

**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

**PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO: INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES
OPERACIONAIS E DOS ELETRODOS DE DESCARGA NA EFICIÊNCIA DE
REMOÇÃO DE NANOPARTÍCULAS**

São Carlos

2020

RAÍSSA GABRIELLE SILVA ARAÚJO ANDRADE

**PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO: INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES
OPERACIONAIS E DOSELETRODOS DE DESCARGA NA EFICIÊNCIA DE
REMOÇÃO DE NANOPARTÍCULAS**

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

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

São Carlos

2020

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE RAÍSSA GABRIELLE SILVA ARAÚJO ANDRADE APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 18 DE FEVEREIRO DE 2020.

BANCA EXAMINADORA:

Vádila Giovana Guerra Béttega
Vádila Giovana Guerra Béttega
Orientadora, UFSCar

Mônica Lopes Aguiar
Mônica Lopes Aguiar
UFSCar

Marcos Vinicius Rodrigues
Marcos Vinicius Rodrigues
UNIFAL

*“Uma parte de mim
é multidão:
outra parte estranheza
e solidão.*

*Uma parte de mim
pesa, pondera;
outra parte
delira.”*

(Ferreira Gullar)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades proporcionadas e por me confortar nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais, Goreti e Josiel, por me mostrarem a importância da educação, por me ensinarem a ser uma pessoa melhor e por estarem presentes mesmo com a distância. À minha irmã Bárbara, pelo amor incondicional e pela nossa cumplicidade única.

À minha prima-irmã, Ingrid, por sempre se fazer presente e por compartilhar tantas alegrias. Às minhas avós, Hilda e Catarina (*in memoriam*), meus tios e tias que dividiram comigo esse sonho.

À professora Vádila Giovana Guerra Béttega, por todo auxílio durante a execução desse trabalho e por todos os ensinamentos que me fizeram amadurecer profissionalmente. À professora Mônica Lopes Aguiar por todo o suporte oferecido.

Ao professor João Inácio Soletti, por despertar em mim o amor pela pesquisa, pelos anos de conhecimentos compartilhados e por todo acolhimento e incentivo.

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

À Karla Raphaela, pela amizade, apoio e paciência. Pela torcida em todos os momentos, por comemorar cada vitória e pelo incentivo durante os momentos de desânimo. Por ter se aventurado comigo e tornado essa jornada muito mais feliz.

À Jullyana Sirley, por me apoiar em cada etapa, por me ajudar mesmo quando eu acreditei não precisar e por nunca desistir de me tornar uma pessoa melhor.

Às minhas amigas, Coralina Moraes, Jéssica Rafaella e Roberta Nogueira, por me mostrarem o real significado de amizade e por fazerem minha vida mais feliz. Aos amigos tão especiais que a UFAL me deu: Letícia Leite, Iza Toledo e Renor Bernardo, por estarem ao meu lado durante toda a graduação. À Edilton Nunes, por sempre me ajudar quando precisei e pelo constante incentivo. À Pedro Rohenkohl, por ter se tornado um grande amigo.

Aos amigos do Controle Ambiental, pelo companheirismo diário e pelo auxílio na execução desse trabalho. À Laira Borges, por todo o carinho e por ter se tornado uma pessoa tão especial. À Thalyne Rocha, pela grande amizade que construímos e por me ensinar a valorizar as pequenas coisas da vida. À Luiz Daniel, pela amizade e apoio durante todos esses anos, e por me ajudar em todos os momentos que precisei.

À Universidade Federal de São Carlos, ao CNPq e à CAPES – Código de Financiamento 001, pelo suporte oferecido e pelo apoio financeiro, essencial para a execução desse trabalho.

RESUMO

As atividades industriais são a principal causa da emissão de material particulado, o que acarreta a elevação dos índices de poluição do ar e doenças respiratórias na população. Um dos equipamentos mais utilizados para redução da concentração das partículas emitidas na natureza é o precipitador eletrostático, pela sua alta versatilidade e por atingir elevada eficiência de coleta. Seu funcionamento consiste em ionizar o ar contendo partículas dispersadas que são carregadas eletricamente pelos íons formados e atraídas para os eletrodos de coleta, reduzindo a concentração de material particulado. A eficiência da precipitação eletrostática depende diretamente das condições operacionais e das características geométricas do equipamento. Com base no que foi exposto, o presente trabalho avaliou a influência das condições operacionais da velocidade do ar (1,03, 2,04 e 4,08 cm/s), do campo elétrico (3,08-3,38 kV/cm) e dos eletrodos de descarga na eficiência de remoção de nanopartículas de NaCl. O precipitador eletrostático utilizado foi do tipo placa-fio de simples estágio, com duas placas coletoras com altura e comprimento de 10 e 30 cm, respectivamente, espaçadas em 6,5 cm. Os estudos foram conduzidos em 3 etapas, a etapa 1 consistiu na variação do número de eletrodos de descarga (1-4), para o diâmetro de fio de 0,4 mm, espaçados em 6,5 cm, com as concentrações da solução de NaCl de 0,1 e 0,5 g/L. Na etapa 2, foram selecionadas as configurações que apresentaram menor eficiência de coleta na etapa 1 (experimentos com 1 e 2 fios), a fim de comparar os resultados obtidos com os experimentos realizados com um novo diâmetro de fio, 0,3 mm, espaçados em 6,5 cm. Na etapa 3, foi analisado o efeito do aumento do espaçamento entre os fios, os resultados dos experimentos realizados nas etapas anteriores com 2 fios de descarga, com os diâmetros de fio de 0,3 e 0,4 mm, foram comparados aos dados obtidos para ambos os diâmetros de fios, com o novo espaçamento de 12 cm. Os resultados comprovaram a eficiência do precipitador em remover nanopartículas, e evidenciaram o efeito negativo do aumento da velocidade na coleta de partículas. O aumento do campo elétrico favoreceu as eficiências de coleta, em decorrência das maiores correntes elétricas. Além disso, a redução do número de fios de descarga prejudicou a coleta de partículas na maior parte dos experimentos, visto que um menor número de emissores reduz a corrente elétrica gerada. Os dados obtidos com o diâmetro de fio de 0,3 mm comprovaram o efeito positivo da redução do diâmetro de fio na eficiência do precipitador, bem como o aumento do espaçamento entre os fios de descarga. Os resultados foram utilizados para determinação das forças de maior predominância no fenômeno da precipitação eletrostática, para as condições operacionais utilizadas. Pelos dados obtidos, foi identificado que as forças elétricas exercem maior influência na coleta de partículas, que são intensificadas com o aumento do campo elétrico. Em alguns casos, o mesmo comportamento ocorreu com o aumento do número de fios. Em contrapartida, o aumento da velocidade elevou a atuação das forças viscosas. Assim, os dados coletados mostraram que as melhores eficiências foram obtidas para a velocidade mais baixa, juntamente com o maior campo elétrico, 3,38 kV/cm, sendo a configuração de melhor desempenho a que utilizou 4 fios de descarga, com a concentração de 0,1 g/L, com 99,99% de remoção. Por fim foi realizada uma análise estatística com as principais condições operacionais de cada etapa, a partir da qual foi possível comprovar o efeito significativo do número de fios e do diâmetro dos fios, nas etapas 1 e 2. Entretanto, a análise dos dados da etapa 3 mostrou que o espaçamento entre os fios não foi significativo para os campos elétricos de 3,08 e 3,38 kV/cm e apresentou um efeito positivo muito pequeno para os campos elétricos de 3,08 e 3,23 kV/cm.

Palavras-chave: precipitador eletrostático; nanopartículas; eficiência de coleta.

ABSTRACT

The industrial activities are the main cause of the particulate material emission, which results in the elevation of air pollution indices and respiratory diseases. One of the most common types of equipment to reduce emitted particle concentration in the atmosphere is the electrostatic precipitator, for its high versatility and for achieving high collection efficiency. Its operation consists of the air ionization containing the dispersed particles which will be electrically charged by the ions formed and attracted to the collecting electrodes, which reduces the particulate material concentration. The efficiency of electrostatic precipitation depends directly on the operating conditions and the geometrical characteristics of the equipment. In this context, the present study evaluated the influence of the operating conditions such as air velocity (1.03, 2.04 and 4.08 cm/s), electrical field (3.08-3.38 kV/cm) and discharge electrodes on NaCl nanoparticles removal efficiency. The electrostatic precipitator used was a single-stage wire-plate type, with two collecting plates with a height and length of 10 and 30 cm, respectively, spaced 6.5 cm apart. The studies were conducted in 3 steps, step 1 consisted of the discharge electrode number variation (1-4), with a wire diameter of 0.4 mm, spaced apart in 6.5 cm, with NaCl solution concentration of 0.1 and 0.5 g/L. In step 2, the configurations that presented the lowest collection efficiency in step 1 (1 and 2 wire experiments) were selected to compare the results obtained with the experiments performed with a new wire diameter, 0.3 mm, spaced at 6.5 cm. In step 3, the effect of increased wire spacing was analyzed, and the results of the experiments carried out in the previous 2-wire discharge steps, with wire diameters of 0.3 and 0.4 mm, were compared to the obtained data. For both wire diameters, with the new 12 cm spacing. The results proved the precipitator's efficiency in removing nanoparticles and evidenced the negative effect of the velocity increase in particle collection. The electrical field improved the collection efficiencies, due to the higher electric currents. Also, reducing the number of discharge wires impaired particulate collection in most experiments, as fewer emitters reduce the generated electrical current. The data obtained with the wire diameter of 0.3 mm proved the positive effect of the wire diameter reduction in the precipitator efficiency, as well as the increase in the discharge wire spacing. The results were used to determine the most predominant forces in the phenomenon of electrostatic precipitation, for the operating conditions used. From the obtained data, it was identified that the electric forces exerted a greater influence on the particle collection, which was intensified with the increase of the electrical field. In some cases, the same behavior occurred with an increasing number of wires. In contrast, the increase in velocity increased the action of viscous forces. Thus, the data collected showed that the best efficiencies were obtained for the lowest speed, along with the largest electric field, 3.38 kV/cm, and the best performance configuration used 4 discharge wires, with a concentration of 0.1 g/L with 99.99% removal. Finally, a statistical analysis was performed with the main operating conditions of each step, from which it was possible to prove the significant effect of the number of wires and the diameter of the wires, in steps 1 and 2. However, the data analysis of the step 3 showed that the wire spacing was not significant for the 3.08 and 3.38 kV/cm electric fields and had a very small positive effect for the 3.08 and 3.23 kV/cm electric fields.

Key-words: electrostatic precipitator; nanoparticles; collection efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Penetração do material particulado no sistema respiratório.....	22
Figura 2: Ilustração exemplificada de diferentes ordens de grandeza.....	23
Figura 3: Representação do tamanho da partícula em meio gasoso	24
Figura 4 - Precipitador eletrostático industrial	26
Figura 5: Precipitador de (a) simples estágio e (b) duplo estágio	27
Figura 6: Precipitador do tipo (a) tubo-fio (b) e placa-fio.....	28
Figura 7: Tipos de eletrodos de descarga: (a) Haste lisa; (b) helicoidal; (c) fio e haste roscado; (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.	29
Figura 8 - Ilustração esquemática do processo de separação em precipitadores eletrostáticos	30
Figura 9: Campo elétrico no interior do precipitador eletrostático	30
Figura 10: Funcionamento do precipitador eletrostático.....	31
Figura 11: Desenvolvimento da avalanche de elétrons	31
Figura 12: Representação do (a) campo elétrico modificado por uma partícula condutora não- carregada e (b) campo elétrico após a partícula atingir a carga de saturação.....	33
Figura 13: Relação entre corrente e voltagem.....	35
Figura 14: Unidade experimental	46
Figura 15: Filtro de purificação	47
Figura 16: Gerador de nanopartículas: (a) vista do lado frontal e (b) vista do lado traseiro.	48
Figura 17: Representação esquemática do interior do gerador de partículas	48
Figura 18: Secador por difusão.....	48
Figura 19: Neutralizador de aerossol.....	49
Figura 20: Classificador eletrostático	49
Figura 21: Vista transversal do impactador	50
Figura 22: Esquema do fluxo no interior do classificador com longo DMA	51
Figura 23: Contador de partículas	52
Figura 24: Representação do interior do contador de partículas	53
Figura 25: Representação do precipitador eletrostático: (a) vista lateral; (b) vista superior	54
Figura 26: Indicação do número de fios no precipitador eletrostático (vista superior).....	56
Figura 27: Configuração do precipitador eletrostático utilizada na etapa 3	57

Figura 28: Distribuição granulométrica das nanopartículas na entrada do precipitador eletrostático nas velocidades de (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s e (c) 4,08 cm/s.....	60
Figura 29: Distribuição granulométrica mássica das nanopartículas de aerossol na entrada do precipitador eletrostático nas velocidades de (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s e (c) 4,08 cm/s	63
Figura 30: Concentração de partículas em função da velocidade de ar, geradas a partir de diferentes concentrações de solução.....	66
Figura 31: Curvas corrente-tensão para diferentes velocidades e concentrações de NaCl com: (a) e (b) 4 fios, (c) e (d) 3 fios, (e) e (f) 2 fios e (g) e (h) 1 fio.	68
Figura 32: Eficiência fracionária para a velocidade de 1,03 cm/s e concentração inicial de 0,1 g/L, com diferentes valores de campo elétrico nas configurações de: (a) 4 fios, (b) 3 fios, (c) 2 fios e (d) 1 fio	71
Figura 33: Eficiência fracionária para a velocidade de 2,04 cm/s e concentração inicial de 0,1 g/L, com diferentes valores de campo elétrico nas configurações de: (a) 4 fios, (b) 3 fios, (c) 2 fios e (d) 1 fio	72
Figura 34: Eficiência fracionária para a velocidade de 4,08 cm/s e concentração inicial de 0,1 g/L, com diferentes valores de campo elétrico nas configurações de: (a) 4 fios, (b) 3 fios, (c) 2 fios e (d) 1 fio	74
Figura 35: Eficiência Fracionária com a concentração inicial de 0,5 g/L para diferentes campos elétricos nas velocidades de: (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s e (c) 4,08 cm/s.....	75
Figura 36: Eficiências globais com a concentração inicial de 0,1 g/L para diferentes velocidades de ar nas configurações de: (a) 4 fios, (b) 3 fios, (c) 2 fios e (d) 1 fio	76
Figura 37: Eficiências globais para a concentração de solução de 0,5 g/L para cada configuração de fios nas velocidades de: (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s e (c) 4,08 cm/s	77
Figura 38: Curvas corrente-tensão com diferentes concentrações, para as condições operacionais de: (a) 1 fio - 1,03 cm/s, (b) 2 fios – 1,03 cm/s, (c) 1 fio – 2,04 cm/s, (d) 2 fios – 2,04 cm/s, (e) 1 fio – 4,08 cm/s, (f) 2 fios – 4,08 cm/s.....	82
Figura 39: Eficiências fracionárias para os campos elétricos de 3,08, 3,23 e 3,38 kV/cm, para os diâmetros de fio de 0,3 e 0,4 mm na configuração de 2 fios e: (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s, (c) 4,08 cm/s	83
Figura 40: Eficiências fracionárias para os campos elétricos de 3,08, 3,23 e 3,38 kV/cm, para os diâmetros de fio de 0,3 e 0,4 mm na configuração de 1 fio e: (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s, (c) 4,08 cm/s.....	84
Figura 41: Eficiências globais para os diâmetros de fio de 0,3 e 0,4 mm, para as velocidades de 1,03, 2,04 e 4,08 cm/s nas configurações de: (a) 2 fios e (b) 1 fio.....	85

Figura 42: Curvas corrente-tensão para os espaçamentos entre os 2 fios de 6,5 e 12 cm, para as configurações de: (a) 0,4 mm - 1,03 cm/s, (b) 0,4 mm - 2,04 cm/s, (c) 0,4 mm - 4,08 cm/s, (d) 0,3 mm - 1,03 cm/s, (e) 0,3 mm - 2,04 cm/s e (f) 0,3 mm - 4,08 cm/s.....	87
Figura 43: Eficiências fracionárias para os campos elétricos de 3,08, 3,23 e 3,38 kV/cm, para os diâmetros de fio de 0,4 mm para os espaçamentos de 6,5 e 12 cm e: (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s, (c) 4,08 cm/s.....	88
Figura 44: Eficiências fracionárias para os campos elétricos de 3,08, 3,23 e 3,38 kV/cm, para os diâmetros de fio de 0,3 mm para os espaçamentos de 6,5 e 12 cm e: (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s, (c) 4,08 cm/s.....	89
Figura 45: Eficiências globais para as velocidades de 1,03, 2,04 e 4,08 cm/s para os diâmetros de fio de: (a) 0,4 mm e (b) 0,3 mm.....	90
Figura 46: Valores de eficiência preditos versus observados na etapa 1.....	95
Figura 47: Diagrama de Pareto referente aos resultados da etapa 1	96
Figura 48: Superfícies de resposta referentes aos resultados de eficiência de coleta da etapa 1 em função de: (a) velocidade e número de fios, (b) campo elétrico e número de fios e (c) campo elétrico e velocidade	97
Figura 49: Valores de eficiência preditos versus observados na etapa 2.....	100
Figura 50: Diagrama de Pareto referente aos resultados da etapa 2.....	101
Figura 51: Superfícies de resposta referentes aos resultados de eficiência de coleta da etapa 2 em função de: (a) número de fios e diâmetro de fio, (b) velocidade e diâmetro de fio e (c) diâmetro de fio e campo elétrico e (d) campo elétrico e velocidade	102
Figura 52: Valores de eficiência preditos versus observados na etapa 3.....	105
Figura 53: Diagrama de Pareto referente aos resultados da etapa 3.....	106
Figura 54: Superfícies de resposta referentes aos resultados de eficiência de coleta da etapa 3 em função de: (a) diâmetro de fio e espaçamento entre os fios, (b) velocidade e espaçamento entre os fios (c) campo elétrico e espaçamento entre os fios e (d) campo elétrico e velocidade	107
Figura 55: Valores de eficiência preditos versus observados na etapa 3, com os níveis de 3,08 e 3,23 kV/cm	110
Figura 56: Diagrama de Pareto referente aos resultados da etapa 3, com os níveis de 3,08 e 3,23 kV/cm	110
Figura 57: Superfícies de resposta referentes aos resultados de eficiência de coleta da etapa 3 em função de: (a) diâmetro de fio e espaçamento entre os fios, (b) velocidade e espaçamento	

entre os fios (c) campo elétrico e espaçamento entre os fios e (d) campo elétrico e velocidade
..... 111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Padrões Estaduais de Qualidade do Ar.....	22
Tabela 2: Experimentos realizados na Etapa 1	56
Tabela 3: Experimentos realizados na etapa 2.....	57
Tabela 4: Experimentos realizados na etapa 3.....	57
Tabela 5: Mediana e σ da distribuição do material particulado (em unidades numéricas) com diferentes velocidades de ar.....	62
Tabela 6: Mediana e σ da distribuição mássica do aerossol em função da velocidade.....	63
Tabela 7: Concentração de partículas de NaCl 0,1 g/L com diferentes configurações de fios, para as velocidades e campos elétricos utilizados, antes da passagem pelo precipitador eletrostático.....	64
Tabela 8: Concentração de partículas de NaCl 0,5 g/L com diferentes configurações de fios, para as velocidades e campos elétricos utilizados, antes e após a passagem pelo precipitador eletrostático.....	65
Tabela 9: Tempos de residência para diferentes velocidades.....	67
Tabela 10: Eficiência global para diferentes velocidades e campos elétricos para as concentrações de 0,1 e 0,5 g/L	78
Tabela 11: N_{EHD}/Re^2 para os experimentos realizados com 0,1 g/L.....	80
Tabela 12: $NEHD/Re^2$ para os experimentos realizados com 0,5 g/L.....	80
Tabela 13: $NEHD/Re^2$ para os experimentos realizados com 0,1 g/L, nas configurações de 1 e 2 fios	86
Tabela 14: N_{EHD}/Re^2 para os experimentos realizados com 2 fios, espaçados em 6,5 e 12 cm.....	91
Tabela 15: Eficiências globais dos experimentos realizados com a velocidade de 1,03 cm/s e campo elétrico de 3,38 kV/cm.....	92
Tabela 16: Efeito estimado, erro puro, valor de t e grau de significância estatística (p) para os dados da etapa 1.....	93
Tabela 17: Análise de variância do modelo ajustado para a eficiência de coleta de partículas na etapa 1.....	94
Tabela 18: Efeito estimado, erro puro, valor de t e grau de significância estatística (p) para os dados da etapa 2.....	98
Tabela 19: Análise de variância do modelo ajustado para a eficiência de coleta de partículas na etapa 2.....	99

Tabela 20: Efeito estimado, erro puro, valor de t e grau de significância estatística (p) para os dados da etapa 3.....	103
Tabela 21: Análise de variância do modelo ajustado para a eficiência de coleta de partículas na etapa 3.....	104
Tabela 22: Efeito estimado, erro puro, valor de t e grau de significância estatística (p) para os dados da etapa 3, com os níveis de 3,08 e 3,23 kV/cm	108
Tabela 23: Análise de variância do modelo ajustado para a eficiência de coleta de partículas na etapa 3, com os níveis de 3,08 e 3,23 kV/cm	109

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definição	Unidade
λ	Caminho Livre Médio	μm
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)	$^{\circ}\text{C}$
δ	Densidade Relativa do Gás	Adimensional
b	Mobilidade Elétrica dos Íons	m^2/Vs
E	Campo Elétrico	V/m
I	Corrente da Descarga Corona	A
V	Voltagem	V
V_0	Voltagem de Início da Corona	V
A	Constante da Lei de Townsend	A/V
ϵ_0	Permissividade Elétrica	As/Vm
l_d	Comprimento do Fio de Descarga	m
s	Distância entre os Eletrodos de Coleta e Descarga	m
r_0	Raio do Eletrodo de Descarga	m
d	Constante	m
a	Espaçamento entre os Fios	m
η	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	m^2
Q	Taxa de Fluxo Volumétrico do Gás	m^3/s
h	Altura dos Eletrodos de Coleta	m
Q_p	Carga de Saturação	As
μ	Viscosidade do Gás	kg/ms
C	Coefficiente de Cunningham	Adimensional
K_n	Número de Knudsen	Adimensional
Z	Mobilidade Elétrica das Partículas	m^2/Vs
N_{EHD}	Número Eletro-hidrodinâmico	Adimensional
Re	Número de Reynolds	Adimensional
σ	Desvio Padrão Geométrico	nm
m	Expoente da Equação da Corrente Elétrica	Adimensional
b	Coefficiente Linear da Reta	Adimensional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo Geral.....	20
2.2 Objetivos Específicos	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 Legislação Ambiental	21
3.2 Propriedades das Nanopartículas	23
3.3 Precipitador Eletrostático.....	25
3.4 Fenômenos Envolvidos na Precipitação Eletrostática	30
3.5 Eficiência de Coleta	36
3.6 Estado da Arte.....	40
4 METODOLOGIA.....	45
4.1 Unidade Experimental	45
4.1.1 Principais Equipamentos da Unidade Experimental	47
4.1.2 Precipitador Eletrostático	54
4.2 Procedimento Experimental.....	55
4.2.1 Etapa 1: Variação do Número de Fios.....	55
4.2.2 Etapa 2: Variação do Diâmetro dos Fios	56
4.2.3 Etapa 3: Variação do Espaçamento Entre os Fios	57
4.3 Número Eletro-Hidrodinâmico	58
4.4 Análise Estatística.....	59
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1 Resultados da Etapa 1	60
5.1.1 Propriedades do Aerossol	60
5.1.2 Curvas Corrente-Tensão	67
5.1.3 Eficiência de Coleta de Partículas	69

5.1.4	Número Eletro-Hidrodinâmico.....	79
5.2	Resultados da Etapa 2.....	81
5.2.1	Curvas Corrente-Tensão.....	81
5.2.2.	Eficiência de Coleta de Partículas.....	82
5.2.3	Número Eletro-Hidrodinâmico.....	85
5.3	Resultados da Etapa 3.....	86
5.3.1	Curvas Corrente-Tensão.....	86
5.3.2	Eficiência de Coleta de Partículas.....	88
5.3.3	Número Eletro-Hidrodinâmico.....	91
5.4	Comparação Entre as Etapas.....	91
5.5	Análise Estatística.....	92
5.5.1	Etapa 1.....	92
5.5.2	Etapa 2.....	97
5.5.3	Etapa 3.....	102
6	CONCLUSÕES.....	112
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar sofreu um aumento considerável nos últimos anos em decorrência da crescente atividade industrial, e agravou a liberação na atmosfera de material particulado, que é constituído por partículas sólidas e líquidas de diversos tamanhos. Ao serem inaladas, essas partículas penetram no sistema respiratório e acarretam problemas respiratórios e cardiovasculares na população. Quanto menor o tamanho da partícula, maior será o alcance dessa no sistema respiratório, como é o caso das nanopartículas (QIAO *et al.*, 2015). Dessa forma, fez-se necessário o estabelecimento de uma legislação mais rigorosa, visando a redução da emissão desses poluentes. Atualmente, no Brasil, estão em vigor os padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013 e está prevista uma redução desses limites nos próximos anos.

Como forma de diminuir a concentração de material particulado liberado no meio ambiente, foram desenvolvidos equipamentos que retêm grande parte das partículas, dentre eles os filtros de manga, precipitadores eletrostáticos, ciclones e lavadores. Os precipitadores eletrostáticos são muito utilizados por atingirem elevada eficiência e permitirem o reaproveitamento do material coletado (ZHENG *et al.*, 2018).

O princípio de funcionamento desse equipamento é baseado na aplicação de forças eletrostáticas para coleta de partículas no ar, removendo-as da corrente de gás. Um ou mais eletrodos de descarga são dispostos entre duas placas coletoras ou no centro de um cilindro, caracterizando os precipitadores do tipo placa-fio ou tubo-fio, respectivamente. Um campo elétrico é criado pelo fornecimento de alta voltagem aos eletrodos de descarga, produzindo íons gasosos que colidem com as partículas do fluxo de gás, carregando-as pelos mecanismos de campo ou difusão. Uma vez carregadas, essas partículas migram para as superfícies de coleta onde podem ser removidas periodicamente (CRESPO *et al.*, 2016).

Além disso, podem ser de simples ou duplo estágio, no qual o processo de carregamento e remoção é realizado em diferentes etapas. Os precipitadores mais utilizados industrialmente são os do tipo placa-fio de simples estágio. De acordo com Bin *et al.*, (2017) esses equipamentos podem remover entre 95-98% de partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5 μm ($\text{MP}_{2,5}$), especialmente para aquelas com diâmetro entre 0,1 e 1 μm . Assim, reforça-se a importância da utilização desse tipo de equipamento a fim de reduzir a concentração de partículas liberadas na atmosfera.

A eficiência de remoção depende do tipo de precipitador utilizado, das características geométricas (dimensões da placa coletora, número de eletrodos de descarga, espaçamento entre eles e diâmetro do fio) e das condições operacionais (voltagem, velocidade e concentração). Cada combinação de variáveis fornece resultados de eficiência diferentes.

Na literatura são poucos os trabalhos que avaliam a coleta de nanopartículas utilizando o precipitador eletrostático, como o trabalho de Oliveira e Guerra (2018), e se limitam, em sua maioria, a análise das características elétricas e das condições operacionais. Dessa forma, o presente trabalho teve por objetivo estudar a influência da velocidade e da voltagem na eficiência de remoção de nanopartículas, utilizando diferentes números de eletrodos de descarga.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar a influência das condições operacionais e dos parâmetros de projeto de um precipitador eletrostático do tipo placa-fio de simples estágio na eficiência de coleta de nanopartículas de cloreto de sódio (NaCl).

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento das curvas corrente-tensão para as diferentes configurações do precipitador eletrostático;
- Analisar a influência da concentração de NaCl, da velocidade do ar, do número de eletrodos de descarga (fios), do diâmetro dos fios, do espaçamento entre os fios e do campo elétrico na eficiência de coleta de nanopartículas;
- Realizar a análise estatística dos resultados obtidos;
- Determinar qual configuração apresentou a maior eficiência de coleta de nanopartículas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido ao aumento da poluição atmosférica e dos problemas de saúde decorrentes da inalação de material particulado, foi necessário estabelecer uma legislação ambiental que limitasse as concentrações de partículas nas emissões industriais. Esses limites, detalhados na subseção 3.1, foram estabelecidos por órgãos brasileiros, como a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que se basearam nos limites estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS).

3.1 Legislação Ambiental

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2018), os poluentes atmosféricos são gases e partículas sólidas (poeiras, pós e fumos), resultantes das atividades humanas e de fenômenos naturais, dispersos no ar atmosférico. Dentre os principais poluentes, encontra-se o material particulado, que é caracterizado por um conjunto de poluentes constituído de poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho (CETESB, 2018a).

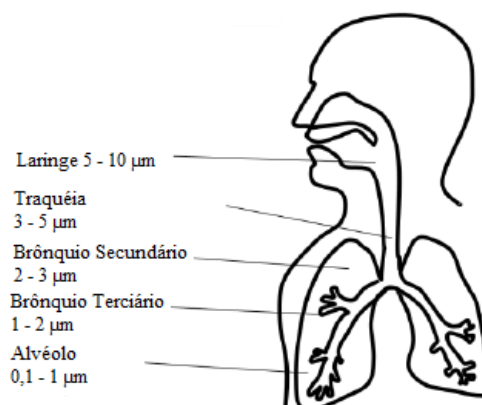
Essas partículas são classificadas em inaláveis (MP_{10}) e inaláveis finas ($MP_{2,5}$), ou seja, são as partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 e 2,5 μm , respectivamente. As partículas inaláveis podem ficar retidas na parte superior do sistema respiratório e as partículas inaláveis finas penetram profundamente no sistema respiratório (CETESB, 2018a). A Figura 1 mostra a penetração dos diferentes tamanhos de partículas no sistema respiratório.

Com o aumento dos estudos envolvendo nanotecnologia, o efeito prejudicial da inalação das nanopartículas já foi comprovado. QIAO *et al.*, (2015) afirmam que as nanopartículas são um risco potencial para a saúde e estão associadas com câncer de pulmão e mortalidade cardiopulmonar. Isso ocorre, pois, essas partículas podem entrar nas vias aéreas inferiores e atingir os alvéolos pulmonares, podendo passar pelo epitélio alveolar para o espaço intrapleural. Além disso, a inflamação pulmonar pode ser causada quando exposta a algumas nanopartículas.

Os primeiros padrões de qualidade do ar foram estabelecidos pelo Decreto Estadual nº 8468/76, e em 2005 a Organização Mundial da Saúde (OMS) realizou a revisão dos valores de poluentes permitidos. Isso acarretou na publicação do Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013, que estabeleceu novos padrões de qualidade do ar (Tabela 1) através de metas a serem cumpridas progressivamente. Atualmente está em vigor a meta intermediária 1, após seu

cumprimento, entrarão em vigor as metas intermediárias 2 e 3 (CETESB, 2018b), e o objetivo é atingir os padrões finais expostos na Tabela 1, que são os valores determinados pela OMS.

Figura 1: Penetração do material particulado no sistema respiratório



Fonte: Adaptado de Meiller *et al.*, (2015).

Nos próximos anos está prevista uma redução nas concentrações permitidas e a inclusão de limites para as nanopartículas, visto que a legislação vigente abrange até as partículas de tamanho micrométrico.

