formato cilíndrico e o caminho percorrido pelo aerossol é delimitado por uma tela cilíndrica de alumínio concêntrica e de menor diâmetro. A região anular entre os dois cilindros é preenchida com sílica-gel, que remove o excesso de umidade por difusão. Como o aerossol não escoo diretamente através da sílica-gel, a perda de partículas nesse equipamento é mínima (TSI, 2019).

**Figura 62 - Secador por difusão.**



Fonte: TSI, 2019.

- Neutralizador de Aerossol de Kr-85

Após a remoção da umidade, o aerossol passa por um neutralizador de aerossol TSI (modelo 3054), exibido na Figura 63. A operação desse equipamento se baseia no decaimento beta a partir de uma fonte neutralizador de Criptônio-85, que ioniza a atmosfera circundante, e forma íons positivos e negativos. As partículas com elevada carga podem ser neutralizadas pela captura de íons de polaridade oposta. Após um curto tempo, as partículas atingem uma carga de equilíbrio, de modo que o aerossol transporte uma distribuição bipolar. O equipamento é formado por dois cilindros concêntricos, sendo o cilindro interno de aço inoxidável com 0,05 mm de espessura. O cilindro interno é completamente fechado e contém em seu interior Criptônio-85 inerte gasoso. Assim, o aerossol escoar no espaço anular entre o cilindro interno e a carcaça externa (TSI, 2012). O neutralizador de Amerício-241, localizado posteriormente na unidade experimental, possui o mesmo princípio de funcionamento que o neutralizador de Criptônio-85, mas utiliza o decaimento do tipo alfa

**Figura 63 - Neutralizador de aerossol.**



Fonte: TSI, 2019.

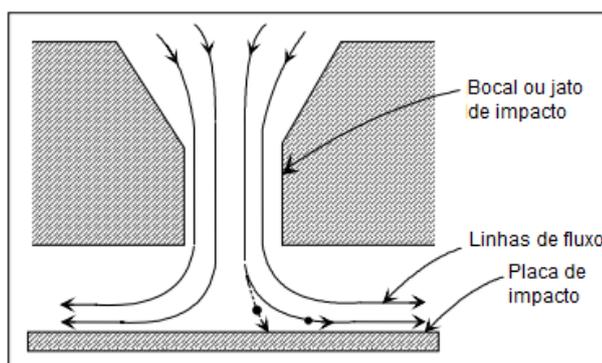
- Classificador Eletrostático

Após as partículas serem amostradas na entrada ou saída do precipitador eletrostático e passarem pelo neutralizador de Amerício-241, essas seguem para o classificador de partículas TSI (modelo 3080), que possui um analisador de mobilidade diferencial (DMA) TSI (modelo 3081 longo) acoplado, exibido na Figura 64.

**Figura 64 - Classificador eletrostático.**

Fonte: TSI, 2009.

Antes do aerossol entrar no interior do classificador eletrostático, ele passa primeiramente por um impactador localizado na parte mais externa do equipamento que retém as partículas de maior diâmetro. Para isso, utiliza-se a impactação inercial, ou seja, o fluxo de aerossol é acelerado através de um bocal em direção à uma placa plana (Figura 65), que desvia as linhas de fluxo em 90°. Uma vez que as partículas maiores possuem maior inércia, essas não conseguem seguir as linhas de fluxo e colidem com a placa. Por outro lado, as partículas de menor diâmetro apresentam uma menor inércia e seguem as linhas de fluxo, sem colidir com a placa plana, e saem do impactador em direção ao DMA (TSI, 2009).

**Figura 65 - Vista transversal do impactador.**

Fonte: Adaptado de TSI (2009).

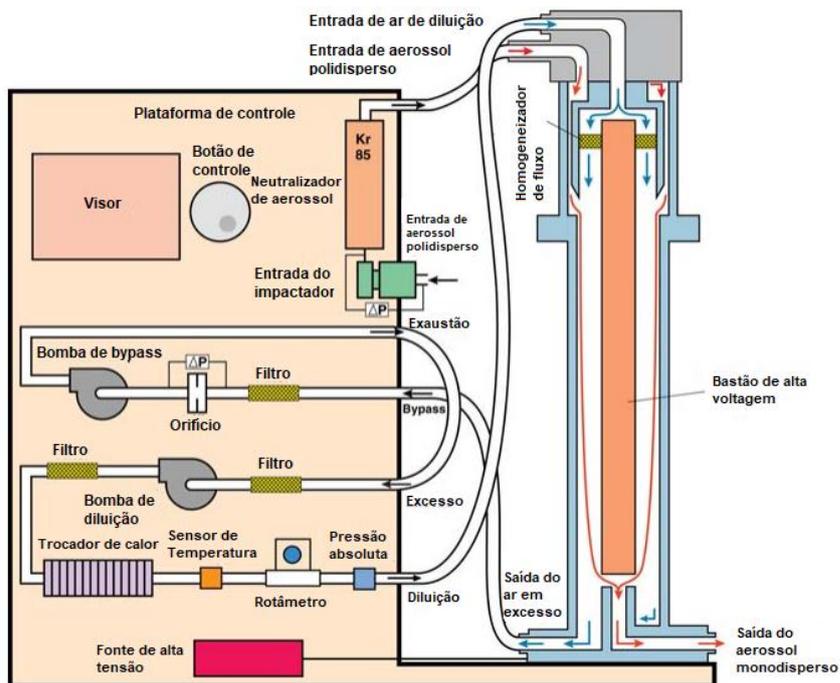
Os componentes internos do classificador eletrostático e do DMA são exibidos na Figura 66. Esse equipamento possui um controle interno de vazão que permite especificar os valores da vazão do ar de diluição e da amostra, obedecendo uma razão de 10:1. Nos experimentos realizados, foram adotados os valores de 15 e 1,5 L/min, respectivamente. A faixa

de diâmetro de partículas analisada varia de acordo com as vazões selecionadas, nesse caso, para partículas entre 6,15 e 241,4 nm.

No interior do equipamento, o ar de diluição (filtrado) segue por uma câmara anular na parte superior do DMA e passa através de uma tela dupla de malha de nylon fino a fim de homogeneizar o fluxo. O fluxo de ar escoar axialmente na região do classificador. Por sua vez, o escoamento polidisperso, proveniente do impactador, entra no DMA através de um outro tubo também localizado na parte superior e escoar na direção axial descendente entre dois cilindros concêntricos para distribuir uniformemente o escoamento e a concentração (TSI, 2009).

O escoamento anular referente ao aerossol polidisperso é introduzido na região do classificador e unido suavemente ao ar de diluição. O aerossol circunda o núcleo do ar de diluição, e ambos os escoamentos passam pelo ânulo sem ocorrer a mistura dos dois escoamentos laminares. O cilindro interno, bastão coletor, é mantido a uma voltagem negativa controlada, enquanto o cilindro externo é eletricamente aterrado, criando um campo elétrico entre os dois cilindros. Dessa forma, as partículas positivamente carregadas são atraídas através do ar filtrado para o bastão coletor carregado negativamente. As partículas são precipitadas ao longo de todo o comprimento do bastão coletor, com as de maior mobilidade elétrica depositadas na região superior do bastão e as de menor mobilidade na região inferior. As partículas negativamente carregadas são depositadas no eletrodo externo, enquanto as partículas descarregadas (neutras) são removidas sem serem afetadas pelo escoamento de ar em excesso. As partículas com um curto alcance de mobilidade elétrica atingem uma fenda com doze buracos no eletrodo central e escoam através do isolador inferior. Assim, essas partículas deixam o DMA na forma de um escoamento monodisperso, e são encaminhadas para o contador de partículas (TSI, 2009).

**Figura 66 - Esquema do fluxo no interior do classificador com DMA longo.**



Fonte: Adaptado de TSI (2009).

- Contador de Partículas

Após a saída do classificador eletrostático, as partículas seguem para o contador de partículas por condensação ultrafino (UCPC) TSI (modelo 3776), mostrado na Figura 67. Posicionado na parte superior do equipamento através de um suporte, está localizado um recipiente contendo butanol, componente necessário para o funcionamento do contador de partículas. Um filtro HEPA está conectado na saída do equipamento para a retenção de partículas.

**Figura 67 - Contador de partículas.**

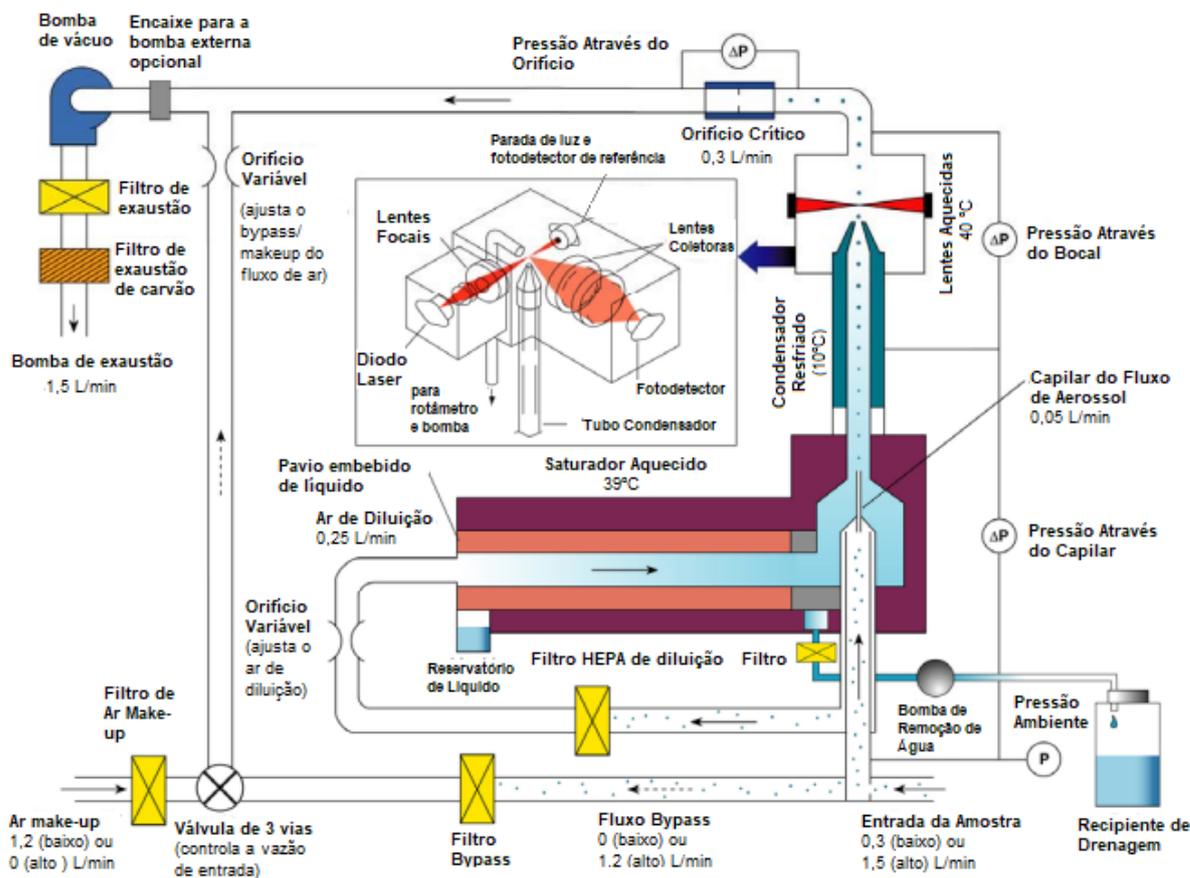


Fonte: TSI (2006).