Tabela 1: Padrões Estaduais de Qualidade do Ar

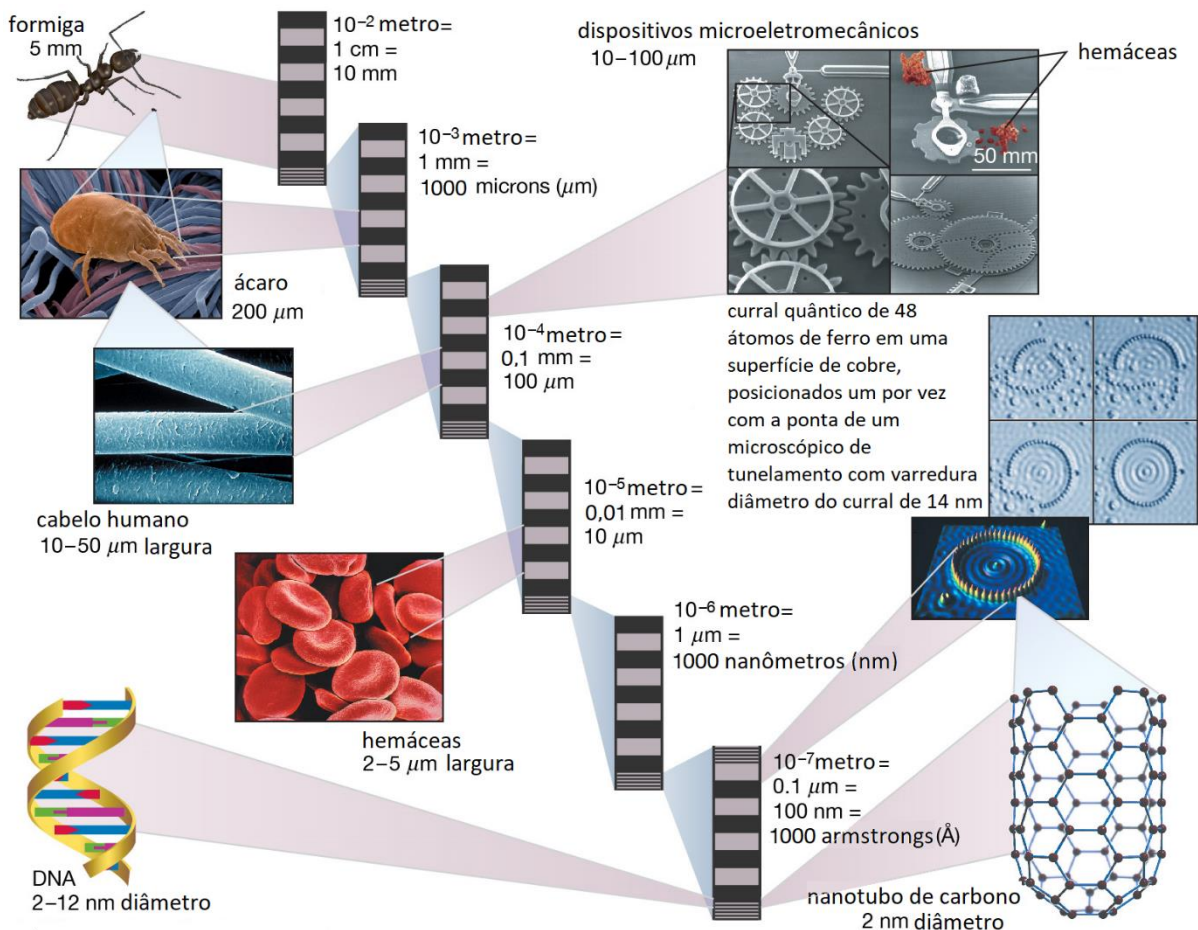
Poluente	Tempo de Amostragem	Meta Intermediária 1	Meta Intermediária 2	Meta Intermediária 3	Padrões Finais ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
		($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
Partículas Inaláveis (MP_{10})	24 horas	120	100	75	50
	Média Aritmética Anual	40	35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

Fonte: BRASIL, 2013.

3.2 Propriedades das Nanopartículas

As partículas de poluentes possuem uma distribuição granulométrica variada, contendo partículas de diferentes diâmetros, inclusive de tamanho nanométrico. As nanopartículas são definidas como aquelas que possuem ao menos uma dimensão inferior a 100 nm, com ordem de grandeza de 10^{-9} m, e são consideradas como um subconjunto dos colóides. A Figura 2 apresenta uma exemplificação comparativa das diferentes ordens de grandeza. Embora pareçam simples moléculas, as nanopartículas são misturas complexas e diferentes aspectos desse tipo de material devem ser levados em consideração, como, por exemplo, a área superficial (CHRISTIAN *et al.*, 2008).

Figura 2: Ilustração exemplificada de diferentes ordens de grandeza

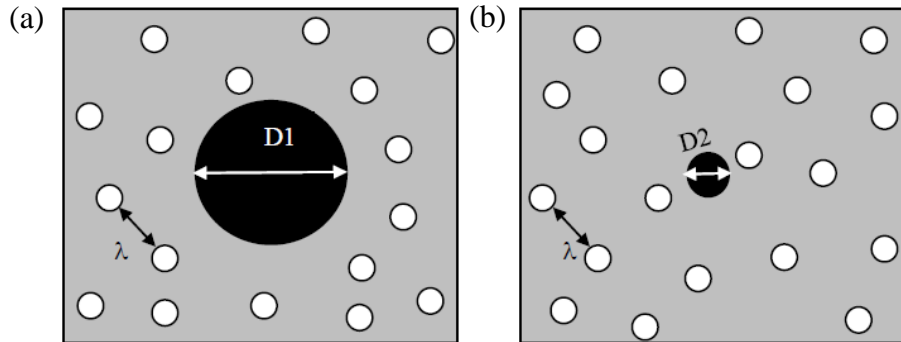


Fonte: Adaptado de King, Jarvie e Dobson, 2019.

Quando se trabalha com nanopartículas deve-se considerar a influência do caminho livre médio (λ), definido como a distância percorrida por uma molécula entre duas colisões

sucessivas (PALANDI *et al.*, 2010). Se a partícula for muito maior que o caminho livre médio considera-se o meio como contínuo (Figura 3-a), enquanto para partículas extremamente pequenas o fluido é tratado como descontínuo (Figura 3-b). Isto é, quando as partículas são menores que um determinado tamanho de caminho livre médio elas se comportam de maneira diferente, devido às interações entre as partículas e as moléculas de gás (HESKETH, 1996).

Figura 3: Representação do tamanho da partícula em meio gasoso



Fonte: OLIVEIRA, 2019.

O caminho livre médio é dado pela Equação 1 (PARKER, RIEHLE e KRIGMONT, 1997), onde p e T são a pressão e a temperatura do gás, respectivamente. Para as condições normais de pressão (p_0) e temperatura (T_0), ou seja, 1 atm e 25°C, o valor do caminho livre médio é de aproximadamente 65 nm.

$$\lambda(p, T) = \frac{\lambda(p_0, T_0)}{\delta} \quad (1)$$

Onde δ é a densidade relativa do gás, dada pela lei dos gases ideais (Equação 2). Essa equação relaciona a densidade do gás nos estados 1 e 2 e é função da temperatura e da pressão. Na maioria dos casos, o estado 1 possui as condições normais de temperatura e pressão.

$$\delta = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_2}{p_1} \times \frac{T_1}{T_2} \quad (2)$$

Relacionado com o caminho livre médio das moléculas de gás, tem-se a mobilidade elétrica dos íons do gás. A mobilidade é definida como a propriedade que descreve o movimento das partículas carregadas em um campo elétrico relativo ao fluido circundante (INCULET, TANASESCU e CRAMARIUC, 1999). Segundo Parker, Riehle e Krigmont (1997), a mobilidade dos íons (b) é definida como a razão entre a velocidade média de migração (v) dos transportadores de cargas e a intensidade do campo elétrico (E). A mobilidade elétrica

comumente utilizada para íons gasosos nas condições normais é $2,10 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$ e, para as demais condições, pode ser calculada através da Equação 3. A velocidade média de migração dos transportadores de carga é determinada pela frequência de colisão com outras moléculas de gás (neutras). A frequência de colisão diminui com o aumento da distância intermolecular, então, a mobilidade é diretamente proporcional ao caminho livre médio das moléculas de gás (PARKER, RIEHLE e KRIGMONT, 1997).

$$b(p, T) = \frac{b(p_0, T_0)}{\delta} \quad (3)$$

Além da mobilidade elétrica do gás, deve ser considerado o efeito do movimento browniano sob as partículas de aerossol. Esse movimento foi estudado inicialmente pelo botânico Robert Brown em 1828, que observou os movimentos irregulares de partículas de pólen suspensas em água, e, posteriormente, foi analisado sob o ponto de vista físico, por cientistas como Albert Einstein, e relacionado aos fenômenos difusivos. Dessa forma, o movimento browniano pode ser definido como o movimento aleatório das partículas em suspensão, causado por colisões sucessivas entre essas partículas (KARATZAS e SHREVE, 1998; BESSADA, 2005). Esse fenômeno possui um papel importante na precipitação eletrostática das nanopartículas, uma vez que a colisão entre elas auxilia no carregamento elétrico das partículas.

3.3 Precipitador Eletrostático

Para realizar a limpeza do ar é possível utilizar equipamentos como ciclones, lavadores, filtros de manga e precipitadores eletrostáticos. Cada equipamento possui suas próprias características e um princípio de operação distinto. O precipitador eletrostático se destaca como uma opção viável devido à sua versatilidade, elevada eficiência de remoção de partículas, baixa queda de pressão e por permitir a reutilização direta do material coletado (CRESPO *et al.*, 2016). A Figura 4 exibe um precipitador eletrostático em escala industrial, o qual pode ter até cerca de 23 metros de altura e 25 metros de comprimento (SUNSUNGS, 2017).

Segundo Porle e Parker (1997), os precipitadores eletrostáticos são equipamentos utilizados em processos de separação gás-sólido. São utilizados em indústrias de geração de energia, de cimento, de aço e ferro, de papel, entre outras. Os principais componentes desse tipo de equipamento são os eletrodos de coleta e os eletrodos de descarga. A seção transversal dos eletrodos de descarga pode ser circular, quadrada ou ainda mais complicada, para aumentar

o campo elétrico local e então a eficiência da descarga corona (GUTIÉRREZ ORTIZ, NAVARRETE e CAÑADAS, 2011).

Figura 4 - Precipitador eletrostático industrial



Fonte: SUNSUNGS, 2017.

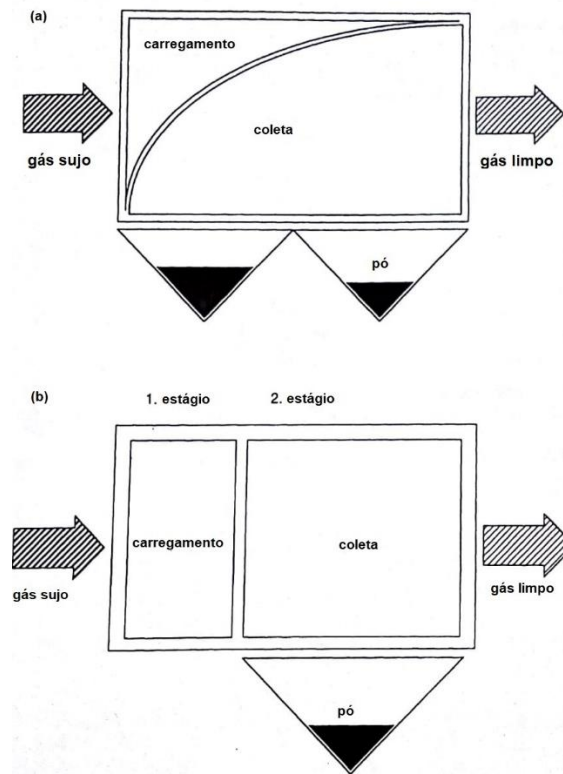
A descarga corona pode ser positiva ou negativa, para limpeza de gás industrial, a polaridade negativa é preferida por causa da sua maior estabilidade e maiores voltagens de operação e correntes elétricas possíveis. Kaci *et al.*, (2015) avaliaram os resultados obtidos com as correntes de polaridade negativa e positiva, e foi observado que a polaridade positiva fornecia correntes elétricas superiores, em até $400\mu\text{A}$, às obtidas com a polaridade positiva, para as mesmas voltagens utilizadas. No entanto, os sistemas de ventilação de ar *indoor* utilizam a polaridade positiva, pela menor geração de ozônio (WHITE, 1963).

Os precipitadores eletrostáticos são divididos em duas grandes categorias de operação: seca e úmida. O precipitador eletrostático seco é o mais utilizado, pois coleta e remove as partículas no estado seco. No caso do precipitador eletrostático úmido, a coleta do material particulado ocorre no estado úmido e a remoção das partículas do interior do equipamento é realizada através de lavagem com água (DUNKLE, 1997).

São subdivididos, de acordo com o número de estágios, em simples ou duplo estágio (Figura 5). Os precipitadores de duplo estágio possuem seções de carregamento e precipitação separadas, enquanto nos de simples estágio essas etapas ocorrem na mesma seção, ou seja, o mesmo campo elétrico que cria a corrente corona causa a precipitação. A configuração mais

utilizada industrialmente é a de simples estágio, sendo a de duplo estágio empregada em aplicações de pequena escala (HINDS, 1999; RIEHLE, 1997a).

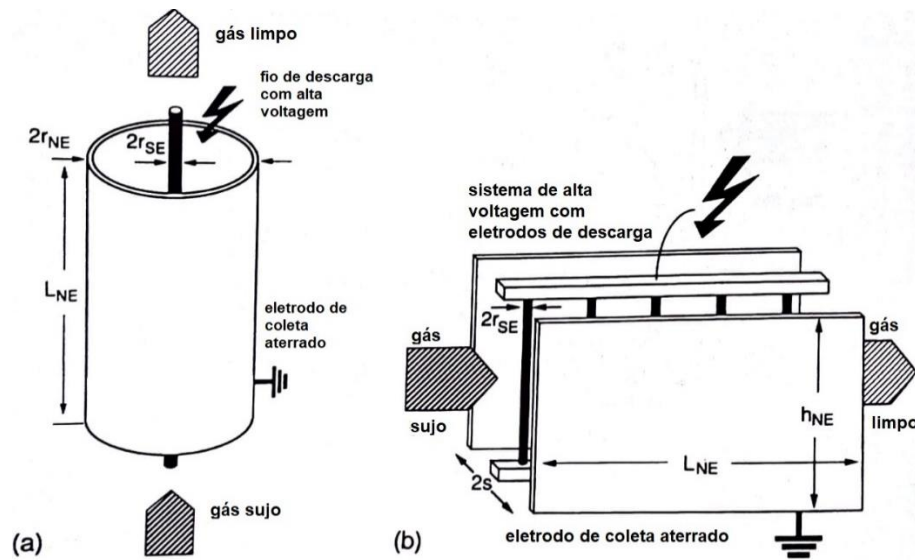
Figura 5: Precipitador de (a) simples estágio e (b) duplo estágio



Fonte: Adaptado de Riehle (1997a).

Um componente essencial para que ocorra a precipitação eletrostática é o eletrodo de coleta. Os precipitadores eletrostáticos podem ser classificados de acordo com a geometria do eletrodo de coleta como tubo-fio (Figura 6-a) ou placa-fio (Figura 6-b). No precipitador do tipo placa-fio, uma fileira de eletrodos de descarga, orientados ao longo do eixo gravitacional, é disposta entre as placas coletoras paralelas formando um duto. Essa configuração é a mais empregada industrialmente por possibilitar a utilização de vazões de gás mais altas. A limpeza desse tipo de equipamento é realizada mecanicamente. No precipitador do tipo tubo-fio, o eletrodo de descarga e o tubo são orientados ao longo do eixo gravitacional e a limpeza é realizada através de filmes líquidos, por isso são mais usados em processos a úmido (RIEHLE, 1997a).

Figura 6: Precipitador do tipo (a) tubo-fio (b) e placa-fio



Fonte: Adaptado de Riehle (1997a).

As siglas apresentadas na Figura 6 podem ser definidas como:

$2r_{NE}$: diâmetro do tubo;

$2r_{SE}$: diâmetro do fio de descarga;

L_{NE} : comprimento do eletrodo de coleta;

$2s$: espaçamento entre as placas coletoras;

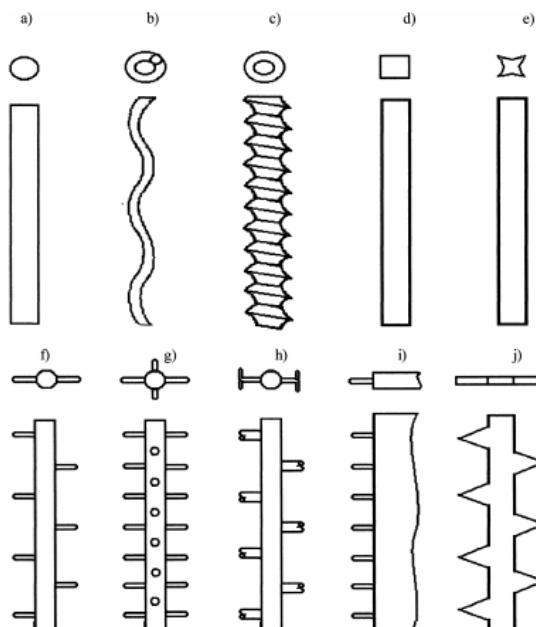
h_{NE} : altura das placas coletoras;

Além dos diferentes tipos de eletrodos de coleta, existem diferentes geometrias dos eletrodos de descarga, que influenciam no campo elétrico gerado no interior do precipitador. O objetivo do eletrodo de descarga é produzir a corona que ioniza o ar ao redor, carregando e movendo as partículas para os eletrodos de coleta (MOROSKO, 2007).

As diferentes geometrias dos eletrodos de descarga estão na Figura 7. Alguns formatos de eletrodos possuem emissores, ou seja, pontas afiadas que emitem a corrente corona. Nielsen e Andersson (2009) concluíram que o eletrodo mais eficiente é o que possui os emissores apontando na direção do escoamento. A descarga corona é controlada principalmente pela geometria do eletrodo, orientação, geometria do emissor e a distância entre os eletrodos de descarga e coleta.

A distribuição uniforme da corrente corona também é uma característica importante no projeto do eletrodo de descarga. De acordo com Jędrusik, Gajewski e Świerczok (2001), a não-uniformidade da densidade de corrente é responsável por todas as mudanças induzidas eletricamente no escoamento de partículas no espaço entre os eletrodos. É desejável encontrar a construção do eletrodo corona que reduz a escala da não-uniformidade de descarga e, ao mesmo tempo, os efeitos prejudiciais. Antes, os fios cilíndricos eram o formato mais utilizado, entretanto, os eletrodos de descarga rígidos passaram a ser mais utilizados por sua maior resistência e eficácia, principalmente os eletrodos que contém emissores apontando na direção do escoamento (ALI *et al.*, 2017).

Figura 7: Tipos de eletrodos de descarga: (a) Haste lisa; (b) helicoidal; (c) fio e haste roscado; (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.



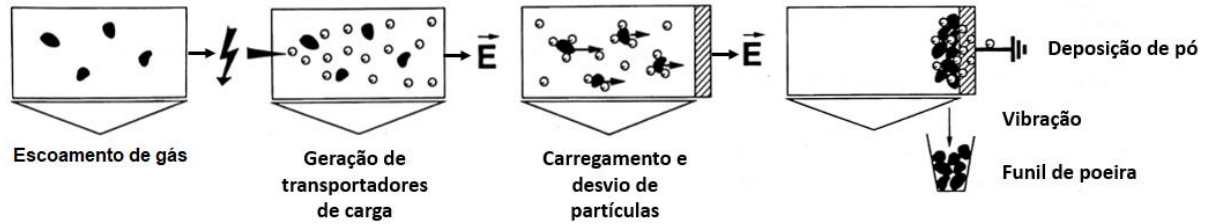
Fonte: BROCILO, 2003.

Além do campo elétrico gerado no interior do precipitador eletrostático sofrer influência do formato do eletrodo de descarga, é importante destacar que o espaçamento entre esses eletrodos, no tipo placa-fio, também influencia diretamente no padrão das linhas de campo elétrico. Caso os eletrodos de descarga sejam dispostos muito próximos entre si, pode ocorrer o fenômeno chamado de blindagem, isto é, a redução do campo elétrico na região entre os eletrodos de descarga e, conseqüentemente, da corrente elétrica emitida por esses eletrodos (WHITE, 1940). Dessa forma, isso deve ser levado em consideração durante o projeto de um precipitador eletrostático.

3.4 Fenômenos Envolvidos na Precipitação Eletrostática

O funcionamento do precipitador eletrostático está ilustrado na Figura 8, onde é possível visualizar a passagem do ar contendo material particulado através de uma região previamente ionizada.

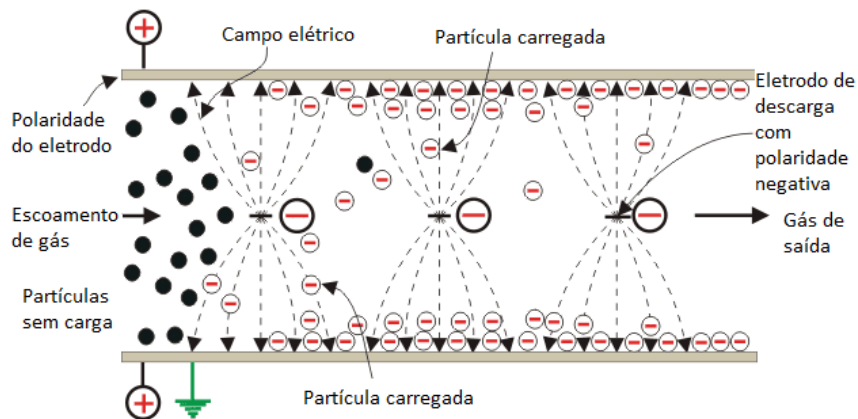
Figura 8 - Ilustração esquemática do processo de separação em precipitadores eletrostáticos



Fonte: Adaptado de Riehle (1997a).

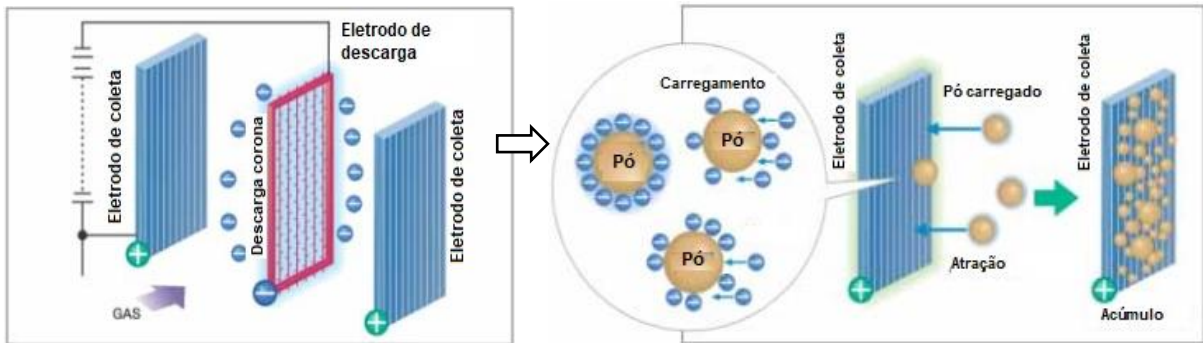
Os íons formados nesse processo irão transferir carga para as partículas, que migram para as placas coletoras seguindo as linhas de campo elétrico, como ilustrado na Figura 9. O ar de saída contém um número muito menor de partículas, podendo ser liberado no ambiente. A Figura 10 representa a coleta e o acúmulo de partículas de pó nas placas coletoras de um precipitador eletrostático do tipo placa-fio.

Figura 9: Campo elétrico no interior do precipitador eletrostático



Fonte: Adaptado de Electrical for you (2018).

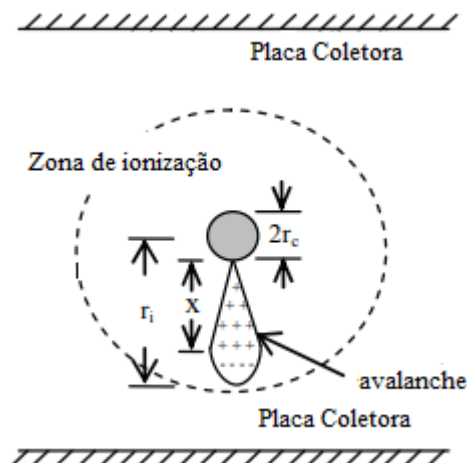
Figura 10: Funcionamento do precipitador eletrostático



Fonte: Adaptado de MHPS (2017).

No funcionamento do precipitador eletrostático diversos fenômenos estão relacionados entre si, como a descarga corona, o escoamento de ar e o carregamento e transporte das partículas, sendo alguns mais dominantes do que outros. Sob um campo elétrico suficientemente forte, ocorre uma descarga corona entre os fios de descarga e as placas coletoras aterradas. A ionização das moléculas de gás é originada em uma região muito estreita, chamada de zona ativa, próxima à superfície do fio de descarga. Quando o campo elétrico próximo aos fios de descarga atinge o valor para a ionização de moléculas de gás, inicia-se uma avalanche de elétrons ao longo da direção de máximo campo elétrico, para longe do fio. A avalanche de elétrons avança pela zona ativa, como mostrado na Figura 11 (ZIEDAN *et al.*, 2010; HE e MOHAN DASS, 2018).

Figura 11: Desenvolvimento da avalanche de elétrons



Fonte: Adaptado de Ziedan *et al.* (2010).

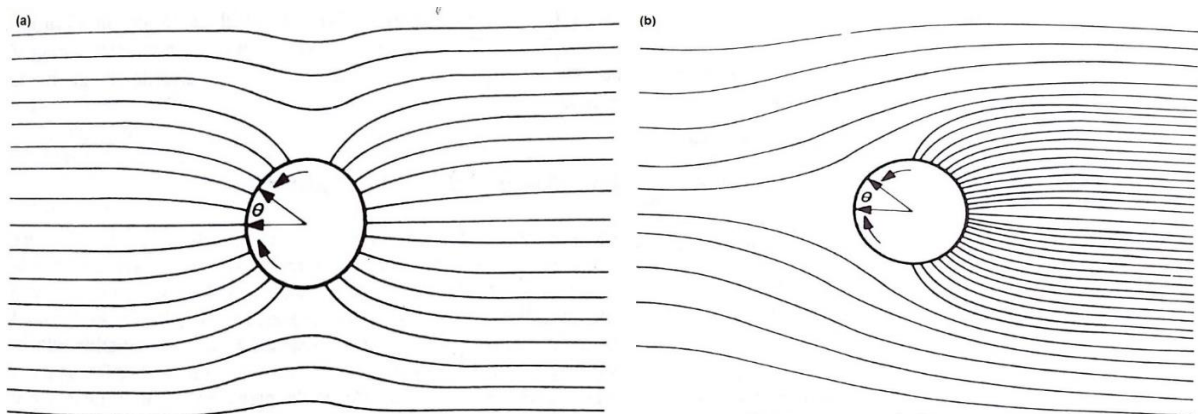
A região entre a fronteira mais externa da zona ativa e a placa coletora é chamada de zona passiva. Na zona passiva, as partículas são carregadas pelos íons de gás induzidos pela descarga corona e então migram em direção às placas coletoras sob a influência da força Coulomb. As partículas carregadas também geram seu próprio campo elétrico localizado, o que pode afetar o campo gerado pela descarga corona, dependendo da quantidade de cargas na partícula. Ambas as partículas, neutras e carregadas, são influenciadas pela força de arrasto exercida pelo escoamento de ar. Por outro lado, a alteração do escoamento de ar devido às partículas é mais fraca se a concentração de partículas é baixa (HE e MOHAN DASS, 2018).

Geralmente o processo de carregamento elétrico das partículas é dividido em uma região de carregamento por campo, para partículas com diâmetro em torno de $1\ \mu\text{m}$, e outra por difusão, para partículas menores que $0,1\ \mu\text{m}$ (RIEHLE, 1997b).

No carregamento por campo, o transporte elétrico dos íons é feito ao longo das linhas de campo elétrico que interceptam a superfície das partículas e o efeito de difusão é desconsiderado. À medida que as partículas e gotículas entram no precipitador eletrostático elas causam uma distorção local do campo eletrostático entre a região da corona e a placa coletora. Os íons negativos gerados pela corona se deslocam ao longo das linhas de campo elétrico aplicado em direção ao máximo gradiente de voltagem, e, uma vez que as linhas de campo irão interceptar o material particulado, os íons irão colidir com as partículas e gradualmente carregá-las. À medida que o íon se aproxima da partícula, as cargas internas das partículas de pó são dispostas de tal modo que uma força de atração exista entre o íon e a partícula. Esse processo de carregamento continua até que a carga na partícula é suficiente para desviar as linhas de campo elétrico para longe das partículas carregadas (Figura 12a). Esse efeito previne novos íons de colidirem com as partículas de pó carregadas (CHEREMINISINOFF, 1993).

O carregamento por difusão é baseado no transporte difusivo dos íons devido ao gradiente de densidade destes na superfície da partícula. Neste caso, o efeito da carga da partícula no perfil da densidade do íon é considerado e o efeito do campo elétrico externo é desprezado. Esse tipo de carregamento também depende da energia térmica ou da velocidade dos íons. Os íons negativos vão colidir com as partículas em suspensão devido ao movimento térmico do íon. Essa colisão promove a transferência de carga para a partícula (DUNKLE, 1997; RIEHLE, 1997a).

Figura 12: Representação do (a) campo elétrico modificado por uma partícula condutora não-carregada e (b) campo elétrico após a partícula atingir a carga de saturação



Fonte: CHEREMINISINOFF, 1993.

Obviamente, em um precipitador eletrostático, as partículas de todos os tamanhos veem ambas as situações simultaneamente, isto é, partículas menores que $0,1 \mu\text{m}$ também são guiadas por um campo elétrico (RIEHLE, 1997b). Quando uma partícula de pó não mais recebe uma carga de íons, é dita como saturada (Figura 12b). O valor da carga de saturação depende da intensidade do campo elétrico, do tamanho da partícula, da constante dielétrica da partícula e da posição da partícula no campo (CHEREMINISINOFF, 1993).

Para produzir muitas cargas num gás, ou seja, para o gás ser ionizado, um elevado campo elétrico deve ser criado. Isto é possível aplicando uma grande diferença de potencial entre um eletrodo que apresenta uma pequena área (eletrodo de descarga) e outro com uma área bem maior (eletrodo de coleta). Para tensões aplicadas menores do que o valor de início da corona, um campo puramente eletrostático está presente. Para tensões acima da tensão de início da corona, o campo elétrico na vizinhança do eletrodo de descarga é grande o suficiente para produzir a ionização dos elétrons por impacto (TAVARES, 2015).

O gás ionizado próximo ao eletrodo de descarga se desloca para as placas coletoras por causa do campo elétrico. Por conta da impermeabilidade e da lei de conservação de massa, um escoamento secundário é formado sob certas condições que, segundo Villot *et al.*, (2013), perturba localmente o campo de velocidade do gás. Esse escoamento é geralmente chamado de vento elétrico, vento corona ou vento iônico, que Farnoosh, Adamiak e Castle (2011) afirmam aumentar a turbulência do escoamento de ar no duto do precipitador. O efeito de parede do campo elétrico ou as não-uniformidades da descarga corona também podem induzir o escoamento secundário. Diversos autores afirmam que o efeito do escoamento secundário não

pode ser desprezível, e deve ser analisada sua relação com o escoamento principal e sua influência na eficiência de coleta (LIANG e LIN, 1994). Dessa forma, o campo elétrico é perturbado pela carga espacial e pelos íons.

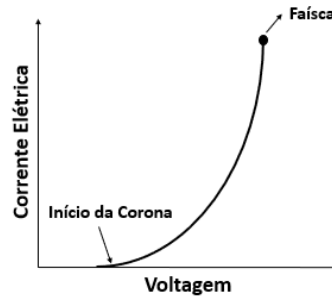
De acordo com He e Mohan Dass (2018), a influência da distribuição de carga espacial induzida pela descarga corona no padrão de escoamento é resultante do vento iônico ou do escoamento eletro-hidrodinâmico. Sua influência reversa (denominada convecção de íon ou carga) é relativamente fraca e insignificante em um campo elétrico forte, especialmente próximo à superfície do fio onde o campo elétrico é tão forte que a velocidade de migração dos íons do gás é muito maior do que a velocidade do escoamento. A velocidade de migração dos íons do gás pode ser comparada a velocidade do escoamento nas áreas próximas às placas coletoras. Além disso, o desempenho do precipitador também pode ser afetado por alguns fenômenos anormais, como a faísca elétrica e a descarga corona reversa. A faísca elétrica ocorre entre os eletrodos de coleta e descarga por causa da limitada resistência dielétrica entre eles e várias condições operacionais. A descarga corona reversa é formada por uma série de microdescargas no ar localizado entre os espaços das partículas da camada de poeira depositada nas placas coletoras. Ambos os fenômenos podem reduzir a eficiência de coleta e ocorrem geralmente quando a resistividade da partícula é alta.

A resistividade do material é uma medida da sua resistência à condução elétrica. Uma vez que as partículas são coletadas, elas começam a perder carga para a placa. Essa transferência de carga completa o circuito elétrico, produz as de corrente, e permite a manutenção da diferença de potencial entre os fios e as placas. Se a resistividade é muito baixa (isto é, se a partícula é um bom condutor), a carga eletrostática é perdida muito rapidamente e a partícula é reintroduzida no gás. Se a resistividade é muito alta (isto é, se a partícula é um bom isolante), a carga não é perdida nas placas coletoras. Nessa situação, a corona reversa se desenvolve, reduzindo a ionização e a migração das partículas no gás, e as partículas permanecem fortemente atraídas à placa e são difíceis de serem desprendidas das placas (COOPER e ALLEY, 2002).

Para encontrar as condições de operação ótimas de um precipitador eletrostático, é possível utilizar a curva corrente-tensão (Figura 13). Essa curva é limitada pelos pontos de voltagem de início da corona e pelo surgimento de uma faísca. Quando a voltagem aplicada excede um determinado valor, uma corrente elétrica entre os dois eletrodos pode ser detectada, indicando a voltagem de início da corona, e um brilho colorido aparece ao redor do eletrodo de

descarga. Esse brilho colorido corresponde a região de ionização do gás e sua intensidade aumenta com a voltagem aplicada, até que ocorra o surgimento de uma faísca, indicando a ruptura dielétrica do gás. Essa curva depende de diversos parâmetros, os mais importantes são a temperatura, a pressão, a composição do gás e a geometria do precipitador eletrostático (VILLOT *et al.*, 2013).

Figura 13: Relação entre corrente e voltagem



Fonte: Autor, 2020.