A Figura 68 exibe uma representação do interior do equipamento. O funcionamento do contador de partículas ocorre através da passagem contínua de uma amostra de aerossol através de um capilar. A amostra é então misturada com o escoamento do ar de diluição limpo, proveniente do saturador aquecido a 39°C, onde o butanol é vaporizado e difundido na corrente de ar de diluição. A amostra de aerossol e o vapor de butanol passam juntos pelo condensador resfriado a 10°C, de forma que o vapor de butanol se torna supersaturado e pronto para condensar. As partículas presentes na corrente da amostra servem como núcleo de condensação, fazendo com que ocorra a chamada condensação heterogênea, a qual é estabelecida pelas temperaturas precisamente controladas no interior do contador de partículas. Uma vez iniciada a condensação, as partículas maiores que um diâmetro limite crescem rapidamente para gotículas maiores e passam através de um detector óptico, onde são facilmente contadas. A trajetória percorrida pelo escoamento de ar de diluição faz com que o percurso do fluxo de aerossol se confine próximo ao eixo do condensador, expondo as partículas à região de maior supersaturação e uniformidade do vapor de butanol (TSI, 2006; ANDRADE, 2020).

A amostra de aerossol é bombeada para o interior do contador de partículas por uma bomba de vácuo interna e a vazão de entrada pode ser configurada para o modo de operação de vazão alta (1,5 L/min) ou vazão baixa (0,3 L/min). A operação de vazão alta foi selecionada para os experimentos realizados a fim de melhorar o tempo de resposta e minimizar a perda no transporte das partículas. Nessa configuração, 1,2 L/min da vazão de entrada é desviada como *bypass* e 0,3 L/min da vazão de entrada passa através do saturador, condensador e das lentes, compreendendo o conjunto do sensor. A vazão de 0,3 L/min é controlada por um orifício crítico. Essa vazão é separada em 0,25 L/min do ar de diluição e 0,05 L/min da vazão de aerossol logo antes do capilar de fluxo de aerossol. Um filtro HEPA retém as partículas no ar de diluição e o ar limpo é bombeado através de um pavio embebido em butanol líquido, que evapora e satura a corrente de ar de diluição com vapor de butanol. A amostra de aerossol se une ao vapor saturado do ar de diluição imediatamente antes da entrada do condensador. A região em que essa junção ocorre possui uma pequena seção aquecida, que permite que o vapor se difunda no aerossol antes de entrar no condensador resfriado (TSI, 2006; ANDRADE, 2020).

Figura 68 - Representação do interior do contador de partículas.



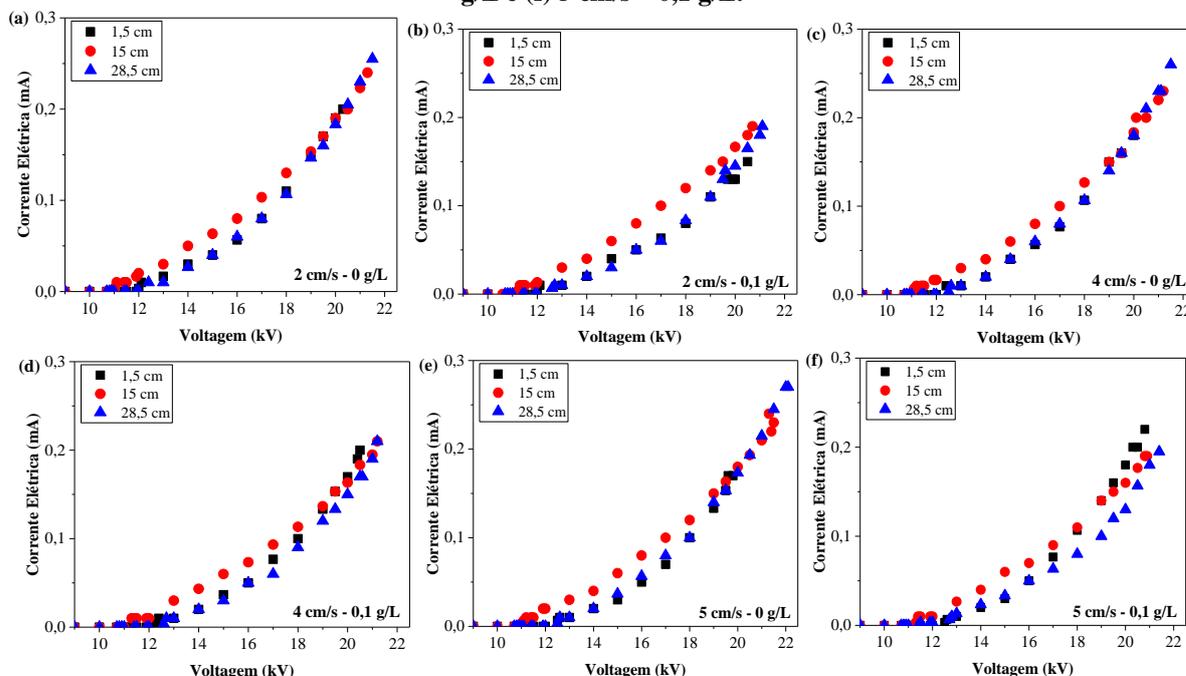
Fonte: Adaptado de TSI (2006).

As gotas passam pelo tubo condensador através de um bocal no detector óptico. O líquido que condensa nas paredes do tubo condensador escoar para baixo e retorna para o saturador, onde é absorvido pelo pavio para reuso. O detector do sensor óptico é composto de um diodo laser, lentes de colimação, lentes cilíndricas, lentes coletoras, e um detector fotodiodo. Cada um desses componentes desempenha um papel específico. O laser e as lentes de colimação formam uma faixa horizontal da luz do laser acima do bocal de saída do aerossol, as lentes coletoras e o detector incorporam um par de lentes esféricas que coletam a luz dispersa em 90° pelas gotas e focam a luz em um fotodiodo de baixo ruído. O feixe principal é bloqueado pela parada de luz na parte posterior da câmara do sensor e o fotodiodo de referência é usado para manter a potência do laser constante. A temperatura da superfície da carcaça óptica é mantida a um nível mais alto do que o saturador para evitar a condensação na superfície das lentes (TSI, 2006; ANDRADE, 2020).