O comportamento da curva corrente-tensão segue a Lei de Townsend, como mostrado nas Equações 4 e 5 (SAID *et al.*, 2014).

$$I = AV(V - V_0) \quad (4)$$

Ou seja,

$$I = \frac{4\pi\epsilon_0 b l_d}{s^2 \log(d/r_0)} V(V - V_0) \quad (5)$$

Onde,

I : corrente da descarga corona (A);

V : voltagem aplicada (V);

V_0 : voltagem de início da corona (V);

A : constante que depende da configuração do eletrodo;

ϵ_0 : permissividade elétrica (As/Vm);

b : mobilidade elétrica dos íons (m^2/Vs);

l_d : comprimento do fio de descarga (m);

s : distância entre a placa coletora e o fio de descarga (m);

r_0 : raio do eletrodo de descarga (m).

A constante d é calculada através das seguintes equações:

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

$$\text{Para } \frac{s}{a} \geq 2,0 \quad d = \frac{a}{\pi} e^{\frac{\pi s}{2a}} \quad (7)$$

Onde,

a : espaçamento entre os fios (m).

3.5 Eficiência de Coleta

Ao longo das seções anteriores foram discutidos diversos fatores que influenciam na precipitação eletrostática. De maneira resumida, para o dimensionamento de um precipitador eletrostático devem ser levadas em consideração a distribuição do escoamento de gás e sólidos, a velocidade, a pressão, a temperatura e a concentração. Com relação às informações relativas à operação e ao tipo de material particulado, deve-se considerar o tipo de precipitador, seco ou úmido, a tensão de operação, a corrente e a área disponível para coleta (TAVARES, 2015). A eficiência de coleta de um precipitador está relacionada com a área superficial efetiva de coleta, o escoamento de gás através do precipitador e a velocidade das partículas.

Além disso, a geometria das superfícies de coleta e eletrodos de descarga podem afetar o campo elétrico dentro do precipitador. Esses parâmetros afetam o arranjo do equipamento e, conseqüentemente, seu desempenho (DUNKLE, 1997). Desse modo, para utilizar um precipitador eletrostático industrialmente, devem ser escolhidas as condições operacionais adequadas ao processo em questão, visando obter a maior eficiência de remoção de partículas.

A eficiência de coleta das partículas no precipitador eletrostático é calculada pela Equação 8, que relaciona a concentração de partículas na entrada e na saída do equipamento.

$$\eta = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\% \quad (8)$$

Onde,

η : eficiência do precipitador (%);

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

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

No início do século XX foi desenvolvido o modelo matemático de Deutsch, como forma de validar os resultados experimentais e auxiliar na predição da eficiência de coleta no projeto de um precipitador eletrostático. No entanto, esse modelo possui várias simplificações, como vazão mássica uniforme, difusividade turbulenta infinitamente elevada e migração uniforme das partículas (LARSEN e SORENSEN, 1984).

Desse modo, o modelo de Deutsch não descreve o processo de precipitação da forma como ele ocorre, mas apresenta uma aproximação satisfatória. Apesar de já terem sido desenvolvidos outros modelos mais complexos que melhor representam o que ocorre no interior do precipitador eletrostático, o modelo de Deutsch ainda é amplamente utilizado, por ser menos complexo e possuir uma boa estimativa. Segundo Parker (1997) e Świerczok e Jędrusik (2018), a eficiência de remoção nesse modelo é calculada pela Equação 9.

$$\eta_D(d_p) = 1 - e^{-w(d_p) \times \frac{l}{s \times u}} = 1 - e^{-w(d_p) \times \frac{A'}{Q}} \quad (9)$$

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^2);

Q : taxa de fluxo volumétrico do gás, $Q = 2 \times h \times s \times u$ (m³/s);

h : altura dos eletrodos de coleta (m).

A velocidade de migração das partículas é calculada pela Equação 10 (RIEHLE, 1997a).

$$w(d_p) = \frac{Q_p(x) \times C(x) \times |E|}{3 \times \pi \times \mu \times d_p} \quad (10)$$

Onde,

Q_p : carga de saturação (As);

μ : viscosidade do gás (kg/ms);

C : coeficiente de Cunningham;

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

O campo elétrico no interior do precipitador eletrostático não é homogêneo, mas, pela dificuldade de se obter o valor exato do campo elétrico real, considera-se como pseudo-homogêneo. O valor é obtido através da Equação 11, que relaciona a voltagem aplicada (V) e a metade da distância entre as placas coletoras (s) (FALAGUASTA *et al.*, 2008; RIEHLE, 1997a).

$$E = \frac{V}{s} \quad (11)$$

O coeficiente de Cunningham é um fator de correção, que para uma determinada partícula de gás depende do “coeficiente de acomodação”, isto é, a fração de moléculas de gás que sofre reflexão difusa da superfície das partículas. Esse coeficiente é determinado pela Equação 12 (RIEHLE, 1997b).

$$C(x) = 1 + K_n \times (1,246 + 0,42 \times e^{\left(\frac{-0,87}{K_n}\right)}) \quad (12)$$

Sendo K_n o número de Knudsen, o qual é a razão entre o caminho médio livre das moléculas de gás (λ) e o raio da partícula.

O termo Q_p da Equação 8 é a carga adquirida pela partícula. A carga de saturação da partícula é descrita pela Equação 13 (RIEHLE, 1997b).

$$Q_p(x) = \pi \times \varepsilon_0 \times d_p^2 \times |E| \times \left[\left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right) \times \frac{2}{(1 + K_n)} + (1 + K_n)^2 \right] \quad (13)$$

Onde,

ε_0 : permissividade elétrica no vácuo (8,86 E-12 A s/ V m);

ε_r : permissividade relativa do material que constitui a partícula;

d_p : diâmetro da partícula (m).

De acordo com Michaelides, Crowe e Schwarzkopf (2016), as forças eletrostáticas podem ocasionar desvios significativos das partículas devido à elevada mobilidade das partículas de aerossol. A velocidade de migração calculada pela Equação 10 é a base para analisar a migração elétrica das partículas de aerossol. A mobilidade elétrica das partículas (Z) é a velocidade das partículas em um campo elétrico unitário e é calculada pela Equação 14.

$$Z = \frac{Q_p(x) \times C(x)}{3\pi\mu d_p} \quad (14)$$

Como na precipitação eletrostática ocorre a atuação de forças inerciais e elétricas é importante determinar qual o fenômeno predominante na coleta das partículas, a fim de conhecer as características do processo. Essa análise é feita através da razão entre o número eletro-hidrodinâmico (N_{EHD}) e o número de Reynolds ao quadrado (Re^2), calculada pelas Equações 15 e 16 (IEEE-DEIS-EHD Technical Committee, 2003).

$$N_{EHD} = \frac{I \times L^3}{\rho_f \times b \times v_f^2 \times A} \quad (15)$$

$$Re = \frac{u \times L}{v_f} \quad (16)$$

Onde, I é a corrente elétrica em μA , L é o comprimento característico (nesse caso, a distância entre os eletrodos de coleta), ρ_f é a densidade do gás, b é a mobilidade iônica dos íons, v_f é a viscosidade cinemática, A é a área superficial das placas coletoras e u é a velocidade do gás.

Além disso, os tempos de residência das partículas no interior do precipitador eletrostático foram calculados pela razão entre o volume interno do equipamento e as velocidades de ar utilizadas.

3.6 Estado da Arte

Na literatura encontram-se diversos trabalhos que utilizam precipitadores eletrostáticos para remoção de partículas. Świerczok e Jędrusik (2018) avaliaram a eficiência de coleta de cinzas provenientes da queima da lignina, com diâmetro entre 0,5 e 500 μm . Foi utilizado um precipitador eletrostático do tipo placa-fio, com eletrodos de descarga na forma de serra. O precipitador utilizado possuía comprimento de 22,80 cm, altura de 5,80 cm e distância entre os eletrodos de 4 cm. Foram aplicadas voltagens entre 20 e 60 kV, e a velocidade do gás foi de 0,8 m/s. A concentração inicial das cinzas foi de 0,6 g/m^3 . Nesse trabalho foi avaliada a eficiência e a relação entre corrente e tensão. Os resultados experimentais foram comparados com o modelo de Deutsch, que se ajustou de forma satisfatória aos dados experimentais. Entretanto, para voltagens menores, em torno de 20 kV, a diferença foi mais acentuada, indicando que em torno desse valor o carregamento das partículas é menos eficaz do que o previsto. Além disso, a análise do efeito do fluxo eletro-hidrodinâmico (N_{EHD}) mostrou que para valores inferiores a 1, a eficiência de coleta aumentou com o N_{EHD} . Para o N_{EHD} maior que 1, a curva de eficiência de coleta foi constante, o que pode estar associado com o aumento na vortividade do escoamento no espaço entre os eletrodos.

Crespo e colaboradores (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 e os maiores comprimentos apresentaram menor variação de eficiência.

Lu e colaboradores (2016) avaliaram o efeito da voltagem, da velocidade do gás, da área de coleta e do espaçamento entre os fios em um precipitador eletrostático do tipo vórtice, para partículas entre 0,2 e 15 μm . Para análise do efeito da voltagem foi utilizada uma velocidade de 3,4 m/s, para as concentrações entre 253 e 341 mg/m^3 , com a área de coleta de 1,13 m^2 e o espaçamento entre os fios de 10 cm. A eficiência de precipitação aumentou com a voltagem,

devido ao aumento da concentração de íons e maior carregamento das partículas. Para análise da influência da velocidade, foram realizados experimentos com diferentes voltagens (0-18 kV) para a concentração de 270 mg/m^3 , com a mesma área de coleta e espaçamento descritos anteriormente. Foi constatado que inicialmente a eficiência de precipitação decresceu levemente e depois teve uma redução brusca, à medida que a velocidade do ar aumentou. Isso ocorre porque com o aumento da velocidade ocorre a diminuição do tempo de residência das partículas no equipamento. Desse modo, o processo de colisão, carregamento e remoção é reduzido. Em seguida foi avaliado o efeito do espaçamento entre os fios, variando entre 70 e 120 mm. As voltagens utilizadas foram de 16, 17 e 18 kV, a velocidade do gás de 3,4 m/s, concentração inicial de 360 mg/m^3 e área de coleta de $1,13 \text{ m}^2$. A eficiência aumentou a princípio e depois diminuiu com o aumento do espaçamento. Isso ocorre porque com espaçamento muito pequeno irá ocorrer a restrição da voltagem, que irá limitar o aumento da concentração de íons.

Kasdi (2016) realizou um estudo experimental e matemático, com o software Comsol Multiphysics, 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 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. Os dados experimentais foram muito próximos aos obtidos pelo software Comsol, comprovando a precisão dos dados.

El Dein e Usama (2014) propuseram um modelo para prever as características de corrente-tensão de um precipitador do tipo placa-fio e validaram os dados experimentalmente. Foram avaliados os efeitos da configuração do eletrodo, do diâmetro dos fios (entre 0,55 e 1,85 mm), do espaçamento entre eles (6,5 e 25 cm), do número de eletrodos de descarga (1, 3 e 7 fios) e do espaçamento entre as placas coletoras (12,5 e 25 cm). Cada variável foi estudada na faixa de voltagem entre 10 e 60 kV. As dimensões do precipitador eletrostático são 100 cm de

comprimento, 30 cm de altura e 30 cm de largura. Na análise do espaçamento entre as placas coletoras foi observada a redução da corrente obtida para cada voltagem e o aumento da voltagem de início da corona. Esse comportamento é explicado pela redução do campo elétrico formado no interior do precipitador. Outro resultado obtido foi com relação ao número de eletrodos de descarga, quanto maior o número de fios, maior foi a voltagem requerida para a corrente de início da corona, devido ao aumento do efeito de blindagem. Além disso, o aumento do número de fios resultou em uma corrente muito maior, o que pode ser decorrente do aumento do campo elétrico entre os fios e entre os fios e as placas coletoras. Seguindo esse raciocínio foram comparados os resultados para os diferentes diâmetros de fios e foi concluído que o menor diâmetro de fio necessitou de uma menor voltagem para o início da corona e obteve valores mais elevados de corrente para todas as voltagens aplicadas. Esse comportamento ocorre pelo aumento do campo elétrico na superfície de menor diâmetro. Por fim, foi verificado o efeito do espaçamento entre os fios. Nesta análise verificou-se que ocorreu um aumento significativo na corrente e na voltagem de ruptura com o aumento do espaçamento entre os fios. Esse comportamento está novamente relacionado ao efeito de blindagem no caso de espaços mais densos entre os eletrodos de descarga.

Além dos trabalhos citados anteriormente, é importante destacar os estudos desenvolvidos ao longo dos anos na área de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFSCar, objetivando estudar as diferentes características dos precipitadores eletrostáticos.

Oliveira (2019) estudou a influência de baixas velocidades em um precipitador de simples estágio placa-fio com placa coletora de 30 cm de comprimento e 10 cm de altura, com espaçamento entre os eletrodos de coleta de 4 cm e espaçamento entre os eletrodos de descarga de 4 cm. Foram utilizados 8 eletrodos de descarga com diâmetro de 0,3 mm. A eficiência de coleta foi verificada para partículas de KCl, Fe₂O₃ e NiO. Nesse trabalho foram utilizadas diferentes velocidades de gás (1,7-19,9 cm/s) e o campo elétrico variou entre 3,95 e 4,10 kV/cm. A concentração de partículas variou entre 0,4 e 6 g/L, e foi concluído que o aumento da concentração favoreceu a coleta de partículas, bem como a diminuição da velocidade, devido ao maior tempo de residência das partículas no interior do equipamento. Observou-se que apesar da pequena diferença entre os campos elétricos, o efeito na eficiência foi significativo, apresentando um aumento para as velocidades de 1,7, 3,3 e 6,6 cm/s. Para as outras velocidades, ocorreu a redução da eficiência, devido à redução do tempo de residência.

Meira (2009) utilizou um precipitador do tipo placa-fio para remoção de nanopartículas de NaCl, com diâmetro entre 6 e 245 nm. As placas coletoras possuíam 30 cm de comprimento por 10 cm de altura, espaçadas entre si em 4 cm. Foram utilizados 8 eletrodos de descarga espaçados em 4 cm, com 2,5 mm de diâmetro. A velocidade de escoamento do ar foi variada entre 1 e 10 cm/s, para um campo elétrico com valores entre 4 e 5,5 kV/cm. A partir dos resultados foi observada uma dependência entre o campo elétrico necessário para obter eficiências acima de 99% e a velocidade de escoamento. Quanto maior a velocidade, maior foi o campo elétrico gerado. Para valores de campo elétrico mais baixos, a maior eficiência de coleta ocorreu para partículas entre 20 e 75 nm. Os experimentos realizados com campo elétrico menor ou igual a 3,8 kV/cm não apresentaram um comportamento de velocidade definido, mas, para valores superiores a 3,8 kV/cm o aumento da velocidade reduziu a eficiência de coleta. E para os experimentos com campo elétrico igual ou maior que 5 kV/cm, a eficiência de coleta foi máxima para todas as velocidades utilizadas. O modelo de Deutsch não se ajustou bem aos dados experimentais, a eficiência de coleta foi superestimada pelo modelo.

Falaguasta (2005) estudou a coleta de partículas em um precipitador do tipo placa-fio para PM_{2,5}, partículas de alumina com diâmetro mediano de 0,6 µm e diâmetro máximo de 2,5 µm, e para partículas nanométricas de cloreto de sódio. A distribuição de partículas no ar era monodispersa e os diâmetros analisados ficaram entre 8 e 100 nm. Para o estudo nanométrico foram variados o comprimento do duto (15 e 30 cm), o diâmetro dos eletrodos de descarga (2,5 e 4,5 mm), o espaçamento entre os fios (2 e 4 cm), o campo elétrico (5 e 8 kV/cm) e a velocidade do ar (0,5 e 1 m/s). No estudo nanométrico foi novamente avaliado o comprimento do duto para 15 e 30 cm, a distância entre as placas coletoras (40 e 60 cm) e a velocidade do ar (0,125-0,50 m/s). O estudo comprovou a elevada eficiência de remoção do precipitador eletrostático, superior a 99% para algumas configurações. Como comprovado em outros trabalhos da literatura, o aumento da velocidade do ar reduziu a eficiência de coleta. A redução da área da placa coletora também reduziu a eficiência, entretanto, o aumento do espaçamento entre as placas coletoras aumentou a eficiência de coleta. Esse comportamento não era esperado, mas foi observado por outros pesquisadores, principalmente para partículas de elevada resistividade. Na remoção de partículas nanométricas foi observado o aumento da eficiência de remoção até o diâmetro de partícula de 20 nm, após o qual a eficiência reduziu, devido ao baixo carregamento das partículas. O modelo de Deutsch se ajustou adequadamente aos dados experimentais.

Cerda (2004) estudou o perfil de concentração em um precipitador do tipo placa-fio de 50 cm de comprimento e 20 cm de largura, com 6 eletrodos de descarga de 1 mm, espaçados em 10 cm. O diâmetro médio das partículas estudadas foi de 4,5 μm . As variáveis foram o campo elétrico (2,5- 5 kV/cm) e a velocidade do ar no interior do equipamento (0,6-1,4 m/s). Os resultados mostraram que a concentração de partículas diminui à medida que se avança longitudinalmente pelo duto, e para maiores campos elétricos houve menor variação dessas concentrações. Também foi constatado que a concentração de partículas no centro do precipitador foi maior do que na direção das placas coletoras. Além disso, para maiores velocidades a concentração de partículas foi maior, e a eficiência de coleta diminuiu. O modelo de Deutsch representou satisfatoriamente os dados experimentais.

Diante do que foi exposto, observa-se que os trabalhos avaliaram diferentes parâmetros operacionais e analisaram sua influência na eficiência de coleta e nas características da corrente obtida. Através dos resultados obtidos nesses estudos, foi comprovada a influência dos parâmetros geométricos e das condições operacionais nas características e no desempenho dos precipitadores eletrostáticos. Entretanto, na literatura a maior parte dos trabalhos foca na coleta de partículas micrométricas, e alguns se limitam ao estudo das características elétricas do precipitador eletrostático. Dessa forma, o presente estudo visa contribuir para a análise de alguns parâmetros operacionais do equipamento, como velocidade de escoamento do ar, intensidade do campo elétrico e alterações no eletrodo de descarga, e como eles podem influenciar na eficiência de remoção de nanopartículas em um precipitador placa-fio de simples estágio.

4 METODOLOGIA

4.1 Unidade Experimental

Os experimentos foram realizados em uma unidade experimental (Figura 14) composta por um compressor da marca Schulz (modelo MSV 12/175), que fornece o ar utilizado no sistema, o qual tem suas impurezas removidas por um filtro de purificação TSI (modelo 3074B). Em paralelo, o aerossol é produzido por um gerador de nanopartículas TSI (modelo 3079), no qual é inserida a solução de NaCl. Em seguida, atravessa um secador de difusão TSI (modelo 3062), que contém sílica-gel em seu interior para reter o excesso de umidade. O aerossol disperso passa por um neutralizador de aerossol de Criptônio 85 (Kr-85) TSI (modelo 3054), a fim de remover as cargas eletrostáticas, evitando a deposição de partículas na superfície da tubulação. Em seguida, o escoamento de ar contendo as nanopartículas segue para o precipitador eletrostático, que é conectado a uma fonte de alta tensão da marca Spellman (modelo SL30PN300), que gera uma diferença de potencial entre a placa e o fio, promovendo o efeito de ionização em cadeia das moléculas.

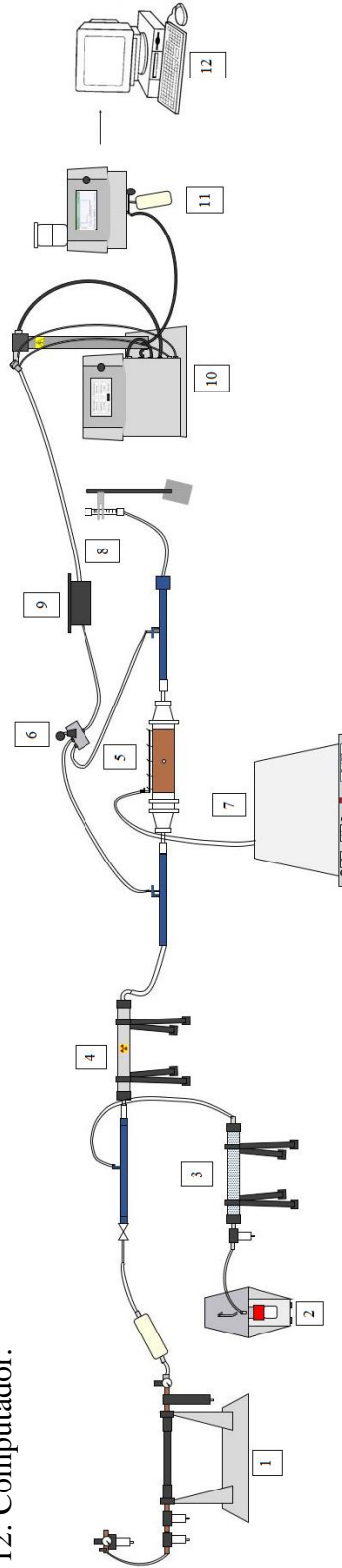
A tubulação conectada na entrada e na saída do precipitador eletrostático possui diâmetro interno de 2,6 cm e duas sondas estão fixadas na sua superfície, uma a montante e outra a jusante do equipamento. Cada sonda está a 26 cm do precipitador e possui 2 mm de diâmetro interno, com uma angulação de 90°. As sondas são fixadas no centro da tubulação, paralelas à direção do fluxo de escoamento do ar. Ambas as sondas são conectadas a uma válvula de 3 vias por mangueiras rígidas de silicone de 0,4 cm de diâmetro interno. Essa válvula é utilizada para controlar a região de amostragem de partículas, visto que para o cálculo da eficiência é necessário utilizar as concentrações de partículas antes e após a passagem pelo precipitador eletrostático. Na tubulação de saída do precipitador eletrostático é conectado um rotâmetro da marca Gilmont, número 4, para controle da vazão de ar e um higrômetro da marca Rotronic (modelo Hygropalm) para controle da temperatura e da umidade relativa do ar.

A tubulação da válvula de 3 vias é conectada a um neutralizador de aerossol de Amerício – 241 (Am-241), para remover as cargas fornecidas às partículas, para que não afetem os resultados obtidos posteriormente. Após a passagem pela fonte de Am-241, as partículas seguem para um sistema de análise de partículas por mobilidade elétrica (SMPS), formado por um classificador eletrostático TSI (modelo 3080) e um contador de partículas TSI (modelo

3776). Um computador é conectado ao classificador e ao contador de partículas para permitir o controle das análises e exibir os dados obtidos.

Figura 14: Unidade Experimental

- 1: Filtro de Purificação;
- 2: Gerador de Nanopartículas;
- 3: Secador por Difusão;
- 4: Neutralizador de Aerossol (Kr-85);
- 5: Precipitador Eletrostático;
- 6: Válvula de 3 Vias;
- 7: Fonte de Alta Tensão;
- 8: Rotômetro;
- 9: Neutralizador de Aerossol (Am-241);
- 10: Classificador Eletrostático;
- 11: Contador de Partículas;
- 12: Computador.



Fonte: Autor, 2020.

4.1.1 Principais Equipamentos da Unidade Experimental

Nessa subseção serão detalhados os componentes, de maior relevância, e o funcionamento dos principais equipamentos da unidade experimental descrita anteriormente.

- Filtro de Purificação de Ar

Inicialmente, o ar fornecido pelo compressor passa por um filtro de purificação de ar TSI modelo 3074B (Figura 15), que remove gotas de óleo ou outros líquidos do ar através da utilização de dois pré-filtros. Além disso, remove a umidade do ar através de um avançado secador por membrana, e remove partículas finas utilizando um filtro externo de alta eficiência. Esse equipamento possui uma válvula que permite a regulação do ar até uma vazão máxima 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 15: Filtro de purificação

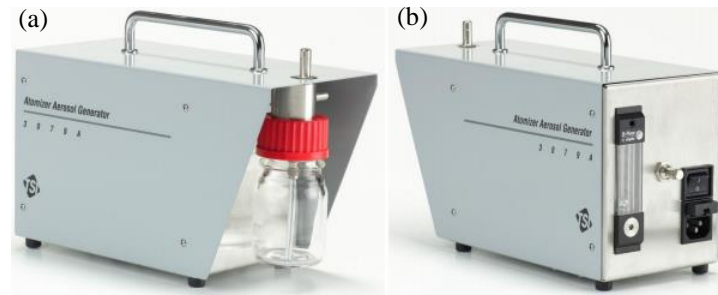


Fonte: TSI, 2019.

- Gerador de Nanopartículas

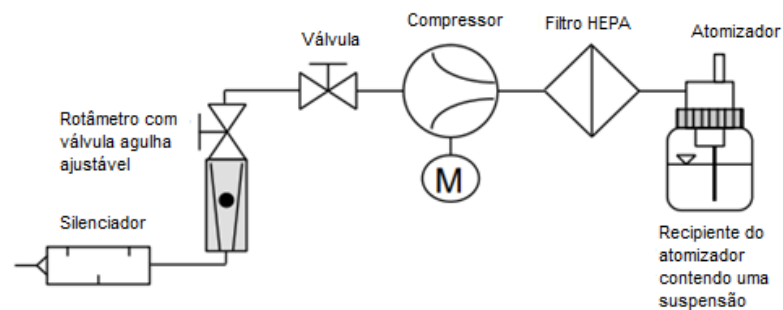
Em paralelo o aerossol é formado pelo gerador de nanopartículas ou atomizador TSI (modelo 3079A), mostrado na Figura 16. Na Figura 16-a é possível visualizar o lado frontal do equipamento, e o recipiente de vidro no qual a solução é inserida. A Figura 16-b mostra o lado traseiro do atomizador, que contém um rotâmetro com uma válvula agulha para ajustar a vazão de aerossol. A Figura 17 apresenta um esquema do interior do equipamento. Segundo o manual do equipamento (TSI, 2014), o ar comprimido utilizado na geração do aerossol é fornecido por um compressor interno, que será limpo por um filtro HEPA antes de ser introduzido no atomizador. A vazão de aerossol utilizada nos experimentos é de 200 L/h e o atomizador possui uma válvula de alívio de pressão para proteger o recipiente de vidro do excesso de pressão caso a saída esteja bloqueada.

Figura 16: Gerador de nanopartículas: (a) vista do lado frontal e (b) vista do lado traseiro.



Fonte: TSI, 2014.

Figura 17: Representação esquemática do interior do gerador de partículas



Fonte: TSI, 2014.

- Secador por Difusão

O aerossol formado segue para o secador por difusão (Figura 18), que inclui um extrator removível para coleta de gotículas maiores de água. O caminho percorrido pelo aerossol é delimitado por uma tela cilíndrica de alumínio, e o espaço entre essa tela e a parede do equipamento é preenchido com sílica-gel, que remove o excesso de umidade por captura difusional. Como o aerossol não entra em contato direto com a sílica-gel, a perda de partículas é mínima (TSI, 2019).

Figura 18: Secador por difusão



Fonte: TSI, 2019.

- Neutralizador de Aerossol de Kr-85

Após a passagem pelo secador por difusão, o aerossol segue para o neutralizador de aerossol TSI (modelo 3054), exibido na Figura 19. Esse equipamento utiliza uma fonte radioativa de Criptônio-85, com decaimento beta, que ioniza a atmosfera circundante em íons negativos e positivos. As partículas que carregam uma elevada carga podem ser descarregadas pela captura de íons de polaridade oposta. Após um curto tempo, as partículas atingem uma carga de equilíbrio de tal forma que o aerossol transporta uma distribuição bipolar. No interior do equipamento, Criptônio-85 inerte gasoso é completamente fechado no interior de um tubo de aço inoxidável com uma parede de 0,05 mm de espessura. Assim, o aerossol atravessa o espaço entre o tubo de aço inoxidável e a carcaça exterior (TSI, 2012). O mesmo princípio de funcionamento é utilizado no neutralizador de Amerício-241, mas o decaimento é do tipo alfa.

Figura 19: Neutralizador de aerossol



Fonte: TSI, 2019.

- Classificador Eletrostático

Após a passagem pelo neutralizador de Amerício-241, o aerossol disperso segue para o classificador de partículas TSI (modelo 3080), que possui um analisador de mobilidade diferencial (DMA) TSI (modelo 3081 longo) acoplado, mostrado na Figura 20.

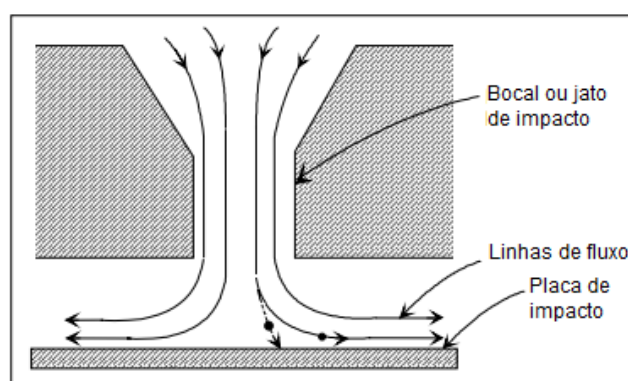
Figura 20: Classificador eletrostático



Fonte: TSI, 2009.

Inicialmente, o aerossol passa por um impactador localizado na parte externa do classificador eletrostático, que remove as partículas de maior tamanho por impactação inercial. O fluxo de aerossol é acelerado através de um bocal dirigido a uma placa plana (Figura 21), que desvia o fluxo para formar um ângulo de 90° nas linhas de fluxo. As partículas com inércia suficiente, ou seja, as partículas maiores, não conseguem seguir as linhas de fluxo e colidem na placa. Por outro lado, as partículas menores seguem as linhas de fluxo, sem colidir com a placa, e saem do impactador (TSI, 2009).

Figura 21: Vista transversal do impactador



Fonte: Adaptado de TSI (2009).

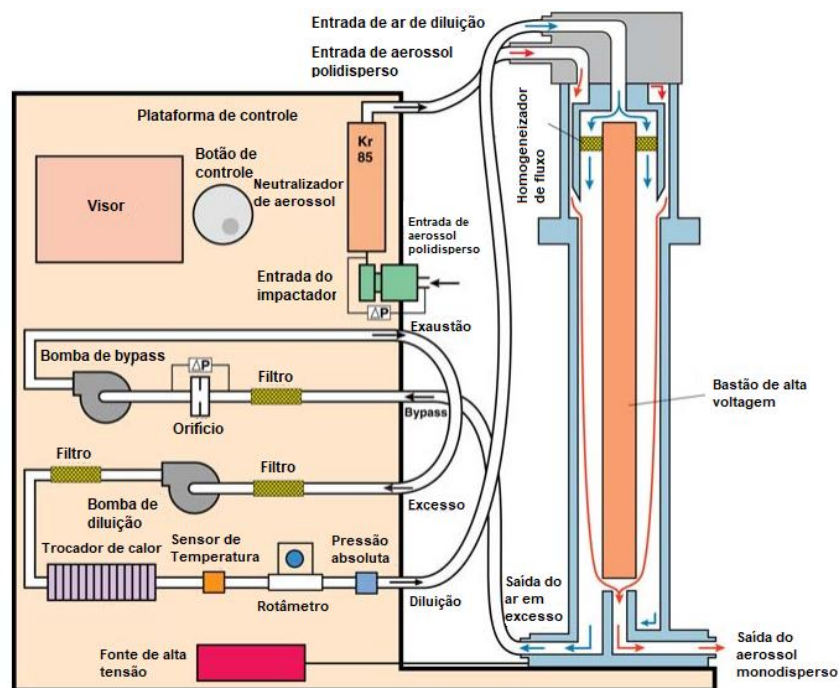
A Figura 22 exibe mostra os componentes internos do classificador eletrostático e do DMA. Utilizando o botão de controle é possível determinar os valores da vazão do ar de diluição e da amostra, nos experimentos realizados esses valores foram de 15 e 1,5 L/min, respectivamente. A faixa de diâmetro de partículas analisadas depende das vazões especificadas, para as vazões escolhidas, as partículas analisadas possuem entre 5,83 e 228,8 nm.

No interior do equipamento, o ar de diluição (filtrado) segue por uma câmara anular no topo do DMA e passa através de uma tela dupla de malha de nylon fino para homogeneizar o fluxo. O ar escoava para baixo de forma axial através da região do classificador. O escoamento polidisperso, proveniente do impactador, entra no DMA através de um tubo no topo e escoava na direção axial entre dois cilindros concêntricos para distribuir uniformemente o escoamento concêntrico e a distribuição de concentração (TSI, 2009).

Esse escoamento anular fino é introduzido na região do classificador e suavemente unido ao escoamento laminar do ar de diluição. O aerossol circunda o núcleo do ar de diluição, e ambos os escoamentos passam pelo anulo sem ocorrer a mistura dos dois escoamentos

laminares. O cilindro interno, o bastão coletor, é mantido a uma voltagem negativa controlada, enquanto o cilindro externo é eletricamente aterrado, o que cria um campo elétrico entre os dois cilindros. O campo elétrico faz com que as partículas positivamente carregadas sejam atraídas através do ar filtrado para o bastão coletor negativamente carregado. As partículas são precipitadas ao longo de todo o comprimento do bastão coletor, as que possuem maior mobilidade elétrica são precipitadas ao longo da parte superior do bastão, enquanto as partículas de menor mobilidade são precipitadas ao longo da parte inferior do bastão. 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 deixam o DMA através do isolador inferior como o escoamento monodisperso, e são transferidas para o contador de partículas (TSI, 2009).