## APÊNDICE B – CURVAS CORRENTE-TENSÃO

- Experimentos capítulo 4, subseção 4.3.2.1: 1 fio

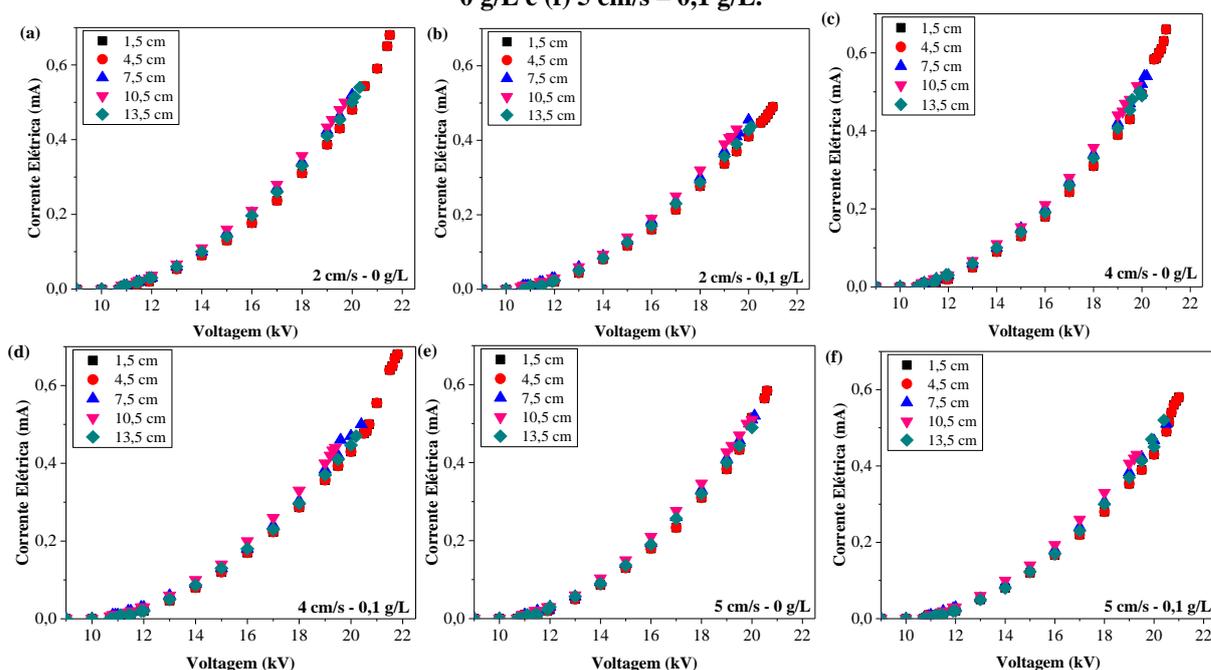
Figura 69 - Curvas corrente-tensão com 1 eletrodo de descarga em função dos diferentes espaçamentos de entrada para: (a) 2 cm/s - 0 g/L, (b) 2 cm/s - 0,1 g/L, (c) 4 cm/s - 0 g/L, (d) 4 cm/s - 0,1 g/L, (e) 5 cm/s - 0 g/L e (f) 5 cm/s - 0,1 g/L.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

- Experimentos capítulo 4, subseção 4.3.3.1: 3 fios

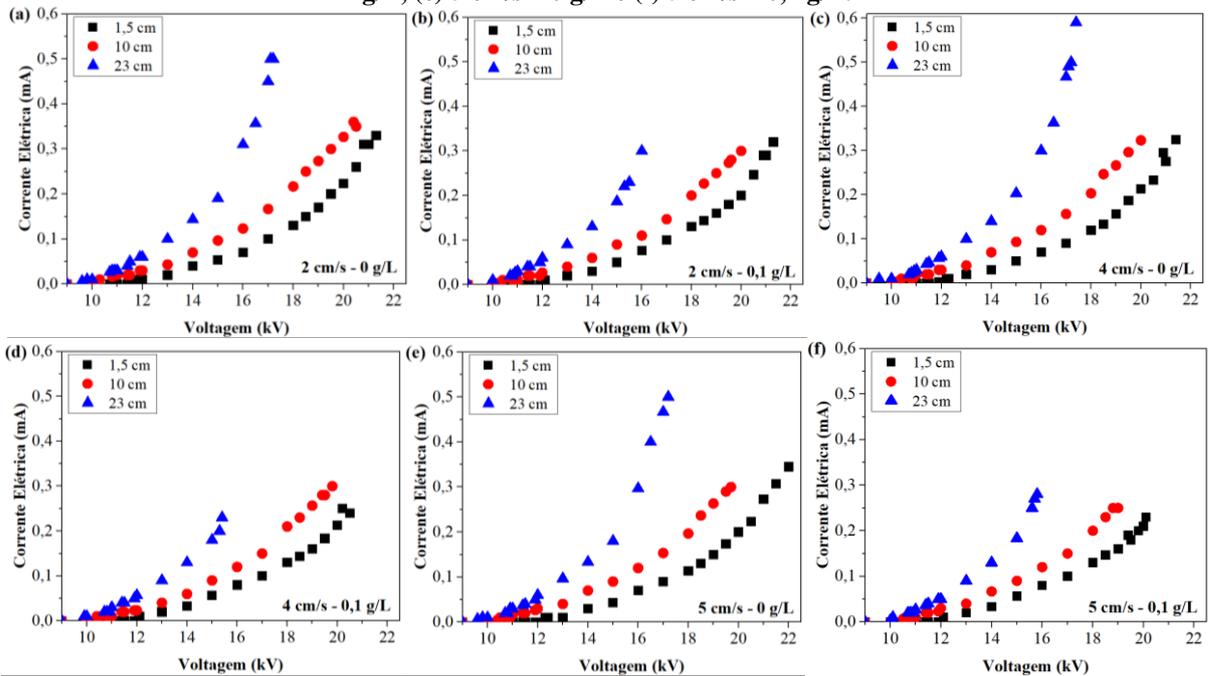
Figura 70 - Curvas corrente-tensão com 3 eletrodos de descarga em função dos diferentes espaçamentos de entrada para: (a) 2 cm/s - 0 g/L, (b) 2 cm/s - 0,1 g/L, (c) 4 cm/s - 0 g/L, (d) 4 cm/s - 0,1 g/L, (e) 5 cm/s - 0 g/L e (f) 5 cm/s - 0,1 g/L.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

- Experimentos capítulo 4, subseção 4.3.5.1: Tela coletora e 1 fio

Figura 71 - Curvas corrente-tensão com a tela coletora e 1 eletrodo de descarga em função dos diferentes espaçamentos de entrada para: (a) 2 cm/s - 0 g/L, (b) 2 cm/s - 0,1 g/L, (c) 4 cm/s - 0 g/L, (d) 4 cm/s - 0,1 g/L, (e) 5 cm/s - 0 g/L e (f) 5 cm/s - 0,1 g/L.



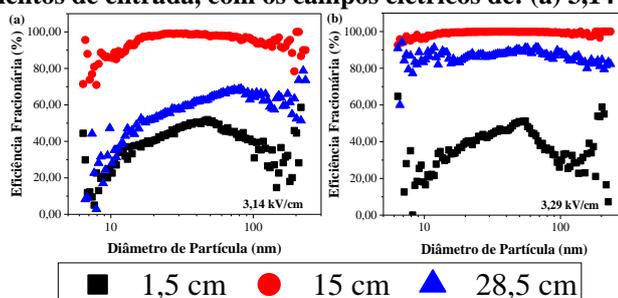
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

## APÊNDICE C – EFICIÊNCIAS FRACIONÁRIAS

- Experimentos capítulo 4, subsecção 4.3.2.3: 1 fio

1 cm/s

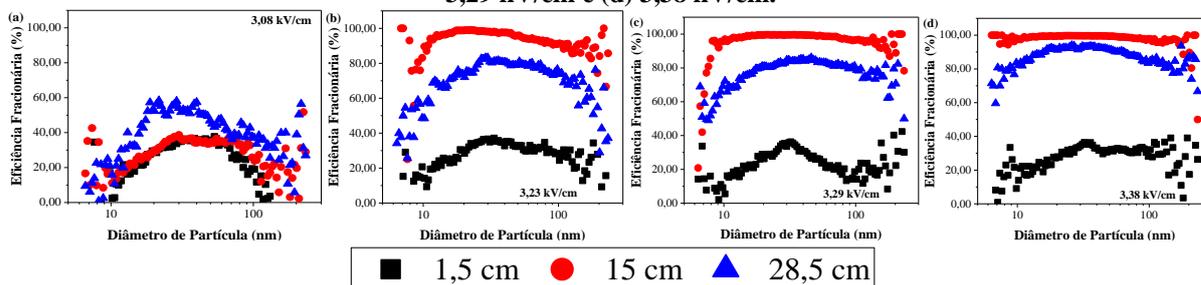
Figura 72 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga e com a velocidade do ar de 1 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,14 kV/cm e (b) 3,29 kV/cm.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

2 cm/s

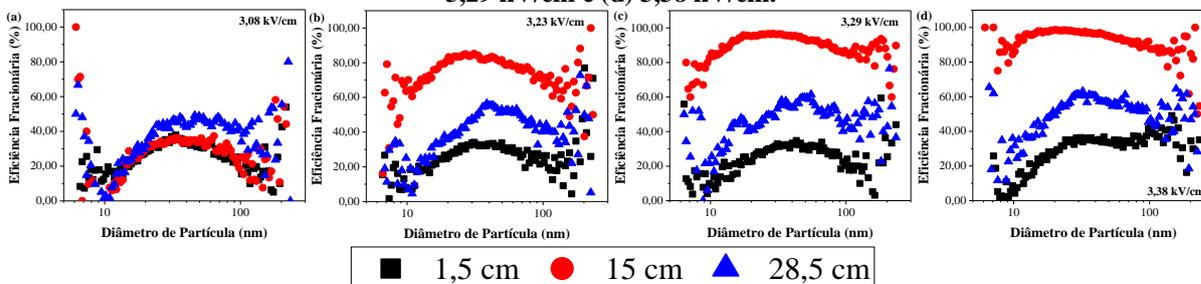
Figura 73 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga e com a velocidade do ar de 2 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,23 kV/cm, (c) 3,29 kV/cm e (d) 3,38 kV/cm.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4 cm/s

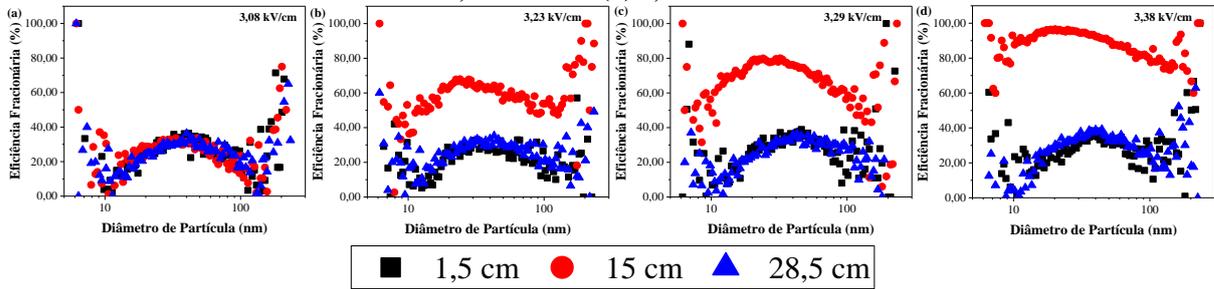
Figura 74 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga e com a velocidade do ar de 4 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,23 kV/cm, (c) 3,29 kV/cm e (d) 3,38 kV/cm.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

5 cm/s

Figura 75 - Eficiências fracionárias obtidas com 1 eletrodo de descarga e com a velocidade do ar de 5 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,23 kV/cm, (c) 3,29 kV/cm e (d) 3,38 kV/cm.