Figura 22: Esquema do fluxo no interior do classificador com longo DMA



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 23. O equipamento possui um suporte na parte superior, no qual é posicionado um recipiente contendo

butanol, que é utilizado no funcionamento do contador de partículas. A saída do equipamento é conectada a um filtro HEPA, para retenção das partículas.

Figura 23: Contador de partículas



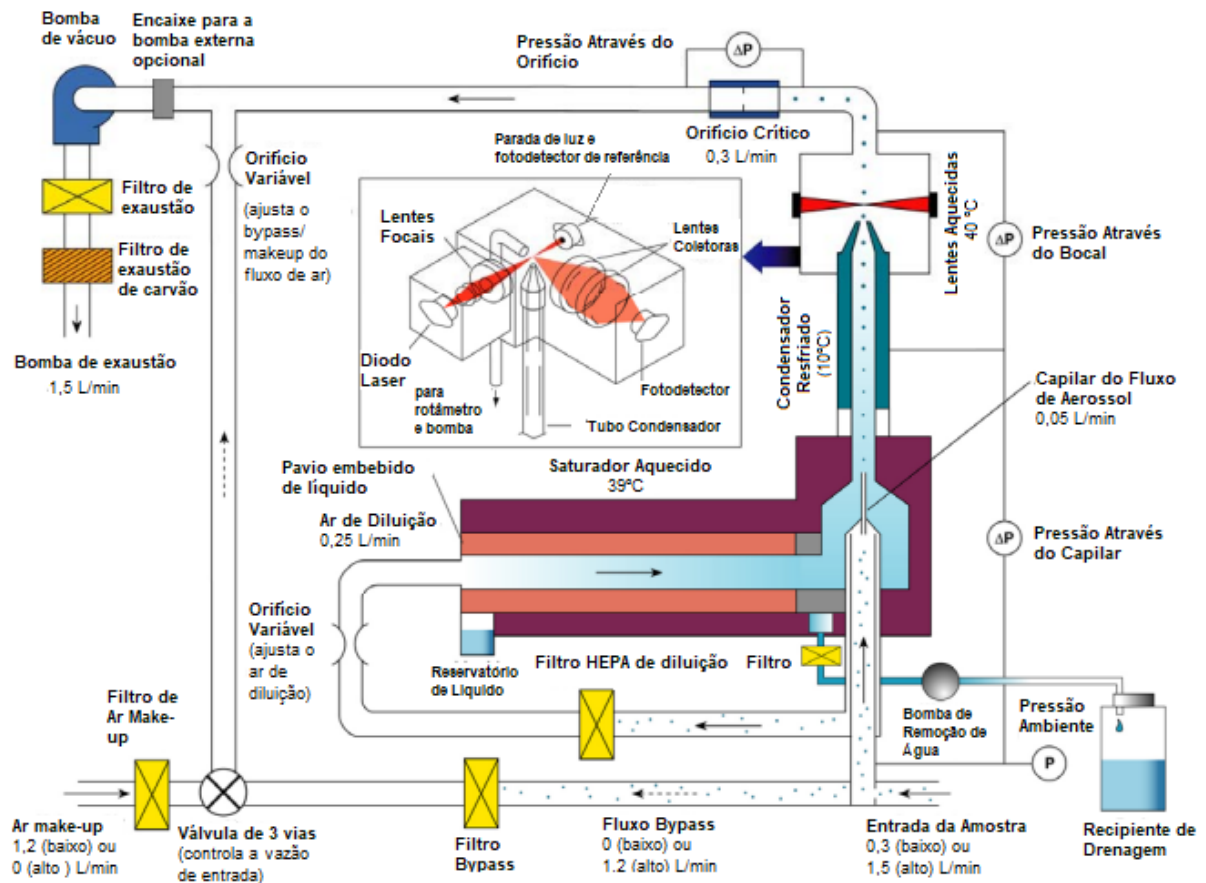
Fonte: TSI (2006).

A Figura 24 mostra uma representação do interior do equipamento. Seu funcionamento consiste na passagem contínua de uma amostra de aerossol através de um capilar. Essa amostra é misturada com um escoamento de ar de diluição limpo, após a passagem pelo saturador aquecido a 39°C, onde o butanol é vaporizado e difunde na corrente de ar de diluição. Juntos, a amostra de aerossol e o vapor de butanol passam pelo condensador resfriado a 10°C, onde 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. O formato da trajetória percorrida pelo escoamento de ar de diluição confina o percurso do fluxo de aerossol próximo ao eixo do condensador, de modo que as partículas são expostas à região de maior supersaturação e uniformidade do vapor de butanol (TSI, 2006).

Uma bomba de vácuo interna bombeia a amostra de aerossol para o interior do contador de partículas 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). Nos experimentos realizados foi utilizada a operação de vazão alta, por 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. As partículas no ar de diluição são retidas por um filtro HEPA, 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 logo 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).

Figura 24: Representação do interior do contador de partículas



Fonte: Adaptado de TSI (2006).

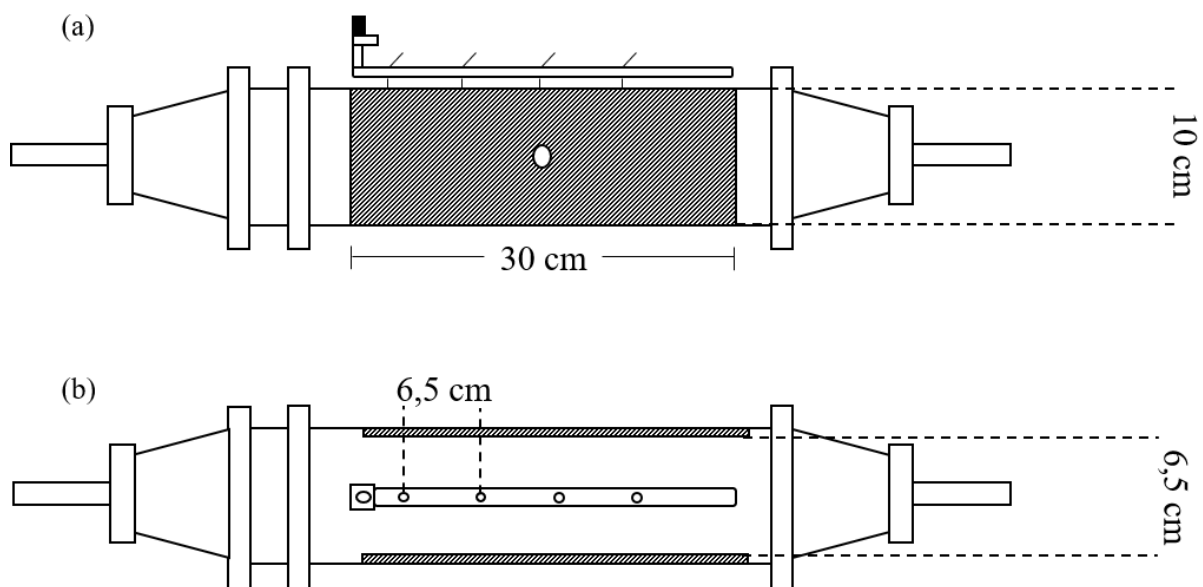
As gotas passam pelo tubo condensador através de um bocal no detector óptico. O líquido que condensa nas paredes do tubo condensador escoar para baixo e retorna para o saturador, onde é absorvido pelo pavio para reuso. O detector do sensor óptico é composto de um diodo laser, lentes de colimação, lentes cilíndricas, lentes coletoras, e um detector fotodiodo. 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. 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).

4.1.2 Precipitador Eletrostático

O precipitador eletrostático utilizado nos experimentos foi do tipo placa-fio de simples estágio, representado na Figura 25. A estrutura central do precipitador utilizado é de acrílico, e os encaixes da entrada e da saída são de plástico. A entrada de ar no equipamento possui um difusor, que promove a homogeneização do escoamento do aerossol no interior do precipitador. Nas paredes laterais do equipamento foram fixadas duas placas coletoras de cobre de 2 mm de espessura, 30 cm de comprimento e 10 cm de altura, espaçadas entre si em 6,5 cm. Os eletrodos de descarga são fios de aço inoxidável dispostos em uma fileira na região central entre as placas coletoras, fixados através de um suporte de cobre localizado na região superior do precipitador eletrostático. O espaçamento entre os fios foi escolhido com base nas dimensões do equipamento e nos trabalhos de Kasdi (2016) e El Dein e Usama (2014). Logo, o espaçamento utilizado foi de 6,5 cm.

Figura 25: Representação do precipitador eletrostático: (a) vista lateral; (b) vista superior



Fonte: Autor, 2020.

4.2 Procedimento Experimental

As variáveis operacionais foram a concentração da solução de NaCl, a velocidade de escoamento do ar e o campo elétrico. Os parâmetros geométricos foram analisados em 3 etapas distintas: a variação do número de eletrodos de descarga mantendo o diâmetro dos fios constante, a variação do diâmetro dos fios para as configurações dos números de fios que apresentaram menor eficiência na etapa 1 e a variação do espaçamento entre os fios para cada diâmetro de fio utilizado.

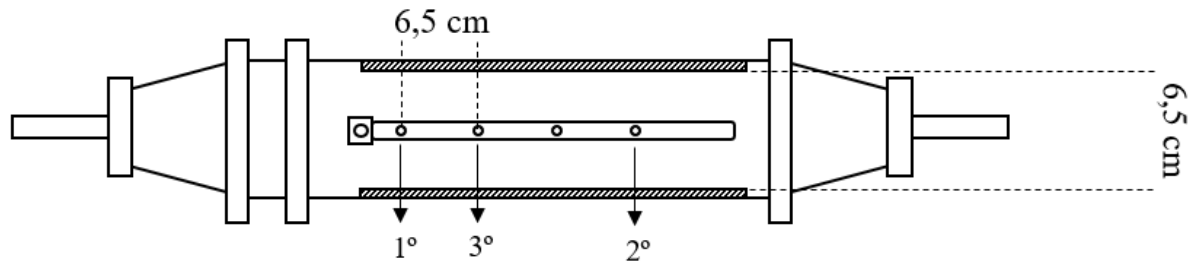
Antes da execução dos experimentos de cada etapa, foi realizado o levantamento das curvas corrente-tensão, através da aferição da corrente elétrica para os valores de voltagens previamente determinados. As curvas foram construídas para cada configuração dos eletrodos de descarga e condição operacional utilizada. A partir dos resultados obtidos foi escolhida a faixa de operação do campo elétrico.

4.2.1 Etapa 1: Variação do Número de Fios

Os experimentos foram realizados com as concentrações da solução de NaCl de 0,1 e 0,5 g/L. Para ambas as concentrações, as velocidades de escoamento do ar utilizadas foram 1,03, 2,04 e 4,08 cm/s. A escolha desses valores foi baseada no trabalho de Oliveira e Guerra, (2018) e teve por objetivo avaliar o desempenho do precipitador operando a baixas velocidades, com menores concentrações de solução. Nos experimentos com a concentração de solução de 0,1 g/L, foram realizados testes de precipitação com as voltagens de 10, 10,3, 10,4, 10,5, 10,6, 10,7 e 11 kV para cada velocidade estabelecida. As voltagens utilizadas foram convertidas em campos elétricos, através da Equação 11, e foram obtidos os valores de 3,08, 3,17, 3,20, 3,23, 3,26, 3,29 e 3,38 kV/cm. Para a concentração de solução de 0,5 g/L foram realizados experimentos com as mesmas velocidades, entretanto, para cada velocidade foram utilizados apenas os campos elétricos de 3,08 e 3,38 kV/cm e utilizados como base comparativa para os resultados obtidos com a concentração de 0,1 g/L.

Os experimentos descritos acima foram realizados para diferentes configurações do número de fios de descarga. Primeiramente foram realizados os experimentos com 4 fios de descarga com 0,4 mm de diâmetro, em seguida foi retirado 1º fio indicado na Figura 26, e assim por diante, até restar apenas 1 fio no precipitador. É importante ressaltar que o espaçamento entre os fios permaneceu constante. Dessa forma, os experimentos realizados estão reunidos na Tabela 2.

Figura 26: Indicação do número de fios no precipitador eletrostático (vista superior)



Fonte: Autor, 2020.

Tabela 2: Experimentos realizados na Etapa 1

Número de fios	Diâmetro dos fios (mm)	Concentração de solução (g/L)	Velocidade (cm/s)	Campo Elétrico (kV/cm)
1, 2, 3 e 4	0,4	0,1	1,03	3,08, 3,17, 3,20, 3,23, 3,26, 3,29 e 3,38
			2,04	
			4,08	
		0,5	1,03	3,08 e 3,38
			2,04	
			4,08	

Fonte: Autor, 2020.

4.2.2 Etapa 2: Variação do Diâmetro dos Fios

Após a análise dos resultados obtidos na etapa 1, foram realizados experimentos com um novo diâmetro de fio, 0,3 mm, para as configurações do número de fios e para as velocidades de escoamento que forneceram as menores eficiências de coleta de partículas. Nessa etapa, o espaçamento entre os fios foi de 6,5 cm e foi utilizada apenas a concentração da solução de NaCl de 0,1 g/L, por ser o foco principal do presente trabalho. Além disso, foram selecionados os campos elétricos que representassem toda a faixa de operação, dessa forma, foram utilizados os valores 3,08, 3,23 e 3,38 kV/cm. Os experimentos realizados nessa etapa estão reunidos na Tabela 3.

Tabela 3: Experimentos realizados na etapa 2

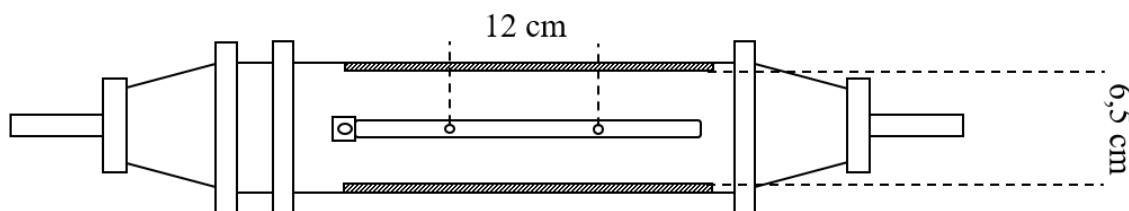
Número de fios	Diâmetro dos fios (mm)	Concentração de solução (g/L)	Velocidade (cm/s)	Campo Elétrico (kV/cm)
Selecionados após a etapa 1	0,3	0,1	1,03 2,04 4,08	3,08, 3,23 e 3,38

Fonte: Autor, 2020.

4.2.3 Etapa 3: Variação do Espaçamento Entre os Fios

Nessa etapa, foram realizados experimentos com a configuração de 2 fios, com um novo espaçamento entre os fios, 12 cm, conforme representado na Figura 27. Essa configuração foi selecionada por não possuir fios entre aqueles localizados nas extremidades, evitando os efeitos de sobreposição do campo elétrico, permitindo uma análise isolada do espaçamento entre os fios. Os experimentos foram realizados para os diâmetros de fio de 0,3 e 0,4 mm, e as condições operacionais utilizadas foram as mesmas da etapa 2. Os experimentos realizados nessa etapa estão reunidos na Tabela 4.

Figura 27: Configuração do precipitador eletrostático utilizada na etapa 3



Fonte: Autor, 2020.

Tabela 4: Experimentos realizados na etapa 3

Número de fios	Diâmetro dos fios (mm)	Concentração de solução (g/L)	Velocidade (cm/s)	Campo Elétrico (kV/cm)
2	0,3	0,1	1,03	3,08, 3,23 e 3,38
	0,4		2,04 4,08	

Fonte: Autor, 2020.

4.3 Número Eletro-Hidrodinâmico

Após a obtenção dos resultados de eficiência de coleta de partículas, foram calculados os valores do número eletro-hidrodinâmico para os experimentos realizados em cada etapa de estudo.

Para esse cálculo utiliza-se a Equação 13, descrita na subseção 3.5, que utiliza o valor da corrente elétrica respectiva à cada campo elétrico aplicado. Entretanto, para menores valores de campo elétrico, não foi possível aferir o exato valor da corrente elétrica, devido à limitação de casas decimais da fonte de alta tensão. Desse modo, as correntes foram estimadas através de um ajuste de curva realizado nas curvas corrente-tensão, seguido da aproximação dos valores das correntes, baseado na metodologia utilizada por Aissou *et al.* (2015) e Said *et al.* (2014). Esses trabalhos utilizam uma equação modificada da corrente elétrica (Equação 17).

$$I = A \times (V - V_0)^m \quad (17)$$

Onde,

I : corrente elétrica (mA);

A : fator geométrico;

V : voltagem (kV);

V_0 : voltagem de início da corona (kV);

m : expoente.

Para encontrar o valor de m , pode-se aplicar logaritmo em ambos os lados da equação, como mostrado na Equação 18.

$$\log_{10}(I) = m \times \log_{10}(V - V_0) + b \quad (18)$$

Ou,

$$I = 10^b \times (V - V_0)^m \quad (19)$$

Logo,

$$A = 10^b \quad (20)$$

Onde b é o coeficiente linear da reta.

Uma vez obtidos os valores das correntes elétricas, esses dados foram inseridos na Equação 15 e calculados os valores das razões entre os números eletro-hidrodinâmicos e o número de Reynolds ao quadrado.

4.4 Análise Estatística

Após a realização dos experimentos, os resultados obtidos foram avaliados através de uma análise estatística. Desse modo, foi necessário selecionar as principais condições operacionais e os parâmetros de projeto em cada etapa do estudo, de modo que os experimentos realizados fossem representados pelos planejamentos fatoriais de 2^k ou 3^k , onde k é o número de fatores, as variáveis independentes, e as bases 2 e 3 são os números de níveis dos fatores. Dessa forma, as condições operacionais selecionadas serão detalhadas na subseção 5.5, dos resultados e discussões.

Inicialmente foi avaliada a influência de cada variável na eficiência de coleta de partículas, através da análise dos efeitos, do erro padrão e da significância estatística (p-valor). Os efeitos apresentam sinal positivo quando aumentam o valor da variável de resposta, nesse caso a eficiência de coleta, e negativo quando reduzem o valor. Quanto maior o efeito, maior será seu valor. Com relação ao p-valor, esse indica a significância dos fatores sobre a variável resposta. Para os cálculos estatísticos foi utilizado um intervalo de confiança de 95%, ou seja, para o fator ser considerado significativo o p-valor deve ser superior a 0,05 (SANTOS, 2014).

Em seguida, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para comprovar as variáveis que apresentaram uma influência significativa nos resultados de eficiência, com base no p-valor e nos valores de F, razão entre a variação entre as médias das amostras e a variação dentro das amostras (MINITAB, 2019). Essas influências foram quantificadas a partir do diagrama de Pareto. Por fim, foram plotadas as superfícies de resposta, metodologia utilizada para visualizar o comportamento da variável de resposta em função das variáveis independentes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

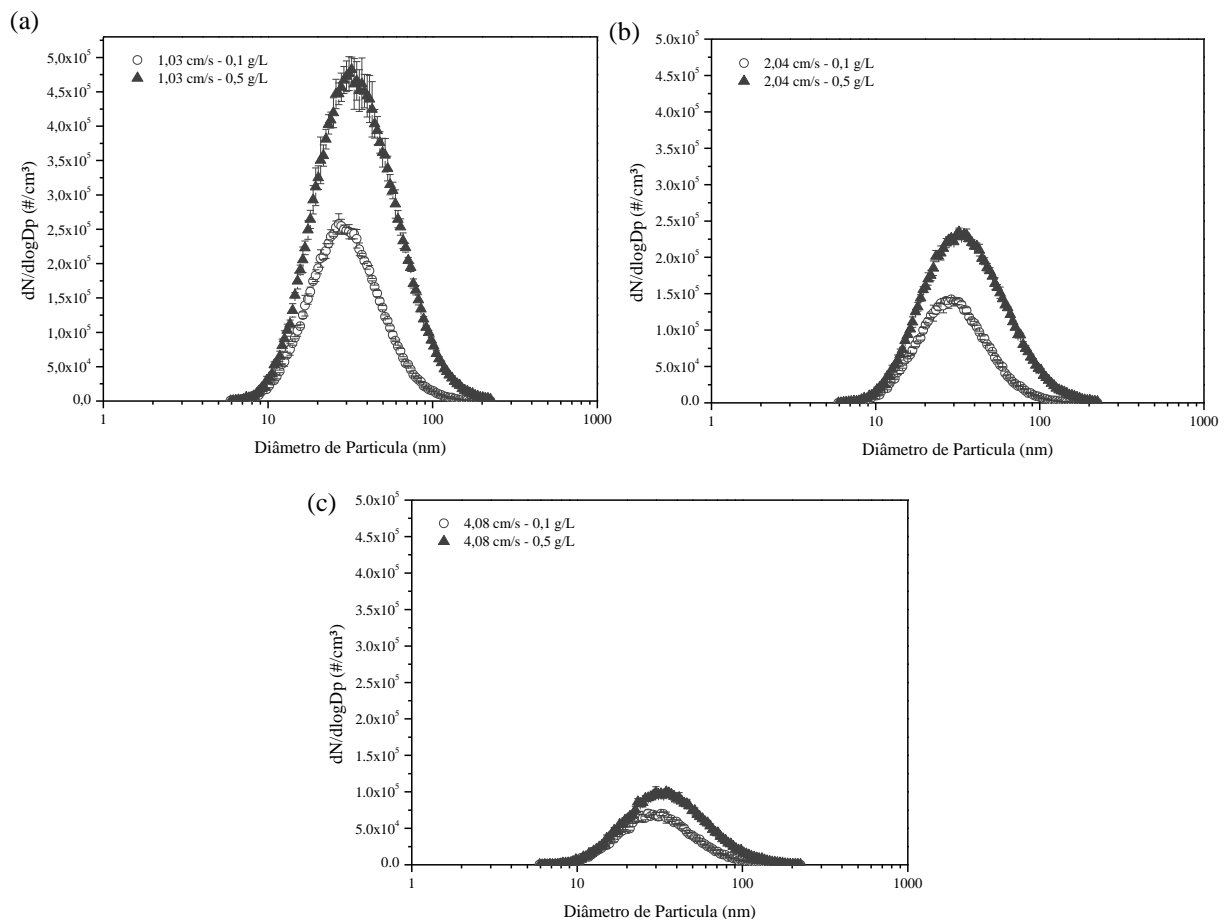
5.1 Resultados da Etapa 1

Nessa subseção serão apresentados os resultados da primeira etapa do estudo, onde serão discutidas as propriedades do aerossol utilizado, as características das curvas corrente-tensão, os resultados das eficiências de coleta e o comportamento do número eletro-hidrodinâmico.

5.1.1 Propriedades do Aerossol

A distribuição granulométrica do material particulado disperso no aerossol, na entrada do precipitador eletrostático, foi obtida através das análises realizadas pelo classificador eletrostático e pelo contador de partículas, descritos previamente na subseção 4.1.1. As curvas obtidas para cada velocidade e concentração inicial de NaCl, em função do número de partículas, estão exibidas na Figura 28.

Figura 28: Distribuição granulométrica das nanopartículas na entrada do precipitador eletrostático nas velocidades de (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s e (c) 4,08 cm/s



Fonte: Autor, 2020.

A partir dos gráficos de distribuição granulométrica da Figura 28, observa-se que a concentração de 0,5 g/L gerou um maior número de partículas, em relação à concentração de 0,1 g/L. Além disso, o aumento da velocidade do ar gerou um aerossol mais diluído. Também pode ser observado que as curvas obtidas com a velocidade de 4,08 cm/s apresentaram pontos com maiores desvios, indicando que o aumento da velocidade não favorece a uniformidade da geração do aerossol.

Pode ser constatado que a maior parte das partículas presentes no aerossol apresentam diâmetro entre 10 e 100 nm, para todas as velocidades e concentrações de solução utilizadas. Para partículas nessa faixa de diâmetro, o mecanismo de carregamento elétrico das partículas predominante é o carregamento por difusão (RIEHLE, 1997b). Desse modo, o processo de carregamento das partículas torna-se mais difícil, por não depender de um campo elétrico aplicado externamente. Esse campo ajudará no carregamento da partícula, mas não é essencial para o processo de carregamento por difusão (WHITE, 1963). Assim, as partículas dependem principalmente das colisões randômicas oriundas do processo de difusão, que se torna mais difícil para partículas da ordem de grandeza nanométrica.

Como pode ser observado pela Figura 28, as curvas apresentaram um comportamento muito semelhante, que pode ser comprovado a partir dos dados das medianas e dos desvios padrões geométricos (σ) das partículas antes da entrada do precipitador eletrostático, expostos na Tabela 5. Como os dados foram coletados antes da passagem pelo precipitador eletrostático, o número de fios apresentado na Tabela 5 é utilizado apenas como uma referência dos experimentos realizados.

O material particulado disperso no aerossol possuía mediana de cerca de 29 nm e 34 nm, para as concentrações de 0,1 e 0,5 g/L, respectivamente. Dessa forma, o aumento da concentração inicial de solução favorece a geração de partículas de maior diâmetro e com um maior desvio padrão geométrico. Um comportamento semelhante foi observado com o aumento da velocidade do ar, que resultou em uma distribuição granulométrica com valores de mediana um pouco maiores (cerca de 1 nm).

Tabela 5: Mediana e σ da distribuição do material particulado (em unidades numéricas) com diferentes velocidades de ar

Número de Fios	Velocidade (cm/s)	Mediana (nm)		σ^* (nm)	
		0,1 g/L	0,5 g/L	0,1 g/L	0,5 g/L
1	1,03	28,95 ± 0,22	34,41 ± 0,03	1,66 ± 0,01	1,73 ± 0,01
	2,04	29,68 ± 0,17	34,20 ± 0,20	1,66 ± 0,02	1,76 ± 0,00
	4,08	30,09 ± 0,13	34,42 ± 0,02	1,63 ± 0,00	1,76 ± 0,00
2	1,03	28,94 ± 0,19	34,05 ± 0,12	1,65 ± 0,01	1,74 ± 0,00
	2,04	29,30 ± 0,09	34,28 ± 0,03	1,63 ± 0,01	1,76 ± 0,00
	4,08	29,28 ± 0,17	35,34 ± 0,68	1,62 ± 0,01	1,73 ± 0,01
3	1,03	29,30 ± 0,32	33,60 ± 0,07	1,64 ± 0,01	1,75 ± 0,01
	2,04	30,08 ± 0,30	34,08 ± 0,19	1,64 ± 0,01	1,74 ± 0,00
	4,08	30,08 ± 0,49	34,31 ± 0,09	1,65 ± 0,00	1,74 ± 0,00
4	1,03	29,43 ± 0,50	33,84 ± 0,24	1,65 ± 0,02	1,77 ± 0,01
	2,04	29,41 ± 0,44	33,61 ± 0,15	1,66 ± 0,01	1,77 ± 0,01
	4,08	30,02 ± 0,22	34,29 ± 0,11	1,67 ± 0,00	1,75 ± 0,01

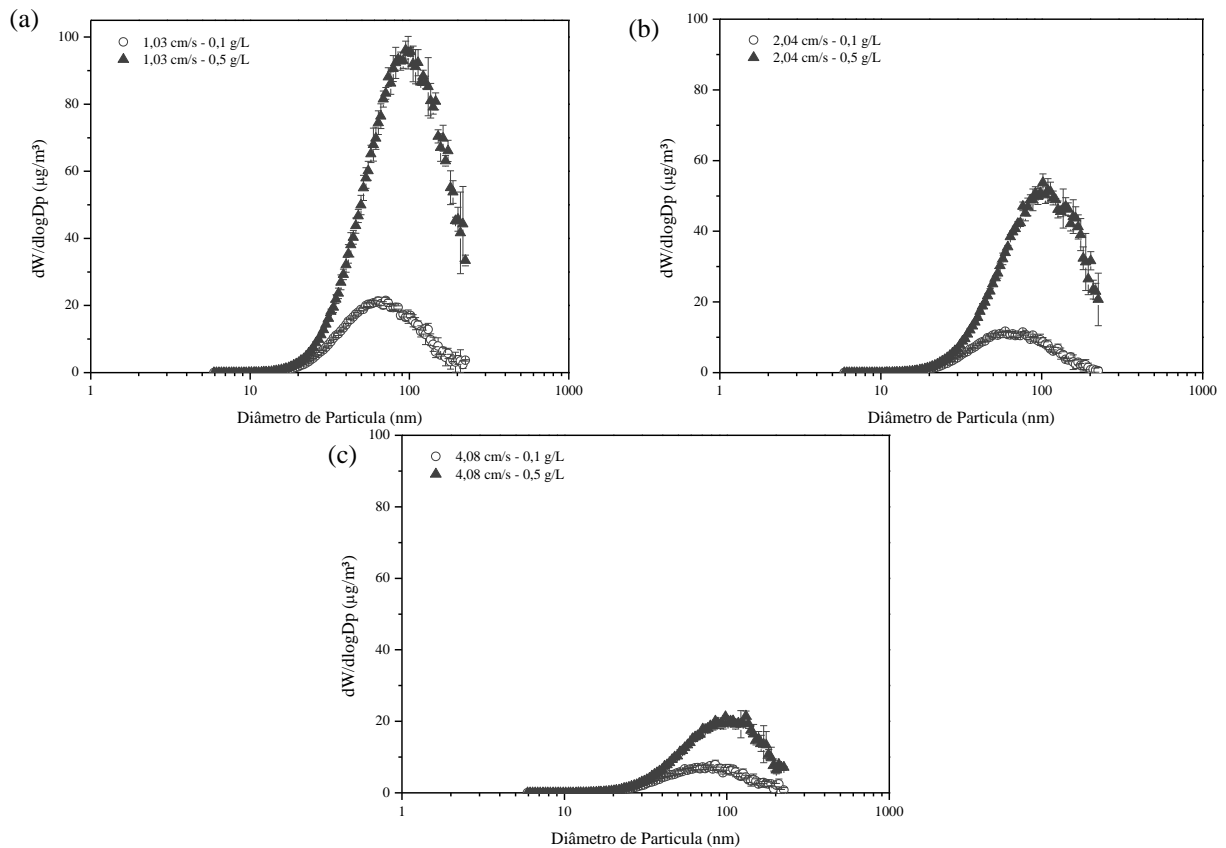
* σ : desvio padrão geométrico.

Fonte: Autor, 2020.

Do mesmo modo, foi obtida a distribuição granulométrica do material particulado em unidades mássicas. As curvas estão expostas na Figura 29. Apesar da maior parte do material particulado possuir diâmetro entre 10 e 100 nm, algumas partículas possuem uma massa praticamente desprezível, devido ao seu pequeno tamanho. Para as curvas com concentração de 0,1 g/L, a maior fração mássica da amostra corresponde às partículas com diâmetro entre 50 e 100 nm, enquanto para a concentração de 0,5 g/L, essas partículas apresentam diâmetro entre 70 e 150 nm. O aumento da velocidade reduziu a massa total das partículas em cada diâmetro analisado, o que está diretamente relacionado com a redução do número de partículas.

A Tabela 6 exhibe os valores das medianas e dos desvios padrões geométricos referentes às distribuições granulométricas mássicas mostradas na Figura 29. Os dados obtidos mostram que as medianas das partículas apresentam valores entre 66 e 72 nm e entre 91 e 96 nm, para partículas formadas a partir de uma concentração de solução de 0,1 e 0,5 g/L, respectivamente. É importante ressaltar que as medianas não apresentaram um comportamento definido com o aumento da velocidade, o que pode indicar que o pequeno aumento da mediana observado na distribuição em função do número de partículas (Tabela 5) não possui significado físico.

Figura 29: Distribuição granulométrica mássica das nanopartículas de aerossol na entrada do precipitador eletrostático nas velocidades de (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s e (c) 4,08 cm/s



Fonte: Autor, 2020.

Tabela 6: Mediana e σ da distribuição mássica do aerossol em função da velocidade

Número de Fios	Velocidade (cm/s)	Mediana (nm)		σ^* (nm)	
		0,1 g/L	0,5 g/L	0,1 g/L	0,5 g/L
1	1,03	67,73 ± 0,77	91,18 ± 1,41	1,70 ± 0,00	1,68 ± 0,00
	2,04	70,98 ± 2,32	95,55 ± 0,23	1,70 ± 0,02	1,68 ± 0,00
	4,08	66,89 ± 0,76	94,52 ± 0,85	1,67 ± 0,01	1,68 ± 0,00
2	1,03	66,19 ± 1,66	92,34 ± 0,73	1,69 ± 0,00	1,68 ± 0,00
	2,04	66,21 ± 0,91	96,38 ± 0,39	1,68 ± 0,01	1,68 ± 0,00
	4,08	65,34 ± 1,94	95,24 ± 2,24	1,68 ± 0,02	1,68 ± 0,01
3	1,03	66,17 ± 1,14	92,60 ± 0,86	1,66 ± 0,01	1,68 ± 0,00
	2,04	67,36 ± 1,14	92,69 ± 0,02	1,67 ± 0,01	1,68 ± 0,00
	4,08	68,47 ± 1,40	91,52 ± 0,95	1,67 ± 0,01	1,67 ± 0,00
4	1,03	68,63 ± 3,72	95,66 ± 0,11	1,69 ± 0,02	1,68 ± 0,00
	2,04	70,12 ± 0,98	94,45 ± 0,80	1,70 ± 0,01	1,68 ± 0,00
	4,08	72,39 ± 1,19	92,31 ± 0,99	1,69 ± 0,01	1,68 ± 0,00

* σ : desvio padrão geométrico.