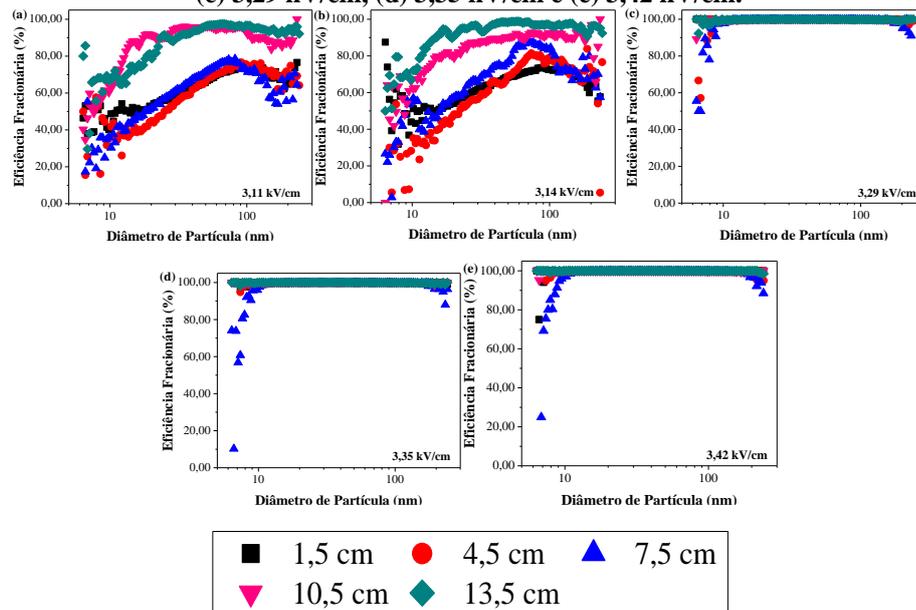


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

- Experimentos capítulo 4, subsecção 4.3.3.3: 3 fios

1 cm/s

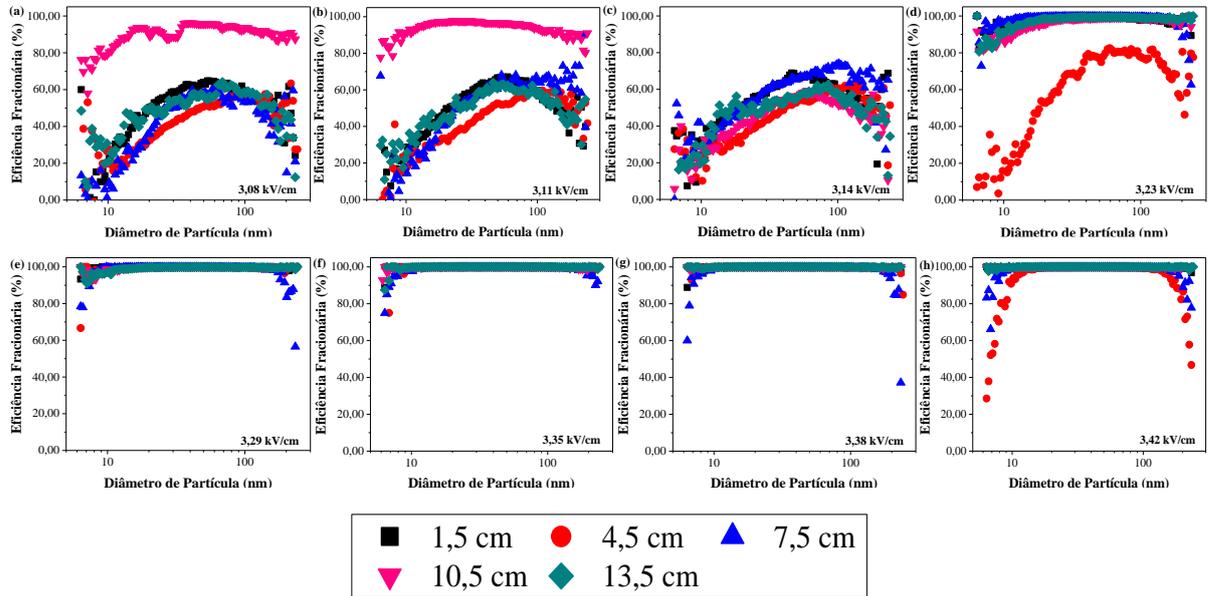
Figura 76 - Eficiências fracionárias obtidas com 3 eletrodos de descarga e com a velocidade do ar de 1 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,11 kV/cm, (b) 3,14 kV/cm, (c) 3,29 kV/cm, (d) 3,35 kV/cm e (e) 3,42 kV/cm.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