Fonte: Autor, 2020.

As concentrações de partículas de NaCl na entrada do precipitador eletrostático, para os experimentos realizados com as concentrações iniciais de solução de 0,1 e 0,5 g/L encontram-se nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7: Concentração de partículas de NaCl 0,1 g/L com diferentes configurações de fios, para as velocidades e campos elétricos utilizados, antes da passagem pelo precipitador eletrostático

Velocidade (cm/s)	Campo Elétrico (kV/cm)	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		1 fio	2 fios	3 fios	4 fios
1,03	3,08	12,37 \pm 0,04	12,06 \pm 0,27	11,51 \pm 0,28	12,67 \pm 0,38
	3,17	13,54 \pm 0,21	13,08 \pm 0,16	12,38 \pm 0,03	13,06 \pm 0,25
	3,20	14,20 \pm 0,16	14,66 \pm 0,35	10,69 \pm 0,20	13,08 \pm 1,09
	3,23	13,54 \pm 0,20	14,99 \pm 0,10	10,89 \pm 0,13	14,73 \pm 0,11
	3,26	13,91 \pm 0,23	15,40 \pm 0,26	11,39 \pm 0,13	19,12 \pm 0,17
	3,29	14,35 \pm 0,22	15,90 \pm 0,25	11,88 \pm 0,04	18,25 \pm 0,25
	3,38	14,73 \pm 0,06	16,67 \pm 0,22	12,51 \pm 0,17	14,75 \pm 0,26
	Média	13,81 \pm 0,77	14,68 \pm 1,60	11,61 \pm 0,70	15,09 \pm 2,60
Média Global		13,80 \pm 1,55			
2,04	3,08	8,06 \pm 0,07	6,74 \pm 0,03	6,74 \pm 0,06	8,21 \pm 0,14
	3,17	8,16 \pm 0,06	6,81 \pm 0,06	7,98 \pm 0,10	8,13 \pm 0,07
	3,20	7,58 \pm 0,07	6,91 \pm 0,04	8,12 \pm 0,15	8,58 \pm 0,12
	3,23	8,70 \pm 0,20	7,42 \pm 0,09	8,53 \pm 0,10	9,08 \pm 0,25
	3,26	8,58 \pm 0,14	7,55 \pm 0,15	8,56 \pm 0,11	10,91 \pm 0,23
	3,29	8,88 \pm 0,09	7,85 \pm 0,06	8,70 \pm 0,10	10,11 \pm 0,09
	3,38	7,09 \pm 0,08	8,07 \pm 0,04	9,18 \pm 0,19	10,89 \pm 0,10
	Média	8,15 \pm 0,64	7,33 \pm 0,53	8,26 \pm 0,78	9,42 \pm 1,21
Média Global		8,29 \pm 0,86			
4,08	3,08	3,58 \pm 0,05	2,55 \pm 0,07	3,34 \pm 0,02	3,82 \pm 0,06
	3,17	3,69 \pm 0,10	2,66 \pm 0,04	3,02 \pm 0,08	3,71 \pm 0,03
	3,20	3,75 \pm 0,06	2,75 \pm 0,04	2,97 \pm 0,03	3,92 \pm 0,04
	3,23	3,90 \pm 0,10	3,06 \pm 0,03	3,15 \pm 0,10	3,99 \pm 0,02
	3,26	3,11 \pm 0,09	3,09 \pm 0,08	3,23 \pm 0,06	4,23 \pm 0,07
	3,29	3,47 \pm 0,09	3,03 \pm 0,14	3,17 \pm 0,03	4,01 \pm 0,19
	3,38	3,31 \pm 0,12	2,98 \pm 0,02	3,24 \pm 0,08	4,39 \pm 0,13
	Média	3,55 \pm 0,27	2,87 \pm 0,22	3,16 \pm 0,13	4,01 \pm 0,23
Média Global		3,40 \pm 0,49			

Fonte: Autor, 2020.

Analisando primeiramente os dados expostos na Tabela 7, observa-se que a concentração de partículas em cada experimento realizado foi mantida praticamente constante, o que pode ser verificado pelos baixos valores dos desvios padrões. Do mesmo modo, quando comparados o conjunto de experimentos realizados com um mesmo campo elétrico, para cada combinação da velocidade do ar e da configuração do número de fios, as concentrações foram muito próximas entre si. O maior desvio padrão foi 2,60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para os experimentos com 1,03

cm/s, na configuração de 4 fios. A partir da média global calculada para os experimentos realizados com cada velocidade do ar utilizada, observa-se novamente baixos desvios padrões, indicando que foi possível manter a concentração de partículas dos experimentos realizados com a mesmo número de fios muito próximas entre si.

Com relação às concentrações de partículas obtidas a partir da solução de 0,5 g/L (Tabela 8), é possível observar que os experimentos apresentaram baixos desvios padrões em cada experimento realizado. No entanto, esses desvios aumentam ao serem comparados os experimentos com diferentes campos elétricos para 0,1 g/L, mas, esses valores se tornam muito pequenos quando comparados com a ordem de grandeza das concentrações. O mesmo pode ser concluído para as médias globais obtidas para cada velocidade de ar utilizada.

Tabela 8: Concentração de partículas de NaCl 0,5 g/L com diferentes configurações de fios, para as velocidades e campos elétricos utilizados, antes e após a passagem pelo precipitador eletrostático

Velocidade (cm/s)	Campo Elétrico (kV/cm)	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		1 fio	2 fios	3 fios	4 fios
1,03	3,08	$57,70 \pm 0,21$	$57,55 \pm 1,57$	$53,81 \pm 0,85$	$57,07 \pm 0,41$
	3,38	$59,89 \pm 0,34$	$60,89 \pm 0,62$	$54,83 \pm 0,40$	$59,09 \pm 0,68$
	Média	$58,79 \pm 1,55$	$59,22 \pm 2,36$	$54,32 \pm 0,72$	$58,08 \pm 1,43$
Média Global		$57,60 \pm 2,24$			
2,04	3,08	$31,07 \pm 0,15$	$31,01 \pm 0,08$	$32,52 \pm 0,25$	$32,90 \pm 0,45$
	3,38	$31,28 \pm 0,27$	$31,22 \pm 0,49$	$28,58 \pm 0,09$	$31,52 \pm 0,35$
	Média	$31,17 \pm 0,15$	$31,12 \pm 0,15$	$30,55 \pm 2,79$	$32,21 \pm 0,97$
Média Global		$31,26 \pm 0,69$			
4,08	3,08	$12,35 \pm 0,60$	$11,86 \pm 0,19$	$12,04 \pm 0,28$	$10,64 \pm 0,11$
	3,38	$13,56 \pm 0,44$	$12,93 \pm 0,34$	$12,04 \pm 0,28$	$11,08 \pm 0,39$
	Média	$12,96 \pm 0,85$	$12,39 \pm 0,76$	$12,04 \pm 0,00$	$10,86 \pm 0,31$
Média Global		$12,06 \pm 0,89$			

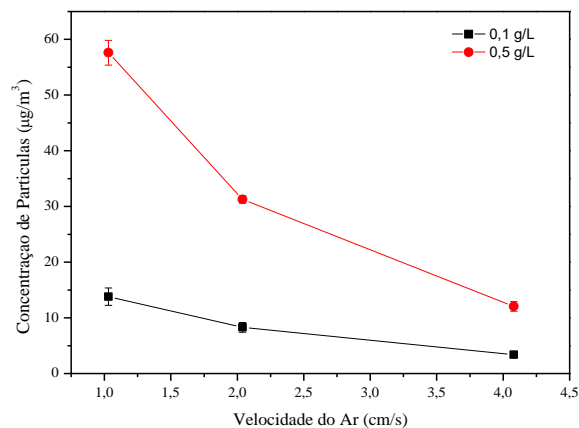
Fonte: Autor, 2020.

Além da solução utilizada, a velocidade do ar também influenciou diretamente na concentração de partículas, visto que como a vazão do gerador de aerossol é mantida constante, a variação da velocidade do ar de diluição é responsável pelas alterações na concentração de material particulado. Assim, foi escolhida uma velocidade inicial, de 2,04 cm/s, para avaliar o efeito de reduzir a velocidade pela metade, aproximadamente 1,03 cm/s, e de duplicar a velocidade, 4,08 cm/s.

Para a concentração de solução de 0,1 g/L, observa-se que ao reduzir a velocidade de 2,04 para 1,03 cm/s, a concentração de partículas aumenta em torno de 66% do seu valor. Analogamente, ao duplicar a velocidade de 2,04 cm/s para 4,08 cm/s, a concentração de partículas apresenta uma redução de cerca de 60% do seu valor. Para a solução de 0,5 g/L, a velocidade de 1,03 cm/s resulta em uma concentração de partículas aproximadamente 84% maior do valor da concentração obtida com a velocidade de 2,04 cm/s. Ao aumentar ainda mais a velocidade de 2,04 para 4,08 cm/s, a concentração de partículas reduz em cerca de 60% do seu valor, resultado semelhante ao obtido com a concentração de 0,1 g/L.

Para melhor visualização dos dados expostos nas Tabelas 7 e 8, foi construído o gráfico da Figura 30. As curvas indicam que a variável que exerceu maior influência nos resultados foi a concentração inicial de solução. Logo, as concentrações de partículas obtidas com a solução inicial de 0,5 g/L foram cerca de 3,5 a 4 vezes maiores do que àquelas obtidas com a solução inicial de 0,1 g/L. Além disso, o aumento da velocidade do ar apresentou um efeito mais pronunciado nos resultados da concentração de 0,5 g/L.

Figura 30: Concentração de partículas em função da velocidade de ar, geradas a partir de diferentes concentrações de solução



Fonte: Autor, 2020.

A variação da velocidade altera não somente as concentrações de partículas dispersas, mas também o tempo de residência dessas partículas no interior do precipitador eletrostático. O aumento da velocidade resulta no movimento mais rápido das partículas, reduzindo o tempo necessário para que seja percorrido todo o precipitador, denominado tempo de residência. Na Tabela 9, encontram-se os respectivos tempos de residência para as velocidades utilizadas. Ao reduzir a velocidade de 2,04 cm/s para 1,03 cm/s, o tempo de residência das partículas duplica, e, ao aumentar a velocidade de 2,04 cm/s para 4,08 cm/s, o tempo de residência das partículas

é reduzido pela metade. Por conta disso, as partículas que se dispersam com maior velocidade possuem um menor tempo para colidirem entre si, prejudicando o carregamento elétrico e, conseqüentemente, reduzindo a eficiência de coleta dessas partículas, como será detalhado na subseção 5.2.

Tabela 9: Tempos de residência para diferentes velocidades

Velocidade (cm/s)	Tempo de Residência (s)
1,03	29,18
2,04	14,72
4,08	7,36

Fonte: Autor, 2020.

5.1.2 Curvas Corrente-Tensão

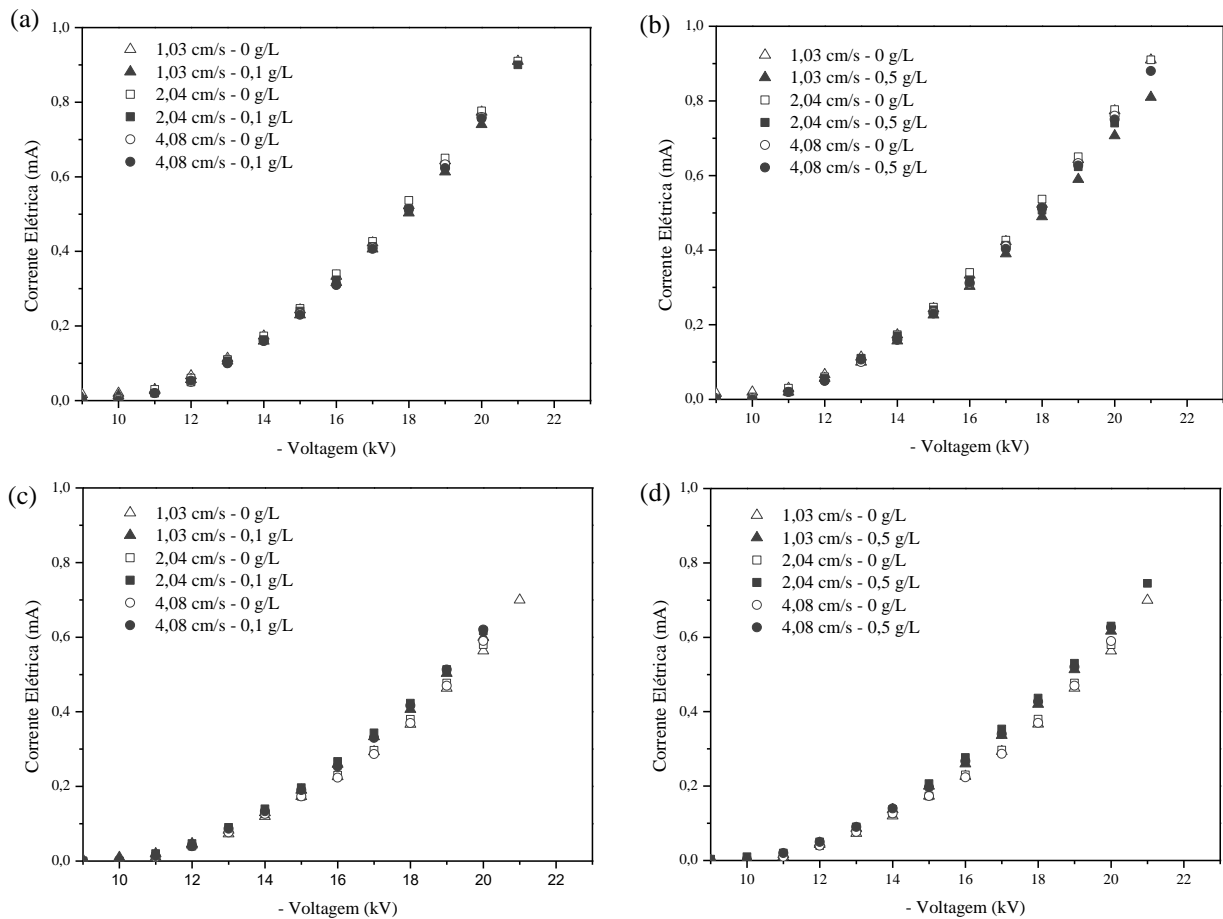
As curvas corrente-tensão obtidas para cada condição operacional e configuração do número de fios estão mostradas na Figura 31. Todas as curvas apresentaram o comportamento esperado, ou seja, a corrente elétrica aumentou com a voltagem aplicada, até atingir o ponto de ruptura dielétrica. Esses dados corroboram os resultados de Kherbouche *et al.*, (2016), Nouri *et al.*, (2016) e Kim *et al.*, (2017). Pela análise das curvas, observa-se que a variável que afetou os resultados de maneira mais expressiva foi o número de eletrodos de descarga. Quanto maior o número de fios, maior a corrente elétrica obtida, o que favorece a coleta de partículas no interior do precipitador. O mesmo comportamento foi observado por El Dein e Usama (2014) e Kasdi (2016). Além disso, o aumento do número de fios aumenta a voltagem de início da corona, principalmente para as configurações de 3 e 4 fios, uma vez que os efeitos de blindagem se tornam mais pronunciados ao utilizar um maior número de eletrodos de descarga (EL DEIN e USAMA, 2014).

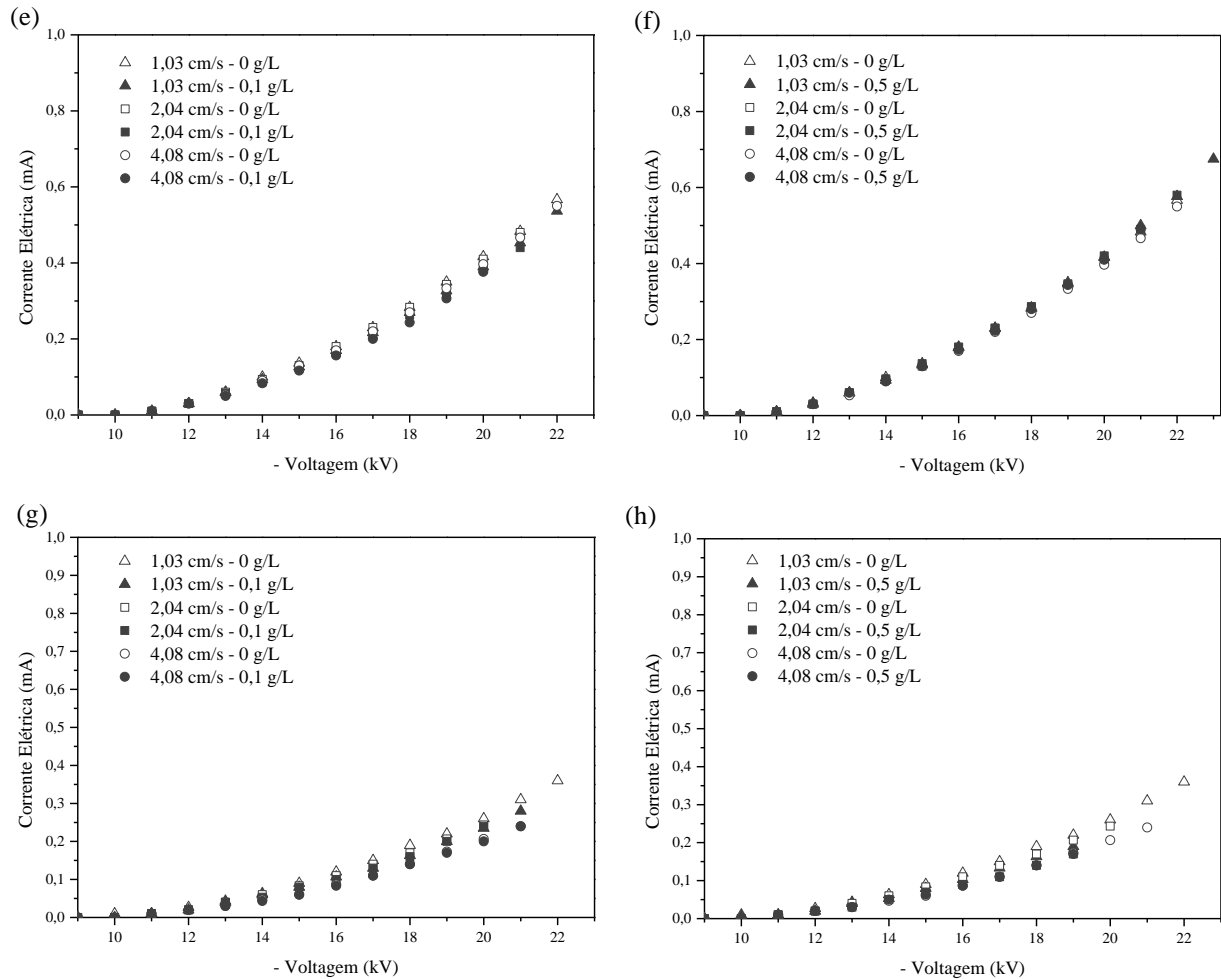
A variação da velocidade e da concentração inicial de solução alteraram minimamente os valores de corrente obtidos, como pode ser observado pela proximidade, e até mesmo sobreposição, dos pontos em diferentes condições operacionais na Figura 31. Analisando apenas a influência da concentração inicial de NaCl, pode-se concluir que essa variável não apresentou um comportamento bem definido, apresentando oscilações quando comparadas às diferentes configurações de fios. Isso pode ter ocorrido pelas baixas concentrações de solução utilizadas, que geraram correntes elétricas com valores muito próximos. Apenas na configuração de 1 fio pode ser identificado que o ponto de ruptura dielétrica ocorreu em

voltagens inferiores para os experimentos contendo partículas de NaCl, com destaque para a concentração de 0,5 g/L.

No caso da velocidade do ar, foi possível identificar que o aumento da velocidade utilizada reduziu a corrente elétrica produzida nas configurações com 2 fios e 1 fio de descarga. Nessas configurações, a corrente elétrica apresentou valores muito menores do que aqueles com 3 e 4 fios, evidenciando o efeito da velocidade do ar. Segundo Zhuang *et al.*, (2000), a corrente corona é menor pela redução do tempo de residência dos íons formados, ou seja, o tempo é insuficiente para que estes atinjam as placas coletoras.

Figura 31: Curvas corrente-tensão para diferentes velocidades e concentrações de NaCl com: (a) e (b) 4 fios, (c) e (d) 3 fios, (e) e (f) 2 fios e (g) e (h) 1 fio.





Fonte: Autor, 2020.

Com base na análise das curvas corrente-tensão, foi escolhida a faixa de operação da voltagem entre 10 e 11 kV, ou seja, 3,08 e 3,38 kV/cm, por ser a região de início da corrente corona. Nessa região, pequenas alterações nas condições operacionais modificam significativamente as curvas de eficiência de coleta das partículas no precipitador eletrostático, o que contribui para alcançar os objetivos do presente trabalho.

5.1.3 Eficiência de Coleta de Partículas

Após a realização dos experimentos, foram calculadas as eficiências fracionárias obtidas em cada diâmetro de partícula analisado. As Figuras 32, 33 e 34 apresentam as curvas de eficiência fracionária para a concentração inicial de 0,1 g/L, para cada campo elétrico e configuração de número de fios utilizada, para as velocidades de 1,03, 2,04 e 4,08 cm/s, respectivamente.

Pelos resultados obtidos, foi comprovado que o aumento do campo elétrico fornecido ao precipitador eletrostático aumenta significativamente a eficiência de coleta de partículas. Esse resultado está relacionado com o comportamento das curvas corrente-tensão, uma vez que maiores campos elétricos geram maiores correntes elétricas. Nos experimentos realizados, o intervalo do campo elétrico utilizado, o máximo valor da corrente elétrica obtida foi de 0,03 mA, referente ao campo elétrico de 3,38 kV/cm. Esse dado indica que um aumento muito pequeno, na ordem de grandeza de 10^{-5} A, no valor da corrente elétrica é suficiente para alcançar valores muito maiores de eficiência de remoção de partículas.

As curvas de eficiência referentes à velocidade de 1,03 cm/s indicam que o precipitador eletrostático utilizado consegue atingir elevadas eficiências de remoção, superiores a 99%, e que o número de fios utilizado influenciou diretamente na eficiência de remoção. As maiores eficiências foram obtidas para a configuração de 4 fios (Figura 32-a), entretanto, a configuração de 3 fios (Figura 32-b) apresentou resultados muito semelhantes, apesar das menores correntes elétricas. Em ambas as configurações, apenas os experimentos realizados com o campo elétrico de 3,08 kV/cm não foi capaz de alcançar eficiências de remoção superiores a 90%.

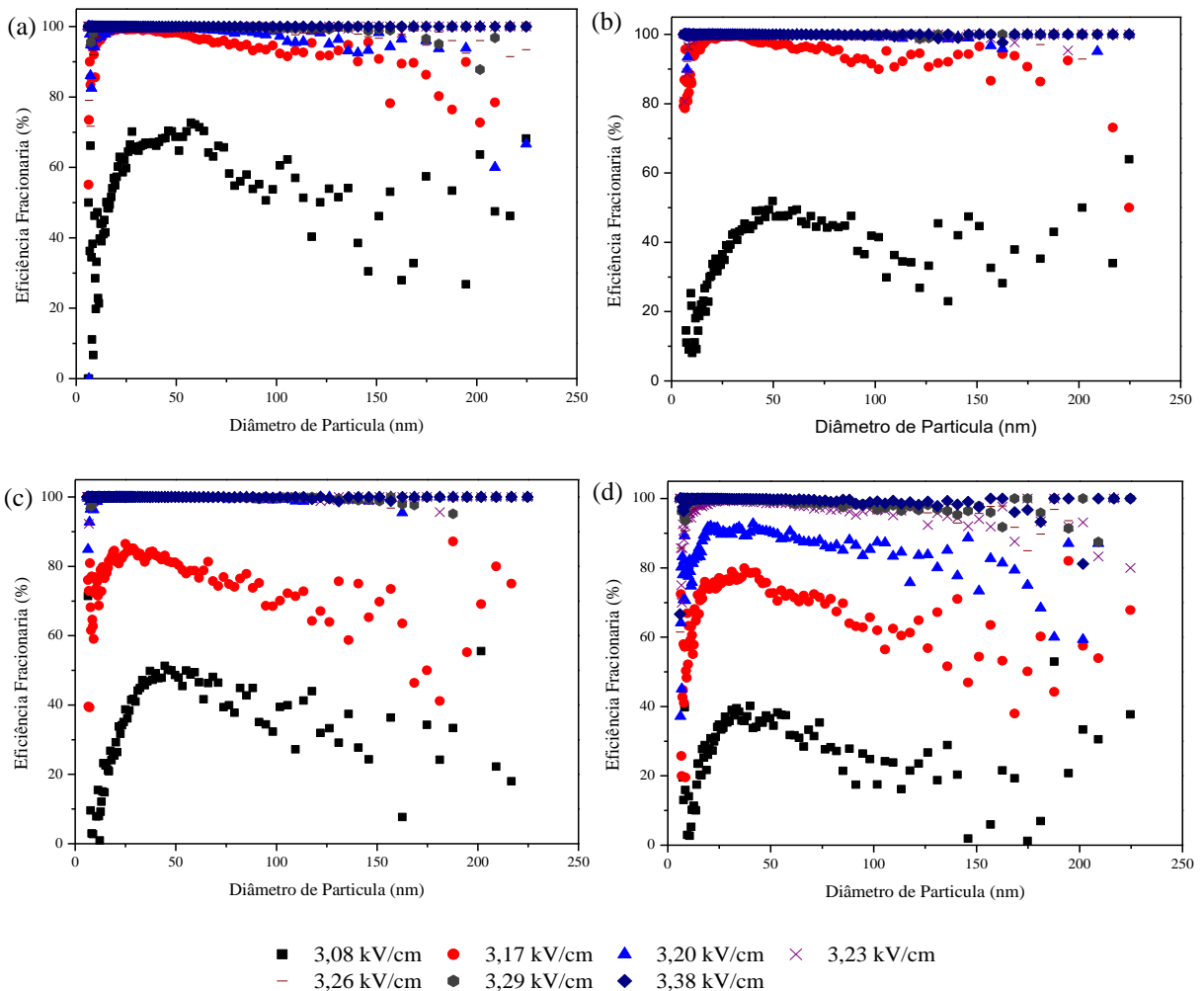
Ao reduzir o número de fios para 2 (Figura 32-c), o precipitador conseguiu manter elevadas eficiências de remoção para os experimentos realizados com o campo elétrico superior a 3,20 kV/cm, visto que, a remoção de partículas com o campo elétrico de 3,17 kV/cm reduziu para cerca de 80%. A remoção de partículas diminuiu ao utilizar apenas 1 fio de descarga (Figura 32-d), de modo que eficiências superiores a 90% foram obtidas com os maiores campos elétricos, nos quais já é possível visualizar um pequeno decaimento das eficiências de remoção de partículas com diâmetros entre 60 e 200 nm.

Através das curvas da Figura 32 pode-se evidenciar que com a velocidade de 1,03 cm/s, o precipitador eletrostático foi capaz de remover com elevada eficiência as partículas de NaCl, mesmo na configuração com apenas 1 fio de descarga, para os maiores campos elétricos, como 3,38 kV/cm. As correntes elétricas obtidas para todas as configurações de fios, entre 3,08 e 3,38 kV/cm, foram praticamente iguais entre si, como pode ser observado na Figura 31. Porém, a redução do número de fios de descarga diminuiu as eficiências de coleta. Ning *et al.*, (2016) sugerem que é possível aumentar a eficiência de coleta apenas inserindo mais fios de descarga, mesmo que essa modificação não altere significativamente a corrente elétrica gerada. Esse comportamento está associado à mudança do padrão de escoamento no interior do precipitador

eletrostático, indicando que o fluxo eletro-hidrodinâmico exerce um papel importante na remoção de partículas.

Outras particularidades dessas curvas (Figura 32), são as regiões de máxima e mínima eficiência de remoção, evidenciadas nos experimentos que atingiram menor eficiência. A máxima eficiência foi obtida entre os diâmetros de 25 e 50 nm e a de mínima eficiência entre 150 e 200 nm. Oliveira e Guerra (2018) associam o declínio na eficiência ao balanço entre a mobilidade elétrica e o número de cargas adquiridas pelas partículas. Para os diâmetros de partículas inferiores ao de máxima eficiência, a remoção de partículas também apresenta baixos valores, o qual Zhuang *et al.*, (2000) associa à ineficiência do carregamento de partícula.

Figura 32: Eficiência fracionária para a velocidade de 1,03 cm/s e concentração inicial de 0,1 g/L, com diferentes valores de campo elétrico nas configurações de: (a) 4 fios, (b) 3 fios, (c) 2 fios e (d) 1 fio

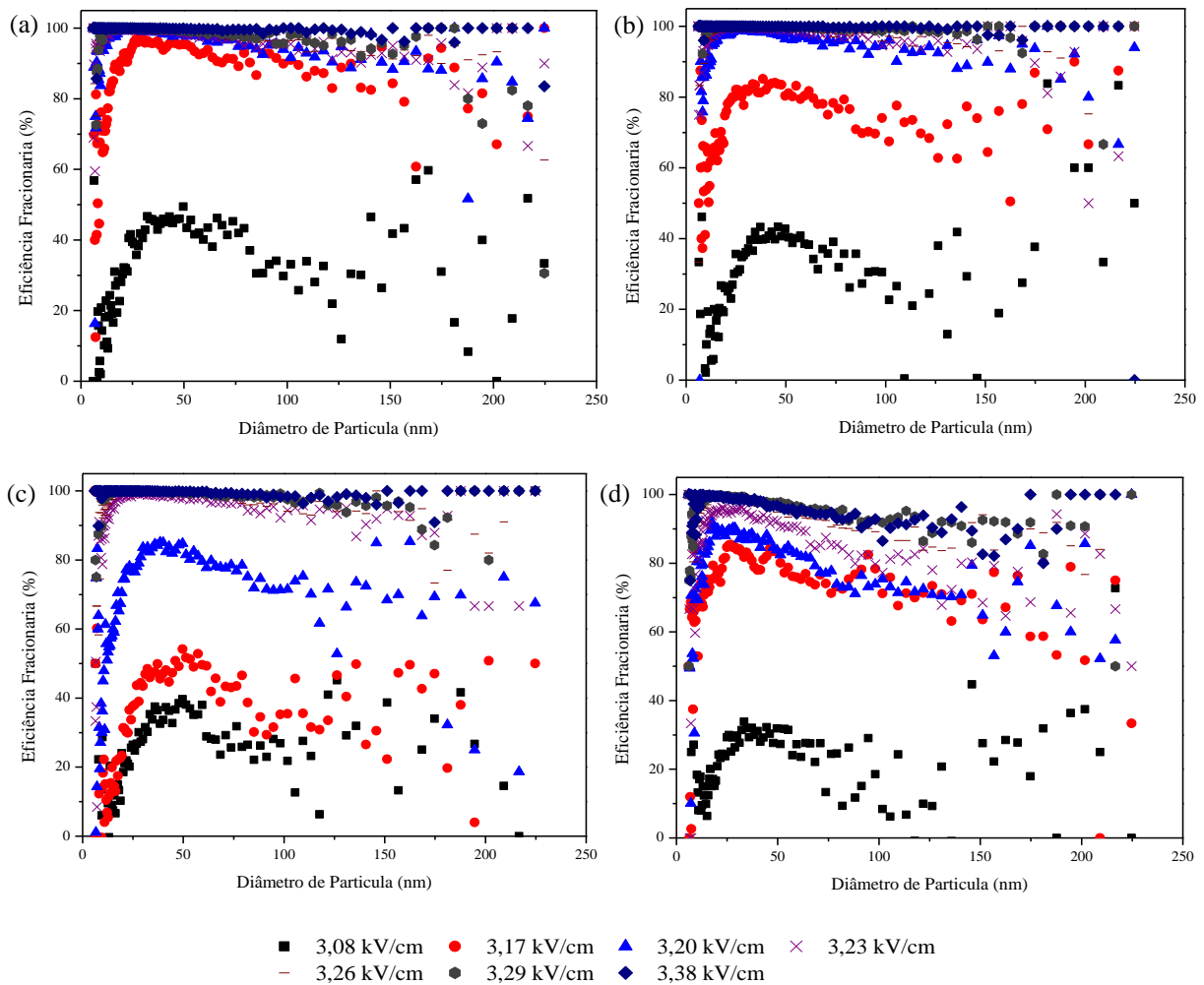


Fonte: Autor, 2020.

O aumento da velocidade para 2,04 cm/s reduziu o tempo de residência das partículas e, conseqüentemente, a eficiência de remoção. Na configuração de 4 fios (Figura 33-a) é

possível observar a redução da eficiência para todos os campos elétricos, e, da mesma forma que os resultados obtidos para a velocidade de 1,03 cm/s, as curvas da configuração de 3 fios (Figura 33-b) foram semelhantes às de 4 fios, para campos elétricos superiores a 3,17 kV/cm.

Figura 33: Eficiência fracionária para a velocidade de 2,04 cm/s e concentração inicial de 0,1 g/L, com diferentes valores de campo elétrico nas configurações de: (a) 4 fios, (b) 3 fios, (c) 2 fios e (d) 1 fio



Fonte: Autor, 2020.

A eficiência de remoção decaiu ainda mais ao utilizar 2 fios de descarga (Figura 33-c), apresentando elevadas remoções somente a partir de 3,23 kV/cm. As menores eficiências foram obtidas com a configuração de 1 fio (Figura 33-d), porém, houve o aumento da eficiência de remoção com o campo elétrico de 3,17 kV/cm, em comparação com a configuração de 2 fios. Isso pode estar relacionado à redução da blindagem do campo elétrico entre fios adjacentes, de modo que na ausência desse efeito, e na presença de um campo elétrico suficientemente forte, ocorreu o aumento da eficiência. Esse comportamento condiz com as observações feitas por Ziedan *et al.*, (2010) e Kasdi (2016), que observaram que quanto maior o número de eletrodos

de descarga, maior o efeito da blindagem imposto ao fio central, com um consequente aumento na voltagem de início da corona e redução na corrente corona emitida por esse fio. Além disso, o efeito da blindagem reduz na direção das extremidades das placas coletoras, visto que os fios das extremidades sofrem a influência de apenas um fio adjacente.

Por outro lado, para os campos elétricos superiores a 3,20 kV/cm, o aumento do número de fios favoreceu a coleta de partículas. De acordo com Ziedan *et al.*, (2010), a configuração de apenas 1 fio apresenta um menor campo elétrico próximo às placas coletoras, em relação aos obtidos com múltiplos fios. Também foram observadas nos resultados da velocidade de 2,04 cm/s as faixas de máxima e mínima eficiência, descritos para a velocidade de 1,03 cm/s.

Ao aumentar a velocidade de escoamento do ar para 4,08 cm/s, observa-se a redução da eficiência logo na configuração de 4 fios (Figura 34-a), na qual apenas o campo elétrico de 3,38 kV/cm obteve eficiência de remoção superior a 90%. Esse resultado mostra como o aumento da velocidade pode prejudicar a coleta de partículas para a faixa de campo elétrico utilizada.

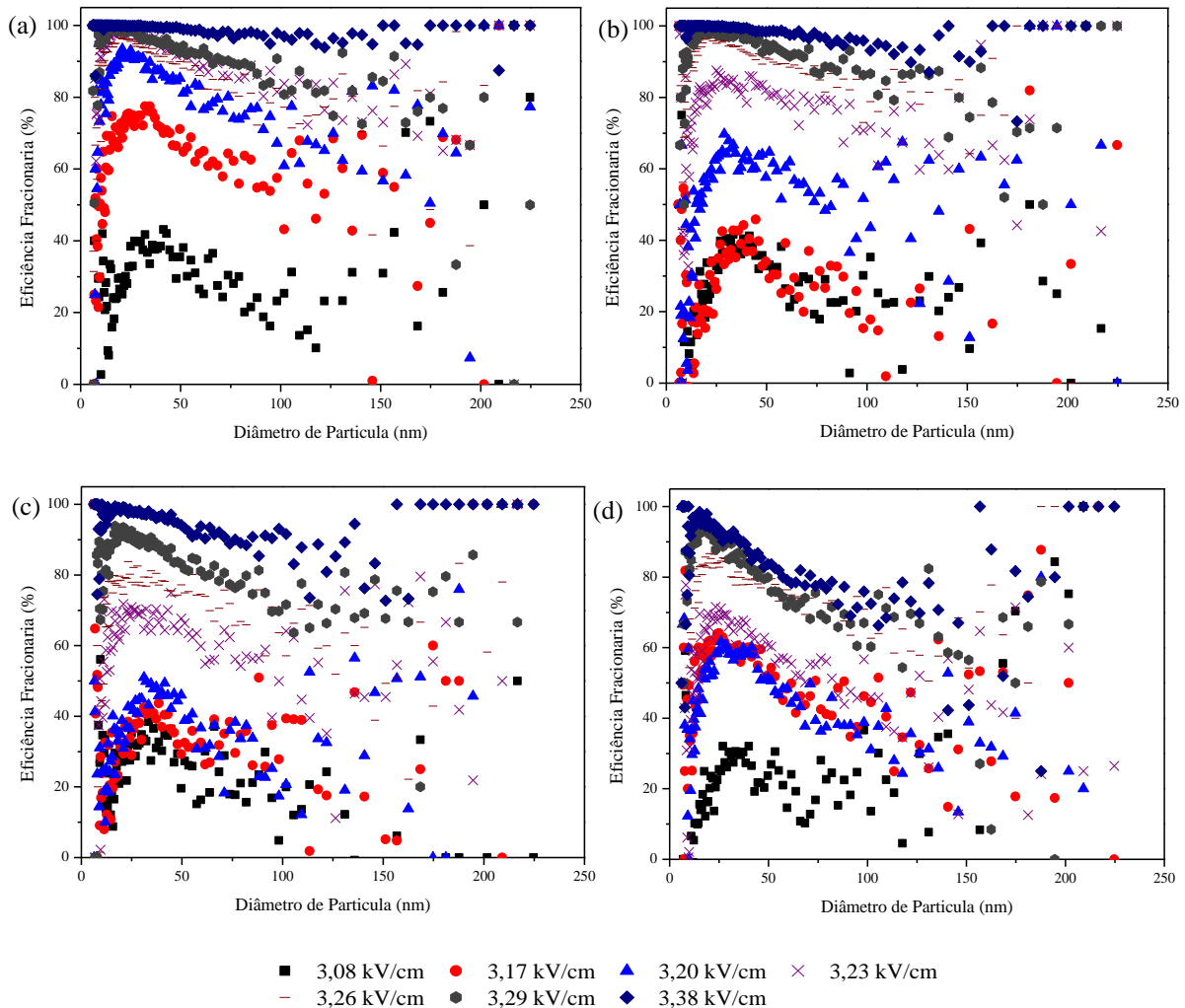
Desse modo, à medida que os fios foram removidos, uma menor percentagem de partículas foi removida do aerossol, por conta do efeito combinado da diminuição da corrente elétrica e da redução do tempo de residência, como na configuração de 3 fios (Figura 34-b). A velocidade de 4,08 cm/s gerou uma maior diferença nas eficiências obtidas com as configurações de 3 e 4 fios, diferente dos resultados com as velocidades de 1,03 e 2,04 cm/s. Como as partículas possuem um menor tempo de residência em comparação com as demais velocidades, a corrente elétrica possui uma influência ainda maior nos resultados. Logo, ao utilizar a configuração de 3 fios, as partículas possuem pouco tempo para serem carregadas eletricamente e a corrente elétrica disponível para esse processo é inferior à da configuração de 4 fios.

Além disso, novamente foi observado o aumento da eficiência da configuração de 1 fio (Figura 34-d) em relação à configuração de 2 fios (Figura 34-c), nesse caso, para os campos elétricos de 3,17 e 3,20 kV/cm. As eficiências apresentaram o mesmo comportamento em relação ao diâmetro de partícula, como descrito para as velocidades mais baixas, caracterizando um comportamento do aerossol de NaCl sob as condições operacionais utilizadas.

Em todas as velocidades utilizadas, as curvas apresentaram um comportamento mais bem definido para as partículas com diâmetro de até 100 nm, o que pode ser relacionado ao fato da maior parte das partículas do aerossol de entrada (como mostrado na Figura 28) possuir essa

faixa de diâmetro. Desse modo, os comportamentos das curvas de eficiência nesses diâmetros seriam mais representativos, visto que possuem um maior número de pontos experimentais.

Figura 34: Eficiência fracionária para a velocidade de 4,08 cm/s e concentração inicial de 0,1 g/L, com diferentes valores de campo elétrico nas configurações de: (a) 4 fios, (b) 3 fios, (c) 2 fios e (d) 1 fio

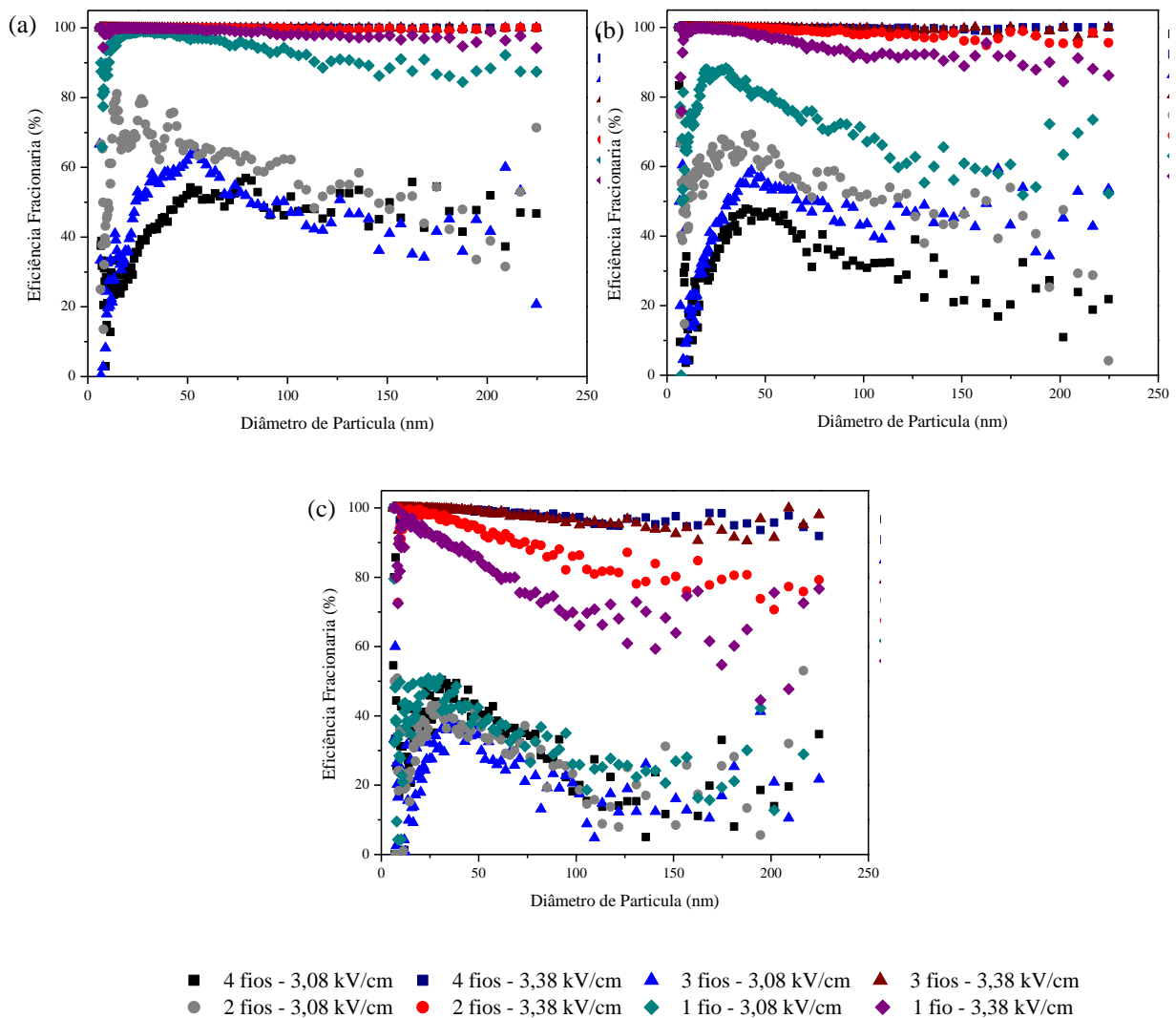


Fonte: Autor, 2020.

De maneira semelhante, foram construídas as curvas de eficiência para os experimentos realizados com 0,5 g/L. Com a velocidade de 1,03 cm/s (Figura 35-a), o campo elétrico de 3,38 kV/cm apresentou elevados valores de eficiência para todas as configurações de fios utilizadas. Para os experimentos com 3,08 kV/cm, as curvas apresentaram um comportamento oposto ao que ocorreu com a concentração de 0,1 g/L, a redução do número de fios aumentou a eficiência de partículas. Para os experimentos com 2, 3 e 4 fios de descarga, as curvas foram próximas entre si, mas, os experimentos com apenas 1 fio apresentaram eficiências superiores, em até 30%, às demais configurações. Esse comportamento atípico pode estar relacionado com a redução do efeito de blindagem do campo elétrico entre fios adjacentes, como observado no

experimento com 0,1 g/L, uma vez que foram eliminados os efeitos impostos pelos fios localizados nas extremidades, apesar das menores correntes elétricas. O mesmo ocorre nos experimentos com 2,04 cm/s, onde já se observa a redução das eficiências obtidas em todos os experimentos, até os realizados com 3,38 kV/cm. Aumentando ainda mais a velocidade do ar para 4,08 cm/s, ocorre uma redução significativa das eficiências de coleta, principalmente com 3,38 kV/cm, e as curvas de 3,08 kV/cm tornam-se muito próximas, praticamente sobrepostas. Com a velocidade de 4,08 cm/s apenas as configurações de 3 e 4 fios conseguiram manter eficiências de coleta superior a 95%, com o maior campo elétrico aplicado. Esse comportamento comprova o efeito negativo da redução do tempo de residência, assim como nos experimentos com 0,1 g/L.

Figura 35: Eficiência Fracionária com a concentração inicial de 0,5 g/L para diferentes campos elétricos nas velocidades de: (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s e (c) 4,08 cm/s

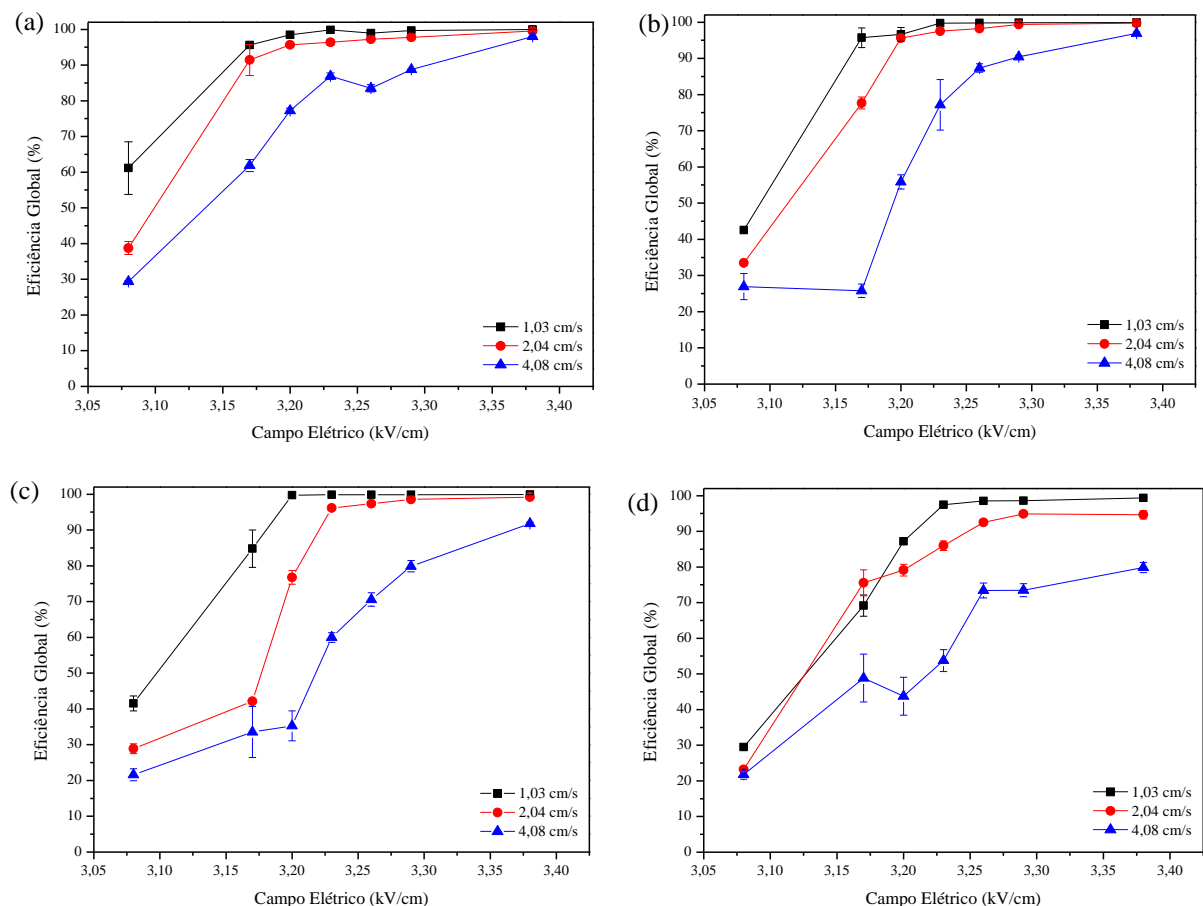


Fonte: Autor, 2020.

A eficácia do precipitador eletrostático pode ser mais bem avaliada pelas percentagens de remoção global, as curvas obtidas para a concentração de 0,1 g/L estão mostradas na Figura 36. Em todas as configurações de número de fios, o precipitador apresentou menor remoção de partículas com o aumento da velocidade do ar, sendo a maior diferença para a curva de 4,08 cm/s. Nas configurações de 4 fios (Figura 36-a) e 3 fios (Figura 36-b), as eficiências de remoção foram muito próximas, principalmente para os experimentos realizados com campo elétrico superior a 3,20 kV/cm. Na configuração de 2 fios (Figura 36-c), as eficiências de remoção com 1,03 cm/s foram muito superiores às obtidas com as velocidades de 2,04 e 4,08 cm/s. No entanto, para a configuração de 1 fio (Figura 36-d) as curvas de 1,03 e 2,04 cm/s foram muito próximas, indicando a redução da eficiência de coleta de partículas.

Também pode ser observado que os maiores desvios ocorreram para a maior velocidade, o que pode estar relacionado com as maiores variações na distribuição inicial do aerossol e da maior flutuação nos pontos de eficiência fracionária, como consequência da maior dificuldade no carregamento elétrica das partículas.

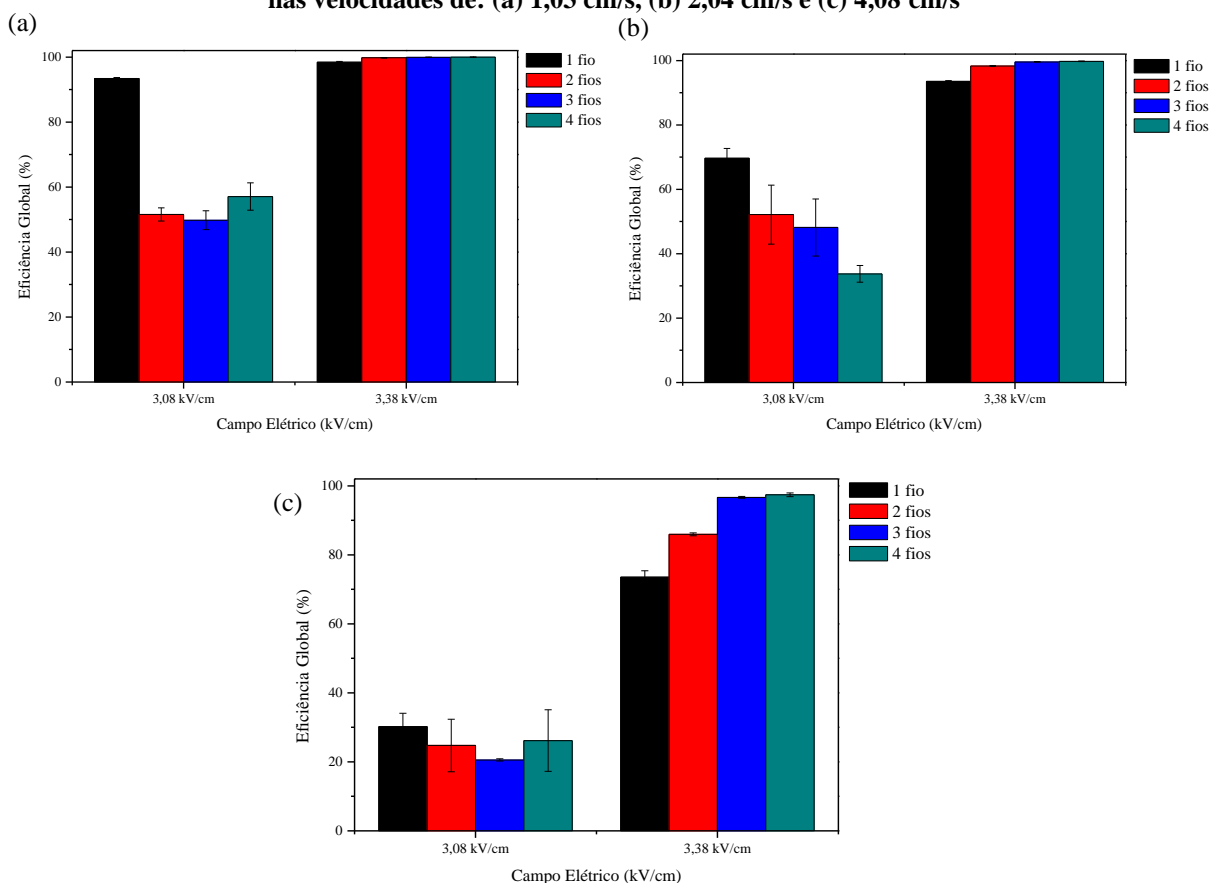
Figura 36: Eficiências globais com a concentração inicial de 0,1 g/L para diferentes velocidades de ar nas configurações de: (a) 4 fios, (b) 3 fios, (c) 2 fios e (d) 1 fio



Fonte: Autor, 2020.

As eficiências globais obtidas com a concentração inicial de 0,5 g/L encontram-se na Figura 37. O aumento do campo elétrico para 3,38 kV/cm elevou consideravelmente a eficiência de coleta de partículas, atingindo valores superiores a 90% para as velocidades de 1,03 e 2,04 cm/s. Para a velocidade de 4,08 cm/s, elevadas eficiências foram obtidas para as configurações de 3 e 4 fios, com 3,38 kV/cm.

Figura 37: Eficiências globais para a concentração de solução de 0,5 g/L para cada configuração de fios nas velocidades de: (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s e (c) 4,08 cm/s



Fonte: Autor, 2020.

Com base nesses dados, conclui-se que o aumento da concentração tem um efeito positivo para a coleta de partículas com campos elétricos próximos à região de início da corona. Esse efeito pode estar relacionado à maior colisão das partículas no interior do precipitador, melhorando o carregamento elétrico e coleta do material particulado. Essa influência da concentração é observada não só nos experimentos com concentração de solução inicial de 0,5 g/L, mas também nos experimentos realizados com 0,1 g/L, com a velocidade de 1,03 cm/s, uma vez que menores velocidades apresentam maiores concentrações de partículas.

Os experimentos realizados com o campo elétrico de 3,08 kV/cm não apresentaram um comportamento bem definido para as diferentes velocidades de operação. Pode-se concluir que

o aumento da velocidade reduziu as eficiências de coleta de partículas para todas os números de fios utilizados. No entanto, observa-se que para a velocidade de 1,03 cm/s a configuração de 1 fio foi cerca de 40% mais eficiente que as demais configurações, que alcançaram percentuais de remoção muito próximos entre si. Com o aumento da velocidade para 2,04 cm/s, a eficiência reduziu com o aumento do número de fios, e as amostras apresentaram maiores desvios.

Esse comportamento atípico da configuração de 1 fio, em todas as velocidades, não era esperado, uma vez que contrastou com os dados obtidos para a concentração de 0,1 g/L. De modo que pode estar associado à redução do efeito de blindagem do campo elétrico, combinado com o aumento da eficiência decorrente da maior concentração de partículas. A Tabela 10 exibe a comparação dos valores de eficiência global apenas para os experimentos com 3,08 e 3,38 kV/cm.

Tabela 10: Eficiência global para diferentes velocidades e campos elétricos para as concentrações de 0,1 e 0,5 g/L

	Velocidade (cm/s)	Campo Elétrico (kV/cm)	Eficiência Global (%)				
			1 fio	2 fios	3 fios	4 fios	
0,1 g/L	1,03	3,08	29,51 ± 0,80	41,55 ± 2,08	42,54 ± 0,35	61,15 ± 7,39	
		3,38	99,36 ± 0,09	99,92 ± 0,01	99,92 ± 0,03	99,99 ± 0,01	
	2,04	3,08	23,23 ± 0,59	28,87 ± 1,37	33,49 ± 0,53	38,76 ± 1,80	
		3,38	94,69 ± 1,17	99,20 ± 0,14	99,74 ± 0,18	99,53 ± 0,08	
	4,08	3,08	21,81 ± 1,33	21,60 ± 1,69	26,94 ± 3,60	29,35 ± 0,18	
		3,38	79,86 ± 1,43	91,79 ± 0,40	96,91 ± 0,41	92,97 ± 0,09	
	0,5 g/L	1,03	3,08	93,39 ± 0,30	51,59 ± 2,03	49,80 ± 2,88	57,07 ± 4,21
			3,38	98,45 ± 0,22	99,78 ± 0,08	99,93 ± 0,03	99,98 ± 0,01
2,04		3,08	69,65 ± 3,01	52,16 ± 9,16	48,14 ± 8,87	33,75 ± 2,58	
		3,38	93,53 ± 0,25	98,30 ± 0,11	99,58 ± 0,07	99,75 ± 0,11	
4,08		3,08	30,22 ± 3,84	24,74 ± 7,61	20,56 ± 0,30	26,17 ± 8,90	
		3,38	73,53 ± 1,87	85,96 ± 0,41	96,64 ± 0,25	97,39 ± 0,54	

Fonte: Autor, 2020.

Através desses dados confirma-se o melhor desempenho do precipitador eletrostático com concentrações mais altas de NaCl e para as velocidades de 1,03 e 2,04 cm/s, para o maior campo elétrico utilizado. Esse comportamento não ocorreu para a velocidade de 4,08 cm/s, visto que a redução do tempo de residência das partículas prejudicou a coleta de partículas em todas as condições operacionais empregadas. De modo geral, a condição que forneceu a maior eficiência foi a configuração de 4 fios, para a velocidade de 1,03 cm/s e com o campo elétrico de 3,38 kV/cm, para a concentração inicial de 0,1 g/L, correspondendo a 99,99%. Com as

mesmas condições operacionais, com uma concentração inicial de 0,5 g/L, obteve-se eficiência de remoção de 99,98%. Através desses resultados, confirma-se a eficiência do precipitador eletrostático utilizado, até mesmo para a utilização de apenas 1 fio de descarga, com a qual foram obtidas eficiências de remoção satisfatórias, as quais devem ser consideradas durante a fase de projeto de um precipitador eletrostático.

5.1.4 Número Eletro-Hidrodinâmico

Após a análise das curvas corrente-tensão, foram calculados os valores do número eletro-hidrodinâmico e do número de Reynolds, bem como a razão entre eles. A Tabela 11 exibe os dados para a concentração de 0,1 g/L. Analisando primeiramente os valores obtidos para a velocidade de 1,03 cm/s, pode-se perceber o comportamento do aumento do N_{EHD}/Re^2 , tanto com o aumento do campo elétrico aplicado, quanto com o aumento do número de fios. Esse comportamento era esperado, pois, como nesses experimentos o número de Reynolds é constante, a variação dos valores é consequência da corrente elétrica. Como discutido nos resultados das curvas corrente-tensão e eficiência de coleta, o aumento do número de fios e do campo elétrico favorece a intensidade da corrente elétrica gerada.

Esse comportamento bem definido não foi observado nos experimentos com a velocidade de 2,04 cm/s. Ocorreu o aumento do N_{EHD}/Re^2 com o campo elétrico, do mesmo modo que para a velocidade de 1,03 cm/s, entretanto, ao comparar os valores obtidos para as diferentes configurações de fios verifica-se uma oscilação ao aumentar o número de eletrodos de descarga. Esse fato pode estar relacionado com a abordagem utilizada para estimativa das correntes elétricas, visto que esse método não consegue determinar com precisão o exato valor da corrente durante os experimentos. O mesmo ocorre para os valores obtidos com a velocidade de 4,08 cm/s.

Além disso, pode ser analisado de forma global que todos os valores foram maiores que 1, indicando a predominância das forças elétricas (NIEWULIS *et al.*, 2010). No entanto, também pode ser observado que o aumento da velocidade do ar reduz os valores do número eletro-hidrodinâmico para todas as configurações de fios, o que expressa a maior influência exercida pelas forças viscosas. O aumento da velocidade também aproxima os valores obtidos com diferentes campos elétricos, ou seja, mesmo que ocorra uma variação na corrente elétrica, ao dividir os dados pelos elevados valores de Reynolds ao quadrado, essa diferença não será tão significativa. Para os experimentos com 0,5 g/L (Tabela 12), ocorreu o aumento do

N_{EHD}/Re^2 com o campo elétrico e a redução com a velocidade do ar. Do mesmo modo, o comportamento oscilatório entre as configurações de fios foi identificado, principalmente para o campo elétrico de 3,08 kV/cm, comprovando que menores correntes elétricas fornecem dados mais imprecisos.

Tabela 11: N_{EHD}/Re^2 para os experimentos realizados com 0,1 g/L

Velocidade (cm/s)	Campo Elétrico (kV/cm)	N_{EHD}/Re^2			
		1 fio	2 fios	3 fios	4 fios
1,03	3,08	57,07	83,33	122,57	167,32
	3,17	155,81	232,75	255,90	407,01
	3,20	194,80	292,48	307,74	503,17
	3,23	236,39	356,48	362,95	606,69
	3,26	280,38	424,46	421,38	717,21
	3,29	326,62	496,19	482,90	834,44
	3,38	477,70	731,98	684,92	1223,93
2,04	3,08	17,79	6,05	17,53	20,39
	3,17	22,07	16,04	68,85	65,66
	3,20	23,50	28,36	90,39	85,17
	3,23	24,93	42,49	113,78	106,70
	3,26	26,36	58,15	138,88	130,16
	3,29	27,78	75,15	165,57	155,49
	3,38	32,07	132,88	254,40	242,09
4,08	3,08	3,74	1,04	7,33	1,67
	3,17	8,08	2,90	18,46	8,96
	3,20	9,80	5,30	23,00	13,91
	3,23	11,65	8,12	27,94	19,57
	3,26	13,62	11,30	33,24	25,86
	3,29	15,71	14,80	38,90	32,73
	3,38	22,66	27,00	57,90	56,47

Fonte: Autor, 2020.

Tabela 12: N_{EHD}/Re^2 para os experimentos realizados com 0,5 g/L

Velocidade (cm/s)	Campo Elétrico (kV/cm)	N_{EHD}/Re^2			
		1 fio	2 fios	3 fios	4 fios
1,03	3,08	7,58	2,99	19,58	12,44
	3,38	143,10	504,73	807,52	959,94
2,04	3,08	49,82	3,37	0,17	16,46
	3,38	148,02	140,57	117,73	269,69
4,08	3,08	5,62	13,23	9,66	1,32
	3,38	26,14	54,20	68,58	58,30

Fonte: Autor, 2020.