2 cm/s

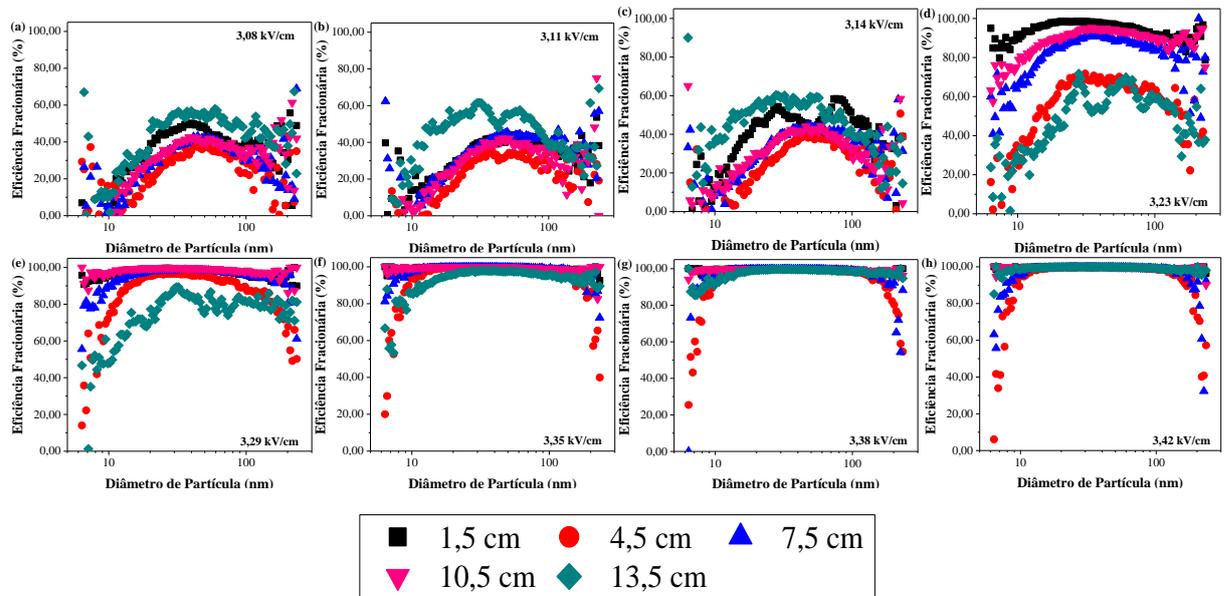
Figura 77 - Eficiências fracionárias obtidas com 3 eletrodos de descarga e com a velocidade do ar de 2 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,11 kV/cm, (c) 3,14 kV/cm, (d) 3,23 kV/cm, (e) 3,29 kV/cm, (f) 3,35 kV/cm, (g) 3,38 kV/cm e (h) 3,42 kV/cm.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4 cm/s

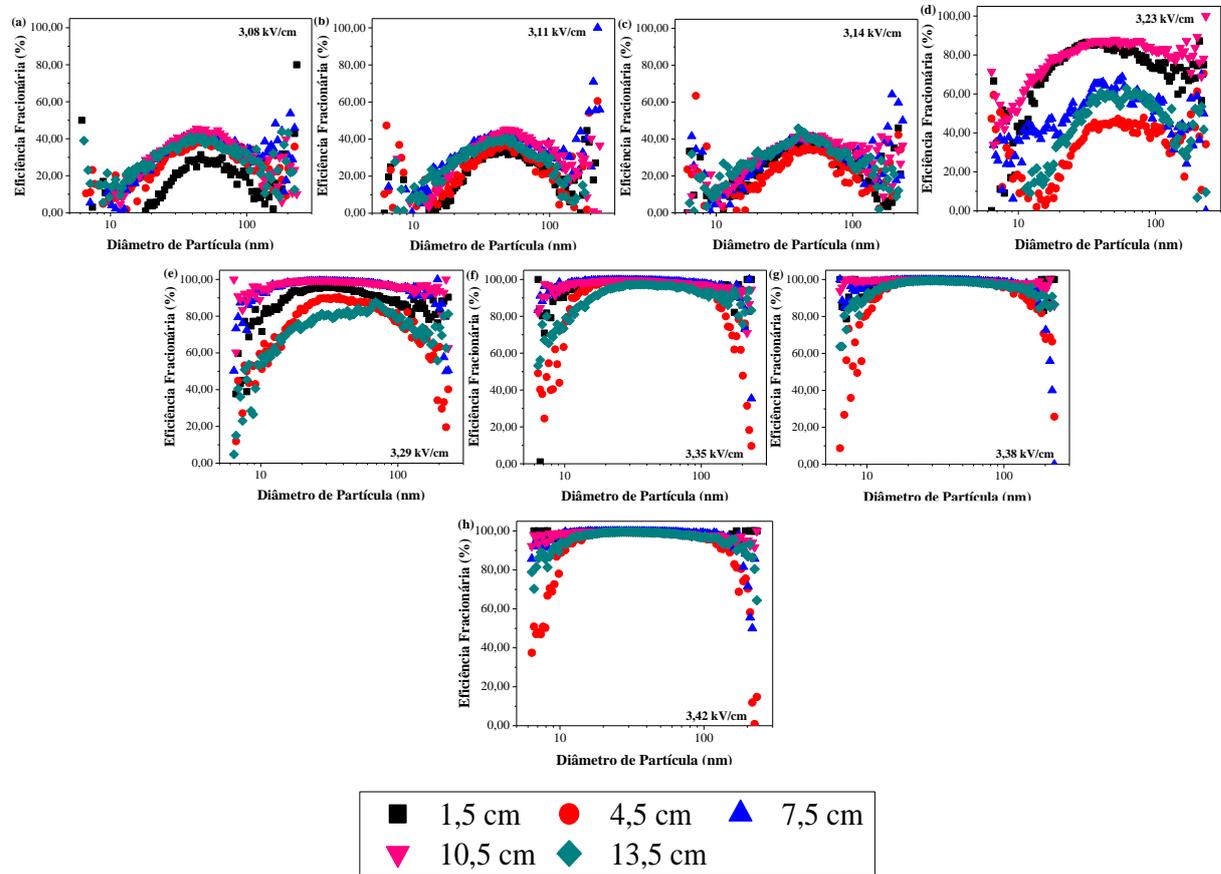
Figura 78 - Eficiências fracionárias obtidas com 3 eletrodos de descarga e com a velocidade do ar de 4 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,11 kV/cm, (c) 3,14 kV/cm, (d) 3,23 kV/cm, (e) 3,29 kV/cm, (f) 3,35 kV/cm, (g) 3,38 kV/cm e (h) 3,42 kV/cm.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

5 cm/s

Figura 79 - Eficiências fracionárias obtidas com 3 eletrodos de descarga e com a velocidade do ar de 5 cm/s, em função dos espaçamentos de entrada, com os campos elétricos de: (a) 3,08 kV/cm, (b) 3,11 kV/cm, (c) 3,14 kV/cm, (d) 3,23 kV/cm, (e) 3,29 kV/cm, (f) 3,35 kV/cm, (g) 3,38 kV/cm e (h) 3,42 kV/cm.