5.2 Resultados da Etapa 2

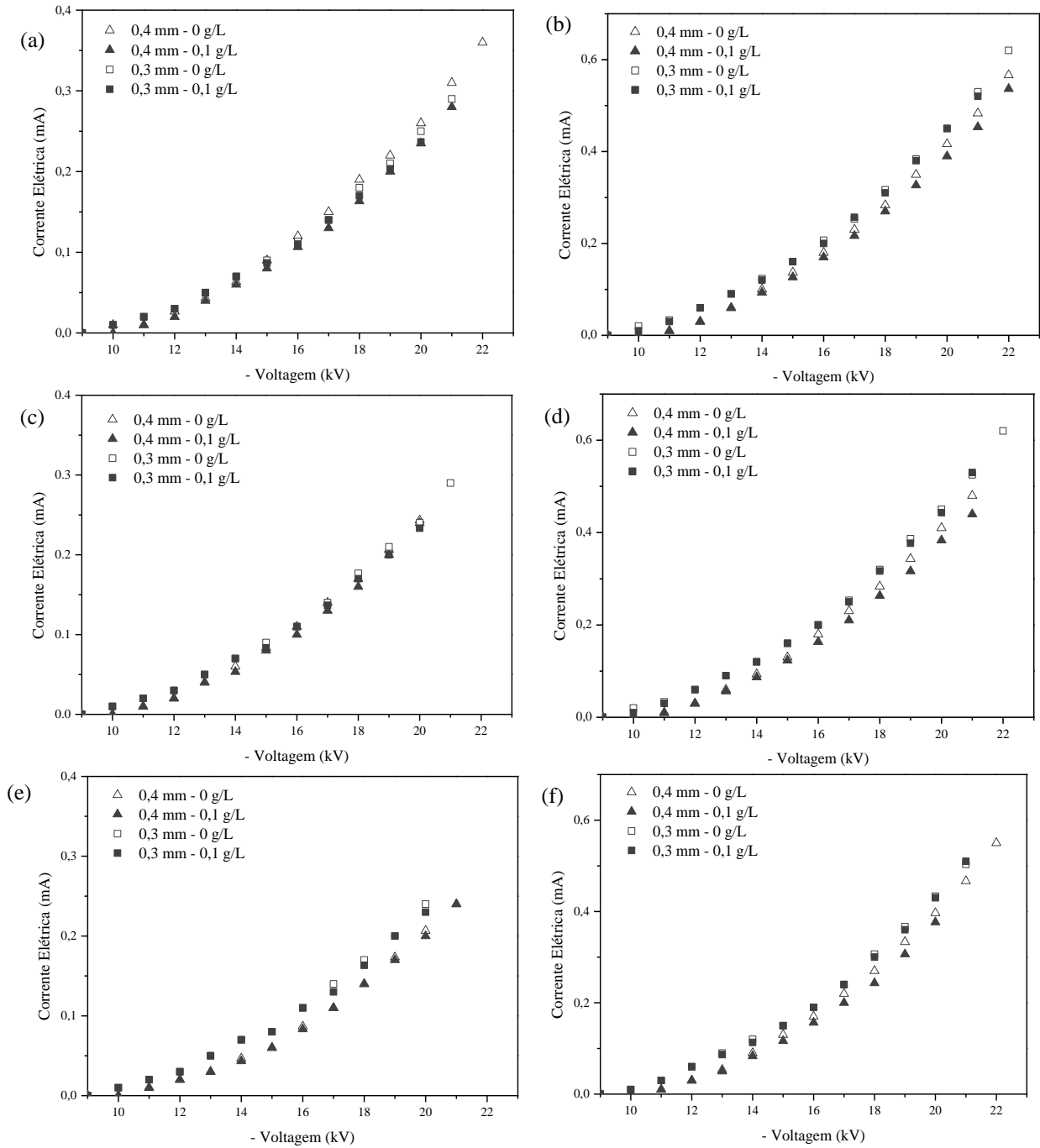
Com base nos resultados da etapa 1, foram escolhidas as configurações de 1 e 2 fios para prosseguir os estudos na etapa 2. Essas condições operacionais foram escolhidas por terem apresentado as menores eficiências de coleta. Desse modo, os experimentos foram realizados com fios de descarga com 0,3 mm de diâmetro, para analisar o efeito dessa variável sob o desempenho do precipitador eletrostático.

Como as velocidades de ar utilizadas foram as mesmas da etapa 1, e a concentração da solução de NaCl foi 0,1 g/L, as distribuições das partículas presentes no aerossol mantiveram-se constantes e podem ser consultadas na subseção 5.1.1.

5.2.1 Curvas Corrente-Tensão

As curvas corrente-tensão para o diâmetro de fio de 0,3 mm foram obtidas experimentalmente para todas as condições operacionais utilizadas, e estão exibidas na Figura 38, juntamente com as curvas referentes ao diâmetro de fio de 0,4 mm. Observa-se que a redução do diâmetro de fio de descarga influenciou positivamente na intensidade da corrente elétrica gerada e reduziu a voltagem de início da corona, corroborando os resultados obtidos por Kasdi (2016), que atribui esse comportamento ao aprimoramento do campo elétrico na superfície de menor diâmetro do fio. Para as curvas com 1 fio de descarga, nas velocidades de 1,03 cm/s (Figura 38-a) e 2,04 cm/s (Figura 38-c), ocorreu o aumento da corrente elétrica obtida para voltagens entre cerca de 9 e 14 kV, englobando a faixa de operação utilizada nos experimentos. Para a velocidade de 4,08 cm/s (Figura 38-e), o aumento da corrente elétrica foi ainda mais pronunciado, o qual pode ser observado pelo afastamento entre as curvas de 0,3 e 0,4 mm.

Figura 38: Curvas corrente-tensão com diferentes concentrações, para as condições operacionais de: (a) 1 fio - 1,03 cm/s, (b) 2 fios - 1,03 cm/s, (c) 1 fio - 2,04 cm/s, (d) 2 fios - 2,04 cm/s, (e) 1 fio - 4,08 cm/s, (f) 2 fios - 4,08 cm/s



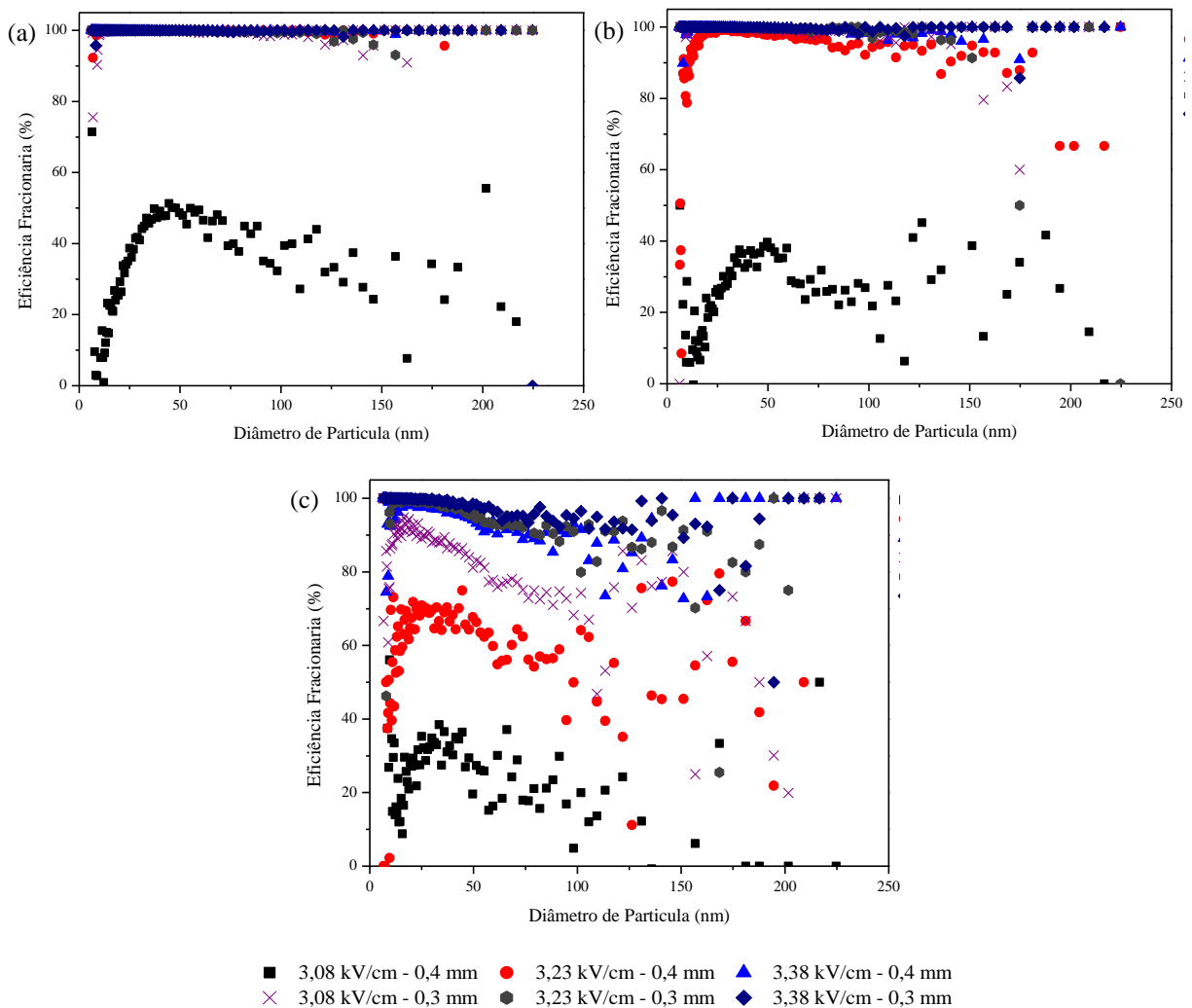
Fonte: Autor, 2020.

5.2.2. Eficiência de Coleta de Partículas

As curvas comparativas da eficiência fracionária obtida para a configuração de 2 fios, com os diâmetros de fio de 0,3 e 0,4 mm estão expostas na Figura 39. Para a velocidade de 1,03 cm/s (Figura 39-a), apenas a curva de 3,08 kV/cm, com 0,4 mm, apresentou uma baixa

eficiência de remoção, o que não ocorreu para o experimento realizados com o mesmo campo elétrico e diâmetro de fio de 0,3 mm. Esse resultado está relacionado diretamente com o aumento da corrente elétrica, mostrado na Figura 38. O mesmo perfil de comportamento é observado para a velocidade de 2,04 cm/s (Figura 39-b), no entanto, as eficiências sofreram uma pequena redução. Analogamente, para a velocidade de 4,08 cm/s (Figura 39-c), o diâmetro de 0,3 mm apresentou os maiores percentuais de remoção de partículas. Em consequência da redução do tempo de residência das partículas, nos experimentos realizados com a maior velocidade ocorre uma significativa diminuição na eficiência, principalmente para os campos elétricos de 3,08 e 3,23 kV/cm

Figura 39: Eficiências fracionárias para os campos elétricos de 3,08, 3,23 e 3,38 kV/cm, para os diâmetros de fio de 0,3 e 0,4 mm na configuração de 2 fios e: (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s, (c) 4,08 cm/s



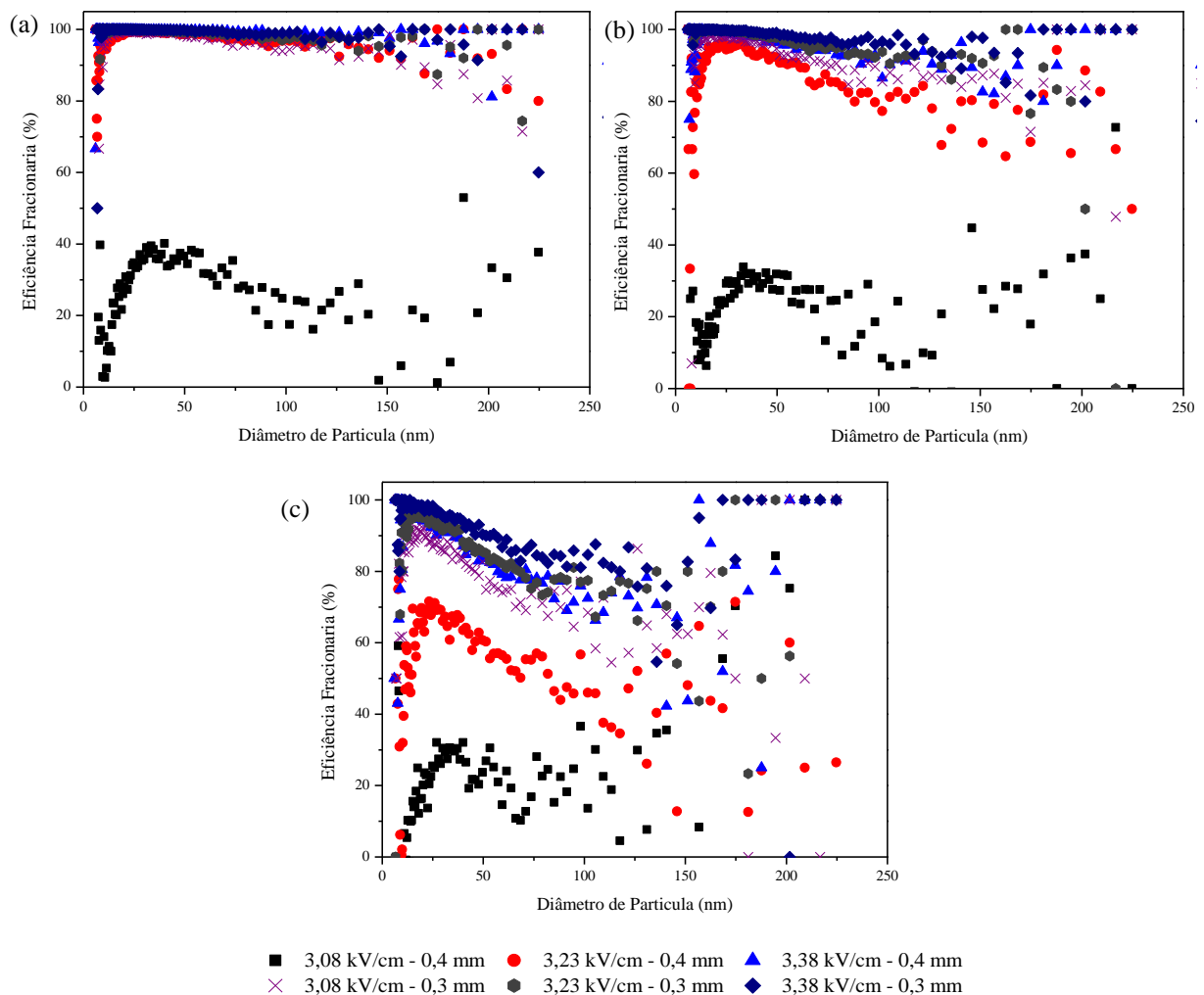
Fonte: Autor, 2020.

Para a configuração de 1 fio (Figura 40), os experimentos realizados com a velocidade de 1,03 cm/s (Figura 40-a) comprovaram a maior eficiência na coleta de partículas ao utilizar

um menor diâmetro de fio, observada principalmente pelo aumento de mais de 50% na eficiência de remoção com o campo elétrico de 3,08 kV/cm.

O aumento da velocidade do ar para 2,04 cm/s (Figura 40-b) e 4,08 cm/s (Figura 40-c) prejudicou a coleta de partículas para todos os campos elétricos e ambos os diâmetros de fios, mas, o diâmetro de 0,3 mm foi mais eficiente em todos os casos. Desse modo, apesar da redução do tempo de residência, a velocidade de 2,04 cm/s permite a obtenção de elevadas eficiências de remoção utilizando apenas 1 fio de descarga.

Figura 40: Eficiências fracionárias para os campos elétricos de 3,08, 3,23 e 3,38 kV/cm, para os diâmetros de fio de 0,3 e 0,4 mm na configuração de 1 fio e: (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s, (c) 4,08 cm/s

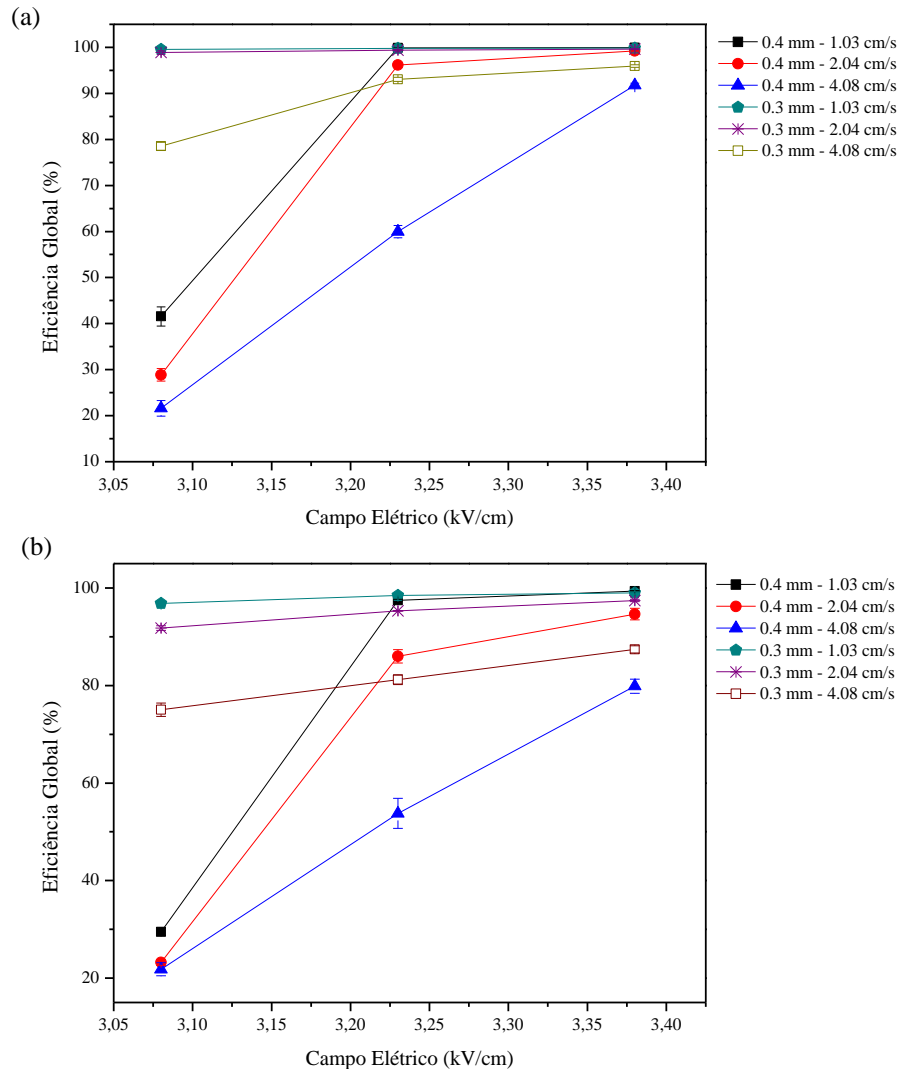


Fonte: Autor, 2020.

Os resultados podem ser melhor visualizados através das curvas de eficiência global, exibidas na Figura 41. Através das curvas, pode ser observado o aumento da coleta de partículas decorrente da redução do diâmetro de fio, principalmente para o campo de 3,08 kV/cm. Os experimentos com diâmetro de fio de 0,3 mm atingiram eficiências de remoção superiores a

70% para todos os campos elétricos utilizados e superiores a 80%, para os campos elétricos de 3,23 e 3,38 kV/cm.

Figura 41: Eficiências globais para os diâmetros de fio de 0,3 e 0,4 mm, para as velocidades de 1,03, 2,04 e 4,08 cm/s nas configurações de: (a) 2 fios e (b) 1 fio



Fonte: Autor, 2020.

5.2.3 Número Eletro-Hidrodinâmico

Através dos resultados obtidos na etapa 2, foram calculados os valores do número eletro-hidrodinâmico. Os valores referentes ao diâmetro de fio de 0,4 mm já haviam sido calculados na subseção 5.1.4, na qual pode ser consultada a metodologia utilizada para estimar as correntes elétricas. Para o diâmetro de fio de 0,3 mm não foi preciso estimar os valores das correntes elétricas, uma vez que os valores obtidos foram facilmente fornecidos pela fonte de alta tensão.

Os dados do N_{EHD}/Re^2 para os experimentos realizados na etapa 2, expostos na Tabela 13, mostram que os resultados obtidos com o diâmetro de fio de 0,3 mm aumentaram, em decorrência do efeito do campo elétrico, e que ocorreu a redução com o aumento da velocidade. Esses resultados estão de acordo com o comportamento dos experimentos com o diâmetro de fio de 0,4 mm. Além disso, os valores de N_{EHD}/Re^2 foram superiores para o diâmetro de fio de 0,3 mm, pois, as correntes elétricas geradas para este diâmetro foram maiores. Alguns pontos apresentaram os mesmos valores, esse comportamento é decorrente das correntes elétricas constantes aferidas na fonte de alta tensão.

Tabela 13: N_{EHD}/Re^2 para os experimentos realizados com 0,1 g/L, nas configurações de 1 e 2 fios

Velocidade (cm/s)	Campo Elétrico (kV/cm)	N_{EHD}/Re^2			
		0,4 mm		0,3 mm	
		1 fio	2 fios	1 fio	2 fios
1,03	3,08	57,07	83,33	432,76	504,89
	3,23	236,39	356,48	432,76	865,52
	3,38	477,70	731,98	865,52	1298,28
2,04	3,08	17,79	6,05	110,10	110,10
	3,23	24,93	42,49	110,10	220,21
	3,38	32,07	132,88	220,21	330,31
4,08	3,08	3,74	1,04	27,53	27,53
	3,23	11,65	8,12	27,53	55,05
	3,38	22,66	27,00	55,05	64,23

Fonte: Autor, 2020.

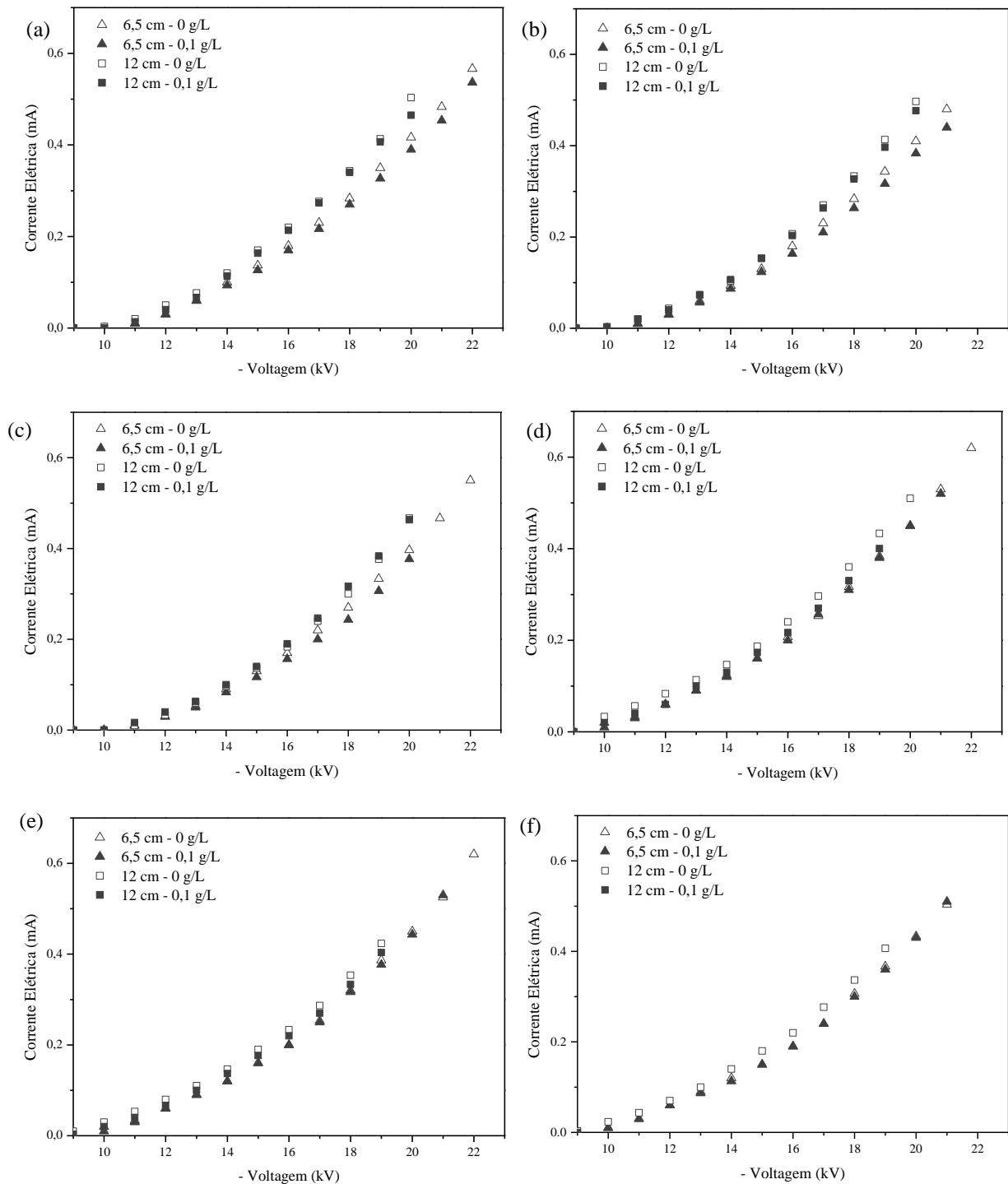
5.3 Resultados da Etapa 3

De maneira semelhante ao que ocorreu na etapa 2, as distribuições do material particulado no aerossol da entrada do precipitador eletrostático foram praticamente iguais às da etapa 1 (Figura 28), bem como as características geométricas de mediana e desvio padrão geométrico (Tabela 5), não sendo necessário exibir os resultados novamente.

5.3.1 Curvas Corrente-Tensão

Para a nova configuração do precipitador eletrostático, 2 fios de descarga espaçados em 12 cm, foram obtidas novamente as curvas corrente-tensão para todas as condições operacionais utilizadas. Os gráficos comparativos para ambos os espaçamentos de fios utilizados estão expostos na Figura 42, para os diâmetros de fio de 0,4 e 0,3 mm.

Figura 42: Curvas corrente-tensão para os espaçamentos entre os 2 fios de 6,5 e 12 cm, para as configurações de: (a) 0,4 mm - 1,03 cm/s, (b) 0,4 mm - 2,04 cm/s, (c) 0,4 mm - 4,08 cm/s, (d) 0,3 mm - 1,03 cm/s, (e) 0,3 mm - 2,04 cm/s e (f) 0,3 mm - 4,08 cm/s



Fonte: Autor, 2020.

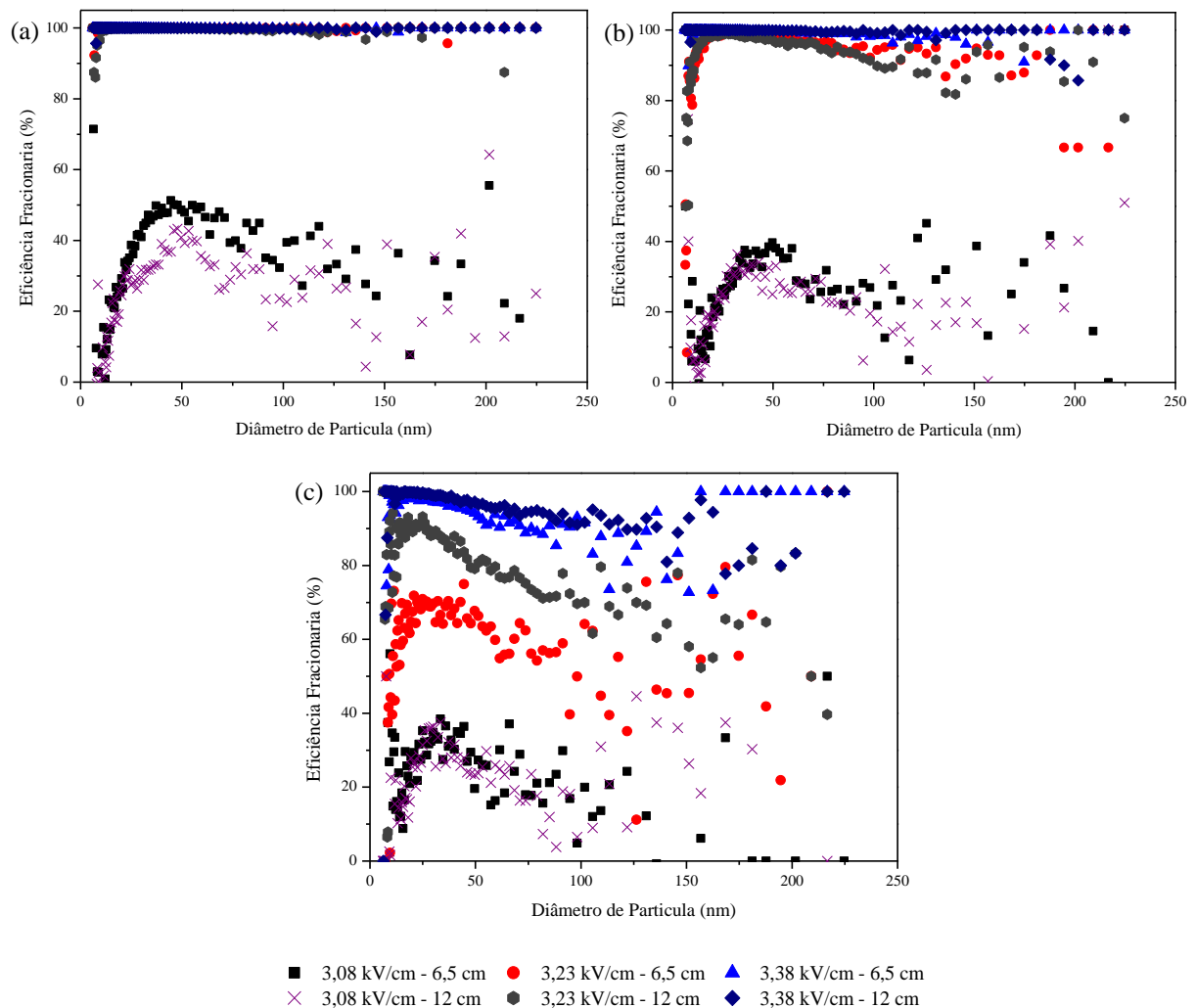
Através dos resultados obtidos, observa-se o aumento da corrente elétrica com o espaçamento entre os fios, para o diâmetro de fio de 0,4 mm, principalmente para voltagens superiores a 15 kV. O mesmo ocorreu para o diâmetro de 0,3 mm, porém, a diferença entre as

curvas de 6,5 e 12 cm foi mais sutil. Para o diâmetro de 0,3 mm, a curva corrente-tensão referente à velocidade de 4,08 cm/s (Figura 42-f), não apresentou diferença nas correntes elétricas para a concentração de 0,1 g/L, indicando que podem ter sido atingidos os máximos valores de corrente para essas condições operacionais. O aumento da corrente elétrica com o espaçamento entre os fios está associado à redução no efeito da blindagem entre os fios (KASDI, 2016).

5.3.2 Eficiência de Coleta de Partículas

As eficiências fracionárias para ambos os espaçamentos de fios estão mostradas nas Figura 43 e 44.

Figura 43: Eficiências fracionárias para os campos elétricos de 3,08, 3,23 e 3,38 kV/cm, para os diâmetros de fio de 0,4 mm para os espaçamentos de 6,5 e 12 cm e: (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s, (c) 4,08 cm/s

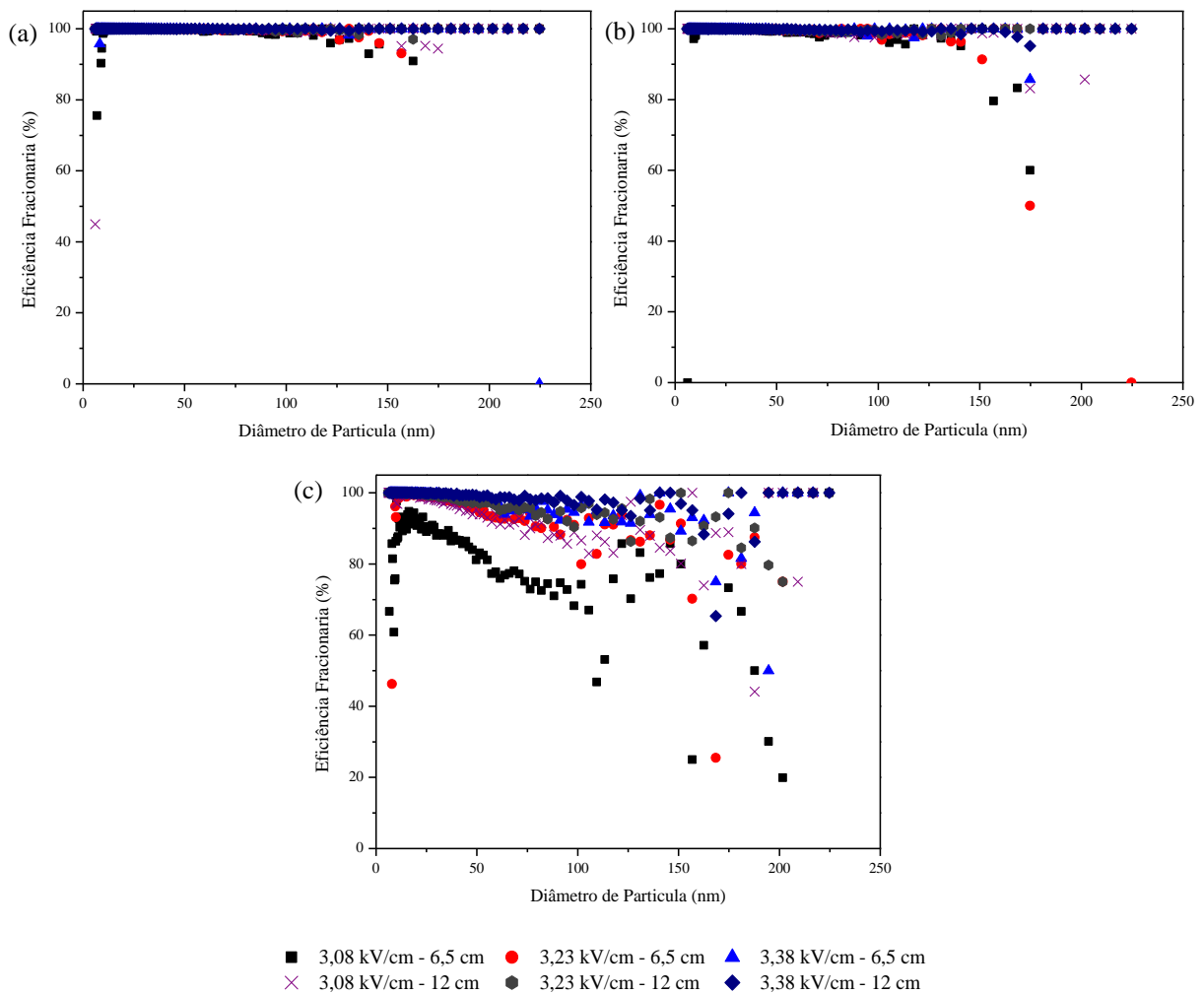


Fonte: Autor, 2020.