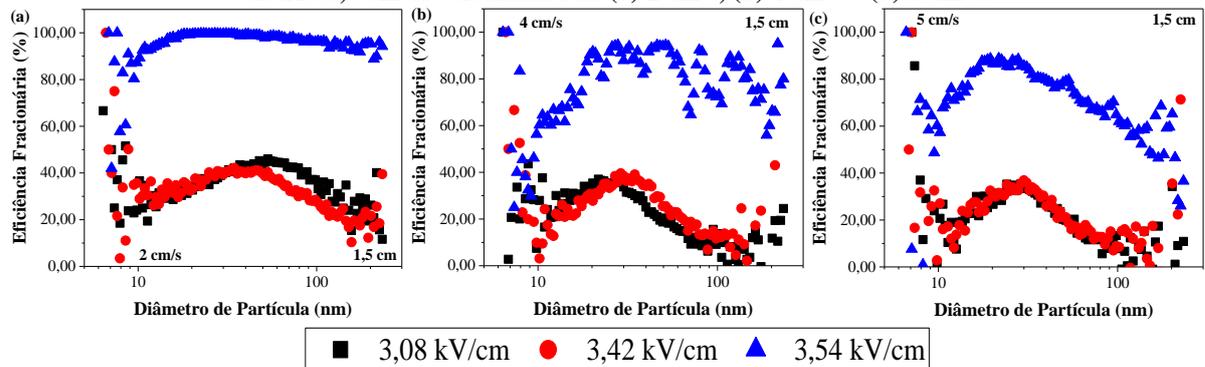


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

- Experimentos capítulo 4, subseção 4.3.5.5: tela coletora e 1 fio

1,5 cm

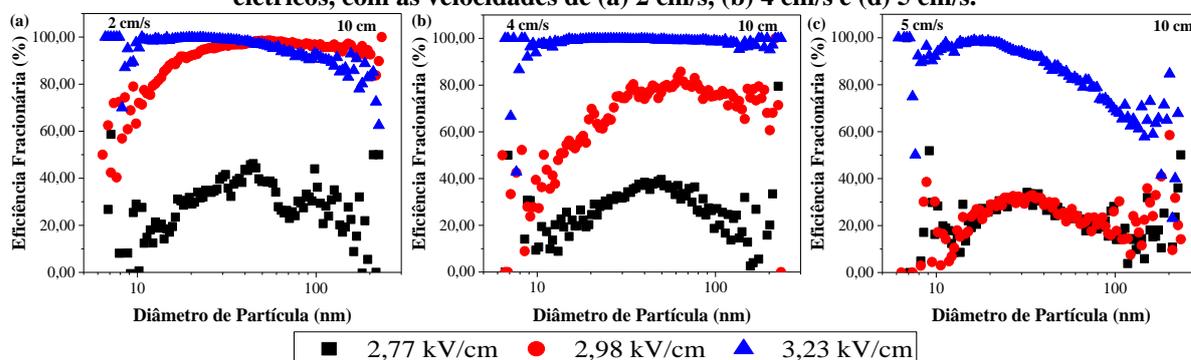
Figura 80 – Eficiências fracionárias obtidas com a distância de 1,5 cm (1 fio + tela) para diferentes campos elétricos, com as velocidades de (a) 2 cm/s, (b) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

## 10 cm

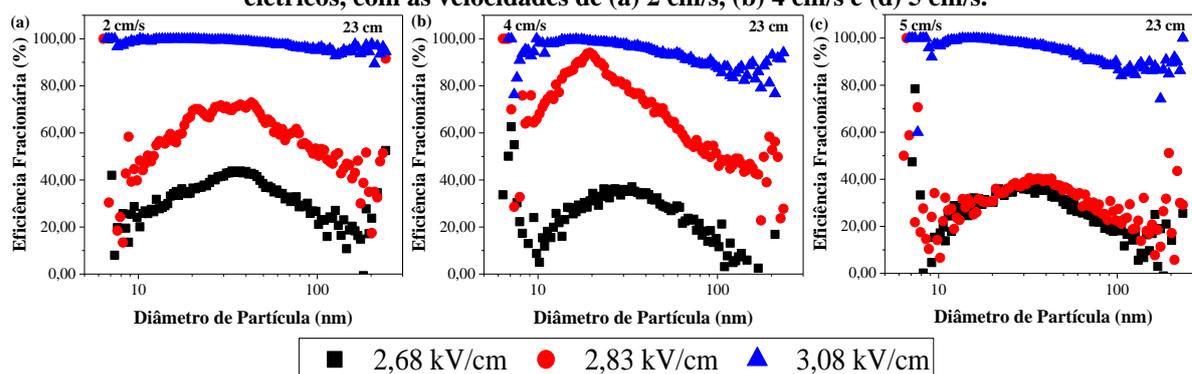
Figura 81 - Eficiências fracionárias obtidas com a distância de 10 cm (1 fio + tela) para diferentes campos elétricos, com as velocidades de (a) 2 cm/s, (b) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

## 23 cm

Figura 82 - Eficiências fracionárias obtidas com a distância de 23 cm (1 fio + tela) para diferentes campos elétricos, com as velocidades de (a) 2 cm/s, (b) 4 cm/s e (d) 5 cm/s.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.