Os resultados obtidos com o diâmetro de fio de 0,4 mm (Figura 43) mostram que o aumento da distância entre os fios não alterou significativamente as eficiências obtidas com o campo elétrico de 3,08 kV/cm, em todas as velocidades, mas, para os campos elétricos de 3,23 e 3,38 kV/cm, favoreceu a coleta de partículas. O aumento da eficiência está relacionado às maiores correntes elétricas obtidas com o espaçamento de 12 cm.

Para os experimentos realizados com o diâmetro de fio de 0,3 mm (Figura 44), ambos os espaçamentos utilizados forneceram elevadas eficiências de remoção de partícula.

Figura 44: Eficiências fracionárias para os campos elétricos de 3,08, 3,23 e 3,38 kV/cm, para os diâmetros de fio de 0,3 mm para os espaçamentos de 6,5 e 12 cm e: (a) 1,03 cm/s, (b) 2,04 cm/s, (c) 4,08 cm/s



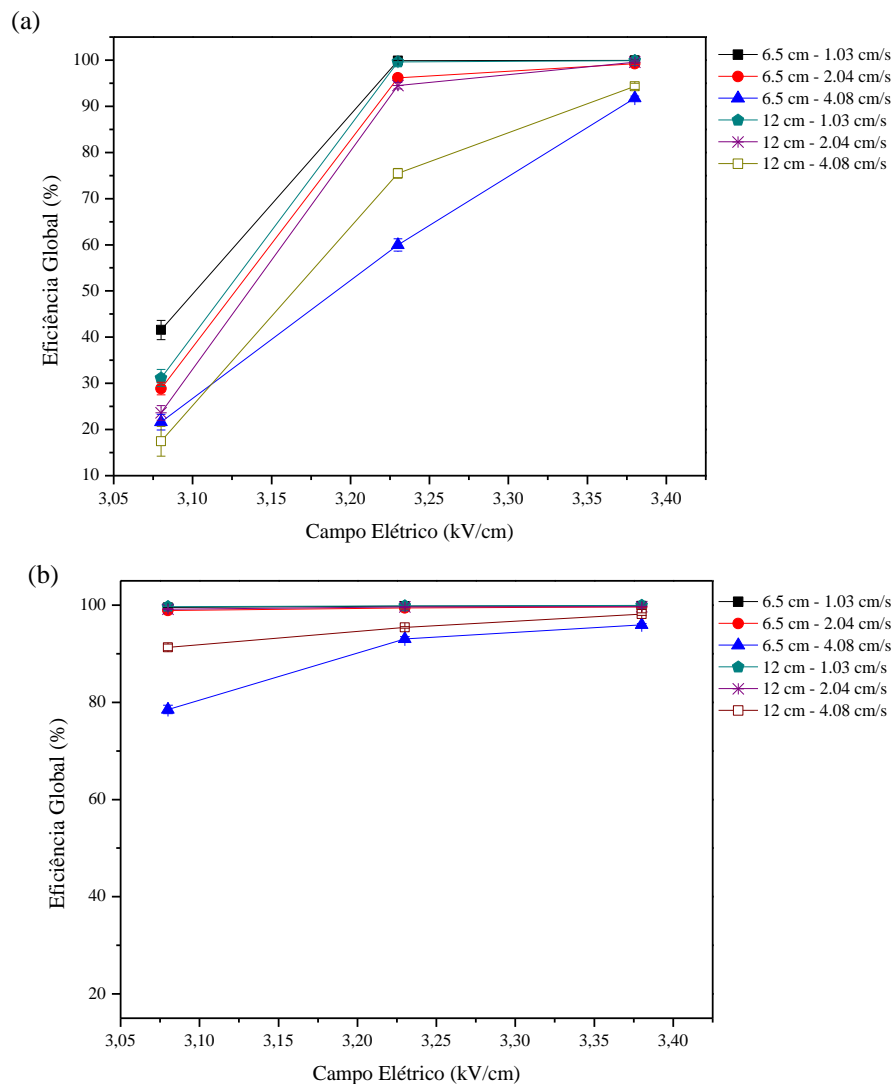
Fonte: Autor, 2020.

Esses dados evidenciam que, para as velocidades de 1,03 cm/s (Figura 44-a) e 2,04 cm/s (Figura 44-b), com esse diâmetro de fio obtém-se um alto desempenho do precipitador eletrostático. Para a velocidade de 4,08 cm/s (Figura 44-c), todas as eficiências decaíram, devido ao menor tempo de residência e apresentaram um comportamento muito semelhante

entre si. Apenas o experimento com o espaçamento de 6,5 cm e campo elétrico de 3,08 kV/cm obteve resultados mais divergentes, em relação às outras curvas.

Os resultados das eficiências globais para os experimentos realizados na etapa 3 encontram-se na Figura 45. Através das curvas, observa-se a proximidade dos resultados obtidos com diferentes espaçamentos, com alguns pontos de maior eficiência para o espaçamento de 12 cm, nos experimentos com o diâmetro de fio de 0,4 mm (Figura 45-a). Para o diâmetro de fio de 0,3 mm (Figura 45-b), as eficiências globais para cada campo elétrico foram praticamente iguais em todos os pontos, com a maior discrepância entre os pontos obtidos com a velocidade de 4,08 cm/s e 3,08 kV/cm.

Figura 45: Eficiências globais para as velocidades de 1,03, 2,04 e 4,08 cm/s para os diâmetros de fio de: (a) 0,4 mm e (b) 0,3 mm



Fonte: Autor, 2020.

5.3.3 Número Eletro-Hidrodinâmico

Por fim, foram calculados os valores da razão entre o número eletro-hidrodinâmico e o número de Reynolds ao quadrado, para cada experimento realizado (Tabela 14). Para os experimentos realizados com o espaçamento de 6,5 cm, esses dados já haviam sido obtidos e o procedimento de cálculo pode ser consultado nas subseções 5.1.4 e 5.2.3. Para os experimentos com 12 cm e diâmetro de fio de 0,4 mm, foi necessário estimar os valores das correntes elétricas seguindo a metodologia exposta na subseção 5.1.4, enquanto para o diâmetro de fio de 0,3 mm, as correntes elétricas foram aferidas diretamente pela fonte de alta tensão.

Da mesma maneira que nas etapas 1 e 2, os maiores campos elétricos apresentaram maior influência das forças elétricas. Em ambos os diâmetros de fios, a predominância dessas forças foi intensificada com o aumento do espaçamento entre os fios, por conta da redução do efeito de blindagem, que resultou em maiores correntes elétricas. Seguindo o mesmo comportamento da etapa 2, o diâmetro de fio de 0,3 mm gerou maiores correntes elétricas e N_{EHD}/Re^2 .

Tabela 14: N_{EHD}/Re^2 para os experimentos realizados com 2 fios, espaçados em 6,5 e 12 cm

Velocidade (cm/s)	Campo Elétrico (kV/cm)	N_{EHD}/Re^2			
		6,5 cm		12 cm	
		0,4 mm		0,3 mm	
1,03	3,08	83,33	9,31	504,89	865,52
	3,23	356,48	432,76	865,52	1298,28
	3,38	731,98	865,52	1298,28	1731,04
2,04	3,08	6,05	56,33	110,10	220,21
	3,23	42,49	135,97	220,21	330,31
	3,38	132,88	240,29	330,31	440,41
4,08	3,08	1,04	9,46	27,53	55,05
	3,23	8,12	27,53	55,05	55,05
	3,38	27,00	27,53	64,23	110,10

Fonte: Autor, 2020.

5.4 Comparação Entre as Etapas

A partir dos resultados expostos nas etapas 1, 2 e 3, pode-se concluir que as maiores eficiências de remoção foram atingidas com a menor velocidade, de 1,03 cm/s, pelo maior tempo de residência das partículas, juntamente com a maior concentração das mesmas no

interior do precipitador eletrostático. Assim, os resultados de eficiência global obtidos com a velocidade de 1,03 cm/s e 3,38 kV/cm, para as 3 etapas, estão reunidos na Tabela 15.

Pelos resultados, os experimentos que apresentaram as maiores eficiências de coleta foram realizados na etapa 1, para a configuração de 4 fios. A maior eficiência foi para a concentração de 0,1 g/L, 99,99%, seguida pela concentração de 0,5 g/L, que alcançou 99,98% de eficiência. Entretanto, ao reduzir o diâmetro do fio para 0,3 mm, etapa 2, a eficiência de coleta atingiu um elevado valor, 99,83%, com apenas 2 fios de descarga. Ao aumentar o espaçamento entre esses fios, etapa 3, a eficiência foi elevada ainda mais para 99,95%, com 0,3 mm, e 99,91%, com 0,4 mm.

Essas informações são vantajosas durante o projeto de um precipitador eletrostático, pois, foi comprovado que pequenas alterações na configuração dos fios de descarga podem elevar significativamente as eficiências de coleta obtidas, o que confere a possibilidade de reduzir o número de eletrodos de descarga e manter elevadas eficiências.

Tabela 15: Eficiências globais dos experimentos realizados com a velocidade de 1,03 cm/s e campo elétrico de 3,38 kV/cm

	Etapa 1		Etapa 2	Etapa 3	
	0,4 mm – 6,5 cm		0,3 mm – 6,5 cm	12 cm	
	0,1 g/L	0,5 g/L	0,1 g/L	0,1 g/L	
				0,3 mm	0,4 mm
1 fio	99,36 ± 0,09	98,45 ± 0,22	98,99 ± 0,23	—	—
2 fios	99,92 ± 0,01	99,78 ± 0,08	99,83 ± 0,14	99,95 ± 0,03	99,91 ± 0,01
3 fios	99,92 ± 0,03	99,93 ± 0,03	—	—	—
4 fios	99,99 ± 0,01	99,98 ± 0,01	—	—	—

Fonte: Autor, 2020.

5.5 Análise Estatística

Para cada etapa de estudo foram escolhidas as condições operacionais e de projeto para a realização da análise estatística, que serão descritas em suas respectivas subseções.

5.5.1 Etapa 1

Nessa etapa foram analisados apenas os experimentos realizados com 0,1 g/L, restando 3 fatores de interesse: o número de fios (indicado pelo número 1), a velocidade do ar (número 2) e o campo elétrico (número 3), com 4, 3 e 7 níveis, respectivamente. Para a realização do

planejamento fatorial é necessário que os fatores possuam o mesmo número de níveis. Desse modo, foram selecionados os níveis de maior relevância, com base nos resultados de eficiência apresentados anteriormente. Devido à limitação imposta pelo número de níveis do fator velocidade do ar, a análise dessa etapa poderia ser realizada com um máximo de 3 níveis para cada fator. Como o principal foco da etapa 1 é a análise do número de fios, foram escolhidos 3 níveis, de modo a avaliar a maior quantidade possível de configurações de número de fios. Logo, como foram utilizados 3 fatores, o planejamento fatorial foi do tipo 3^3 .

Desse modo, foram escolhidas as configurações de 1, 2 e 3 fios, uma vez que os resultados com 3 e 4 fios foram muito semelhantes entre si, especialmente para as velocidades mais baixas. Além disso, foram utilizadas as 3 velocidades de estudo, 1,03, 2,04 e 4,08 cm/s, e os campos elétricos de 3,08, 3,23 e 3,38 kV/cm, por representarem a faixa de operação utilizada nos experimentos.

Tabela 16: Efeito estimado, erro puro, valor de t e grau de significância estatística (p) para os dados da etapa 1

Fator	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (54)	p
Média	68,3865	0,418878	163,2611	0,000000
(1) Número de Fios (L)	10,3661	0,505632	20,5012	0,000000
Número de Fios (Q)	1,0178	0,433935	2,3456	0,022700
(2) Velocidade (L)	-17,1136	1,513117	-11,3102	0,000000
Velocidade (Q)	2,8930	1,335072	2,1669	0,034674
(3) Campo Elétrico (L)	65,9184	0,505632	130,3684	0,000000
Campo Elétrico (Q)	22,4600	0,433935	51,7589	0,000000
Número de Fios (L) e Velocidade (L)	4,9050	0,602335	8,1432	0,000000
Número de Fios (L) e Campo Elétrico (L)	-0,9542	0,613677	-1,5549	0,125816
Velocidade (L) e Campo Elétrico (L)	1,4424	0,602335	2,3946	0,020139

Fonte: Autor, 2020.

A Tabela 16 exhibe os resultados dos efeitos obtidos para cada fator analisado, os dados em negrito são os que foram considerados significativos pela análise, por apresentarem valores

de p menores que 0,05. Todos os fatores apresentaram efeitos significativos, tanto para os termos lineares (L) quanto quadráticos (Q), bem como as interações entre eles, exceto a interação entre o número de fios e o campo elétrico. Analisando os efeitos obtidos para cada fator, tem-se que ao aumentar o número de fios do menor nível (1 fio) para o de maior nível (3 fios), ocorre um aumento de cerca de 10% na eficiência de coleta de partículas. Um comportamento oposto foi observado em relação à velocidade, uma vez que ao aumentar a velocidade de 1,03 para 4,08 cm/s o efeito resultante é a diminuição da eficiência de coleta de partículas em cerca de 17%. Por fim, o campo elétrico foi o fator que apresentou um efeito mais significativo sob a eficiência de coleta de partículas, ocorrendo o aumento de quase 66% ao aumentar o campo elétrico de 3,08 para 3,38 kV/cm.

Em seguida, foi realizada uma análise de variância, ANOVA, (Tabela 17) para avaliar se o modelo obtido é preditivo.

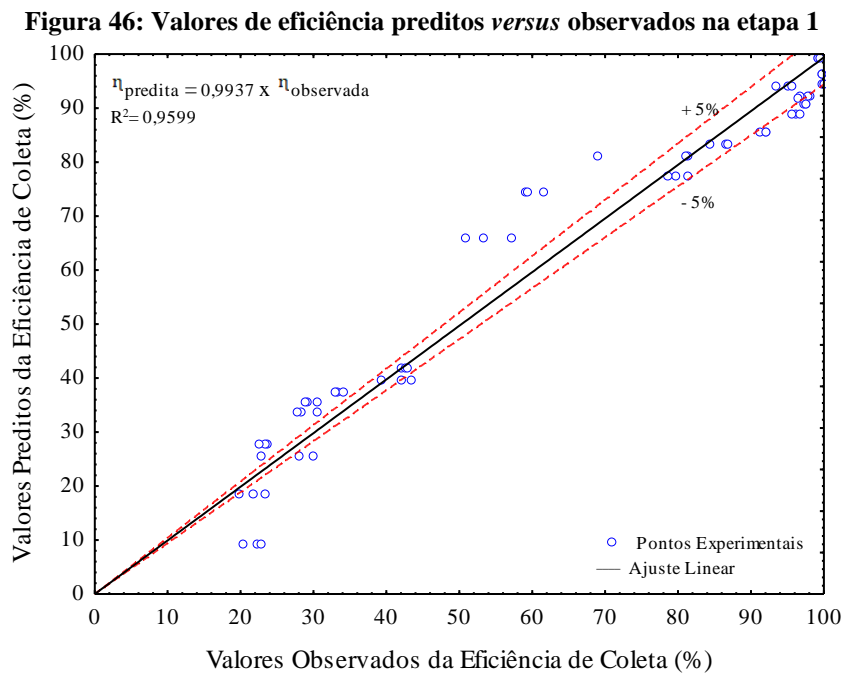
Tabela 17: Análise de variância do modelo ajustado para a eficiência de coleta de partículas na etapa 1

Fator	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
(1) Número de Fios (L)	1424,56	1	1424,56	420,30	0,000000
Número de Fios (Q)	18,65	1	18,65	5,50	0,022700
(2) Velocidade (L)	433,57	1	433,57	127,92	0,000000
Velocidade (Q)	15,91	1	15,91	4,70	0,034674
(3) Campo Elétrico (L)	57605,84	1	57605,84	16995,93	0,000000
Campo Elétrico (Q)	9080,13	1	9080,13	2678,99	0,000000
Número de Fios (L) e Velocidade (L)	224,76	1	224,76	66,31	0,000000
Número de Fios (L) e Campo Elétrico (L)	8,19	1	8,19	2,42	0,125816
Velocidade (L) e Campo Elétrico (L)	19,44	1	19,44	5,73	0,020139
Falta de Ajuste	2833,51	17	166,68	49,18	0,000000
Erro Puro	183,03	54	3,39		
Soma Quadrática Total	77782,00	80			

Fonte: Autor, 2020.

Os resultados obtidos indicam que todos os fatores foram preditos corretamente, o que pode ser comprovado pelo gráfico de valores preditos *versus* valores observados da eficiência de coleta (Figura 46). No gráfico, os valores observados seguem uma tendência linear, como previsto pelo modelo, resultando em um valor de R^2 de 0,9599, o que indica um ajuste satisfatório do modelo aos dados experimentais.

Uma forma de analisar o ajuste do modelo é através da separação da soma quadrática residual, ou seja, a variação atribuída ao erro, nos termos falta de ajuste e erro puro, expostos na Tabela 17. O termo da falta de ajuste indica a fração da soma quadrática residual que pode ser predita através da modificação do modelo, através da inclusão de mais termos ou utilizando um polinômio de ordem superior, por exemplo. No caso do erro puro, é a fração da soma quadrática residual que não pode ser predita por nenhum termo adicional (STATISTICA HELP, 2017). Os resultados expostos na Tabela 17 indicam que o termo da falta de ajuste apresentou um valor superior ao do erro puro, de modo que o modelo ajustado aos dados pode ser melhorado, o que já havia sido comprovado pelo valor do R^2 .

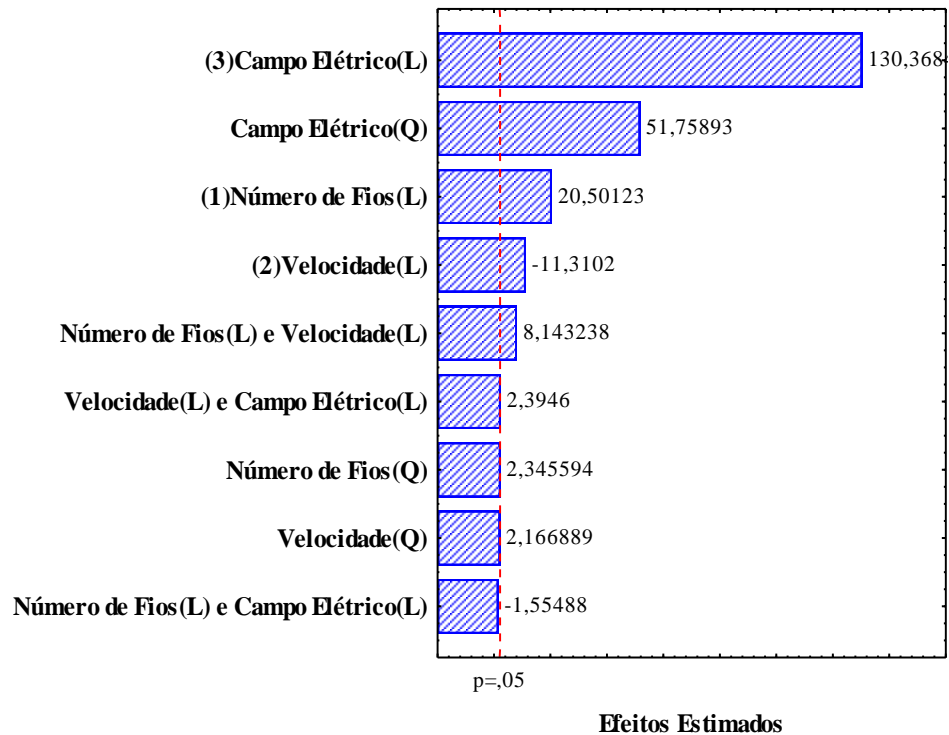


Fonte: Autor, 2020.

Para determinar a influência de cada fator sob a eficiência de coleta foi construído um diagrama de Pareto (Figura 47), que mostra que o efeito linear do campo elétrico é o mais significativo, seguido pelo seu efeito quadrático. O termo linear do número de fios também apresenta certa influência nos resultados. Além disso, pode ser observado que a velocidade do ar é significativa para os resultados, porém, sua influência é negativa, ou seja, ao aumentar a

velocidade do ar, a eficiência de coleta de partículas diminui. Entretanto, o efeito combinado do número de fios com a velocidade apresenta uma influência positiva na eficiência de coleta, uma vez que ao utilizar um maior número de fios, a eficiência de coleta se mantém eficiente até mesmo com a velocidade de 2,04 cm/s.

Figura 47: Diagrama de Pareto referente aos resultados da etapa 1



Fonte: Autor, 2020.

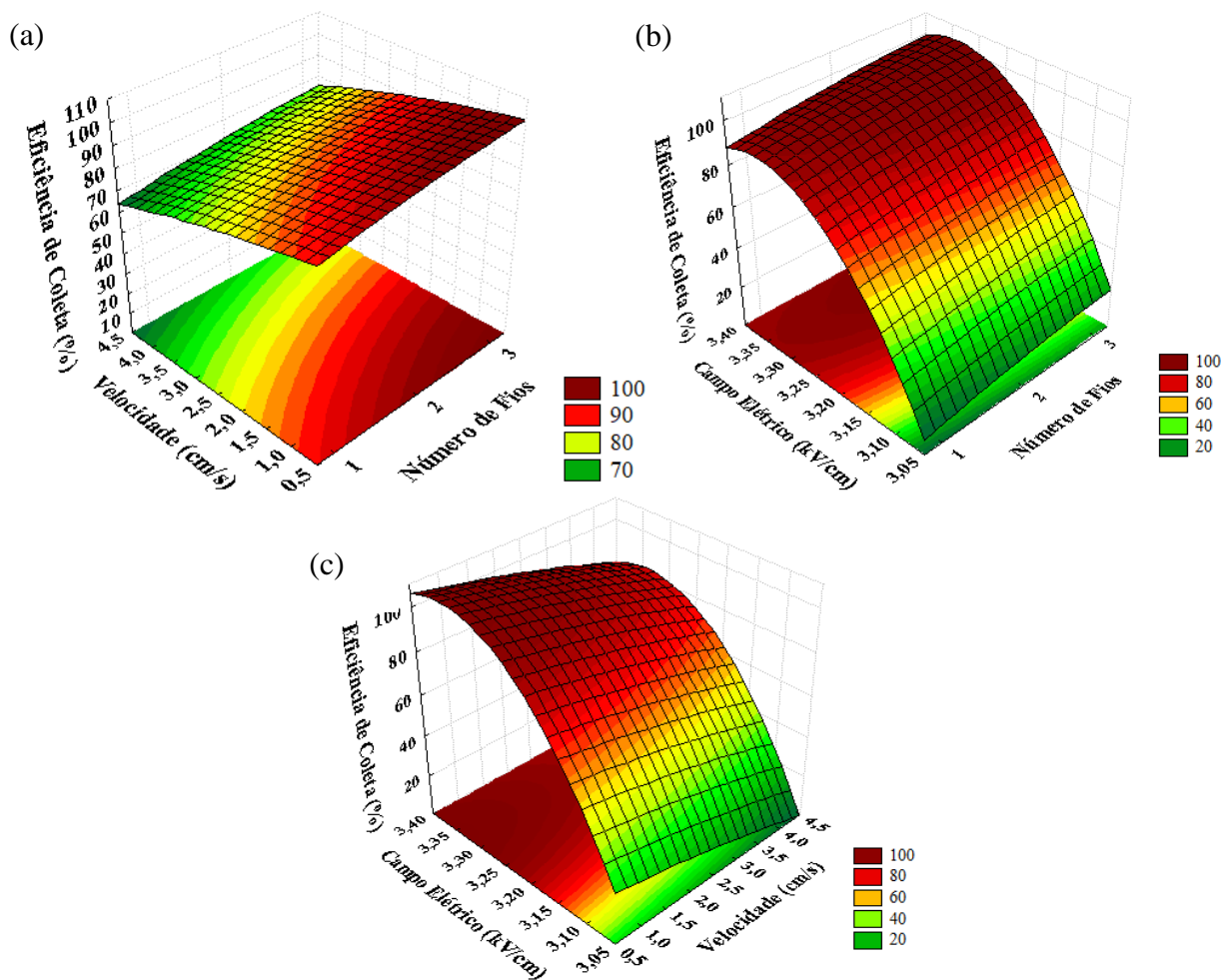
Após a obtenção desses dados, foram plotadas as superfícies de resposta em função das variáveis estudadas. Analisando primeiramente a Figura 48-a, observa-se o comportamento da eficiência de coleta de partículas em função da velocidade do ar e do número de fios. As velocidades mais baixas forneceram as maiores eficiências de coleta, devido aos maiores tempos de residência, discutidos anteriormente. Além disso, o aumento do número de fios melhorou a eficiência de coleta de partículas, em todas as velocidades analisadas.

Seguindo para a análise da eficiência de coleta sob a influência do campo elétrico e do número de fios (Figura 48-b), comprova-se o efeito significativo do campo elétrico, identificado no diagrama de Pareto. Para os campos elétricos acima de 3,20 kV/cm, a eficiência de coleta de partículas foi superior a 80%, em todas as configurações do número de fios. Além disso, pode ser observado que a configuração de 1 fio atingiu as menores eficiências de coleta.

Por fim, foi plotada a superfície de resposta em função do campo elétrico e da velocidade (Figura 48-c), que mostra de forma mais clara o aumento da eficiência de coleta com menores velocidades e maiores campos elétricos.

Nas Figuras 48-b e 48-c nota-se um comportamento parabólico crescente para o campo elétrico, justificando o efeito significativo do termo quadrático desse fator no diagrama de Pareto.

Figura 48: Superfícies de resposta referentes aos resultados de eficiência de coleta da etapa 1 em função de: (a) velocidade e número de fios, (b) campo elétrico e número de fios e (c) campo elétrico e velocidade



Fonte: Autor, 2020.

5.5.2 Etapa 2

Na segunda etapa de estudo foram realizados experimentos com um novo diâmetro de fio e os resultados foram comparados com os obtidos na etapa 1, apenas para as configurações de 1 e 2 fios. Desse modo, nessa etapa foram avaliados 4 fatores: o número de fios, o diâmetro dos fios, a velocidade do ar e o campo elétrico, com 2, 2, 3 e 3 níveis, respectivamente. Logo,

o planejamento fatorial só poderia ser o da forma 2^k , como são 4 fatores, foi realizado o planejamento de 2^4 .

Assim, foram avaliadas as configurações de 1 e 2 fios, para os diâmetros de fio de 0,3 e 0,4 mm. As velocidades do ar selecionadas para a análise foram as de 1,03 e 4,08 cm/s e os campos elétricos selecionados foram os de 3,08 e 3,38 kV/cm, por apresentarem uma maior divergência entre os resultados obtidos com diferentes diâmetros e números de fios.

Os resultados expostos na Tabela 18 mostram que novamente todos os fatores avaliados foram significativos para a eficiência de coleta de partículas, assim como o efeito combinado de alguns fatores, por apresentarem os valores de p menores que 0,05.

Tabela 18: Efeito estimado, erro puro, valor de t e grau de significância estatística (p) para os dados da etapa 2

Fator	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (32)	p
Média	76,0971	0,140766	540,594	0,000000
(1) Diâmetro de Fio	-30,8417	0,281531	-109,550	0,000000
(2) Número de Fios	4,9817	0,281531	17,695	0,000000
(3) Velocidade	-14,1933	0,281531	-50,415	0,000000
(4) Campo Elétrico	36,0892	0,281531	128,189	0,000000
Diâmetro de Fio e Número de Fios	1,0958	0,281531	3,892	0,000473
Diâmetro de Fio e Velocidade	0,3758	0,281531	1,335	0,191309
Diâmetro de Fio e Campo Elétrico	28,0283	0,281531	99,557	0,000000
Número de Fios e Velocidade	0,9492	0,281531	3,371	0,001968
Número de Fios e Campo Elétrico	0,4817	0,281531	1,711	0,096782
Velocidade e Campo Elétrico	3,4233	0,281531	12,160	0,000000
1*2*3	-1,1717	0,281531	-4,162	0,000222
1*2*4	-0,3158	0,281531	-1,122	0,270278
1*3*4	-3,4225	0,281531	-12,157	0,000000
2*3*4	3,8142	0,281531	13,548	0,000000

Fonte: Autor, 2020.

O diâmetro de fio e a velocidade do ar apresentam um efeito negativo. Logo, ao aumentar o diâmetro de fio de 0,3 para 0,4 mm ocorreu a redução da eficiência em cerca de

30%, enquanto ao aumentar a velocidade de 1,03 para 4,08 cm/s ocorreu a redução da eficiência em aproximadamente 14%. Por outro lado, o número de fios e o campo elétrico apresentaram um efeito positivo nos resultados de eficiência, visto que ao aumentar o número de fios de 1 para 2 ocorreu o aumento de cerca de 5% na eficiência e ao aumentar o campo elétrico de 3,08 para 3,38 kV/cm esse aumento foi de 36%. A interação entre alguns efeitos também foi considerada significativa, porém, a de maior influência foi a interação entre o diâmetro do fio e o campo elétrico.

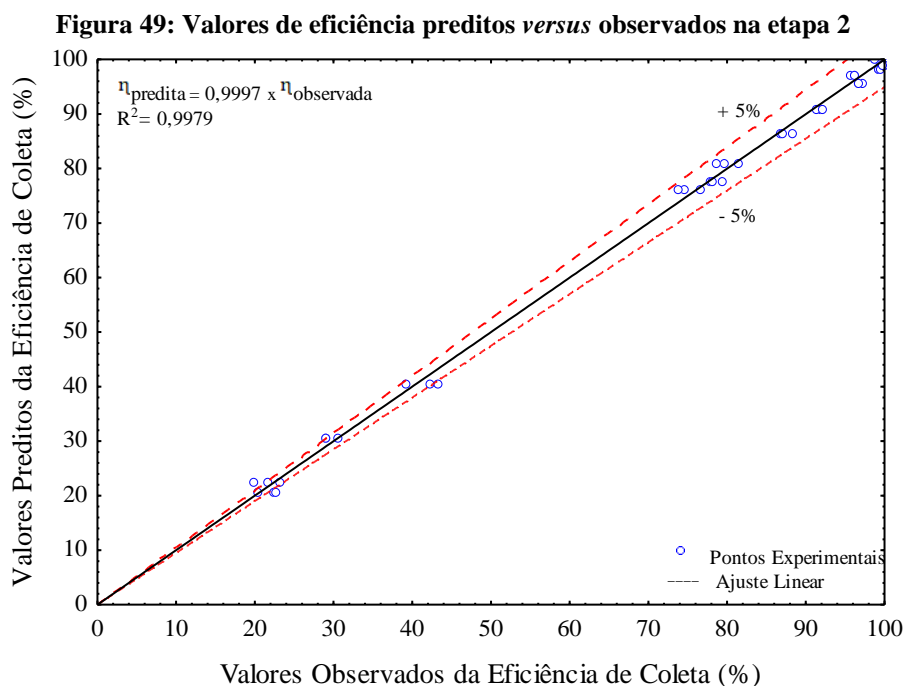
A predição dos resultados foi comprovada através da ANOVA (Tabela 19), que confirma a influência de todos os fatores.

Tabela 19: Análise de variância do modelo ajustado para a eficiência de coleta de partículas na etapa 2

Fator	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
(1) Diâmetro de Fio	11414,50	1	11414,50	12001,13	0,000000
(2) Número de Fios	297,80	1	297,80	313,11	0,000000
(3) Velocidade	2417,41	1	2417,41	2541,65	0,000000
(4) Campo Elétrico	15629,14	1	15629,14	16432,37	0,000000
Diâmetro de Fio e Número de Fios	14,41	1	14,41	15,15	0,000473
Diâmetro de Fio e Velocidade	1,70	1	1,70	1,78	0,191309
Diâmetro de Fio e Campo Elétrico	9427,05	1	9427,05	9911,54	0,000000
Número de Fios e Velocidade	10,81	1	10,81	11,37	0,001968
Número de Fios e Campo Elétrico	2,78	1	2,78	2,93	0,096782
Velocidade e Campo Elétrico	140,63	1	140,63	147,86	0,000000
1*2*3	16,47	1	16,47	17,32	0,000222
1*2*4	1,20	1	1,20	1,26	0,270278
1*3*4	140,56	1	140,56	147,79	0,000000
2*3*4	174,57	1	174,57	183,55	0,000000
Falta de Ajuste	52,50	1	52,50	55,20	0,000000
Erro Puro	30,44	32	0,95		
Soma Quadrática Total	39771,97	47			

Fonte: Autor, 2020.

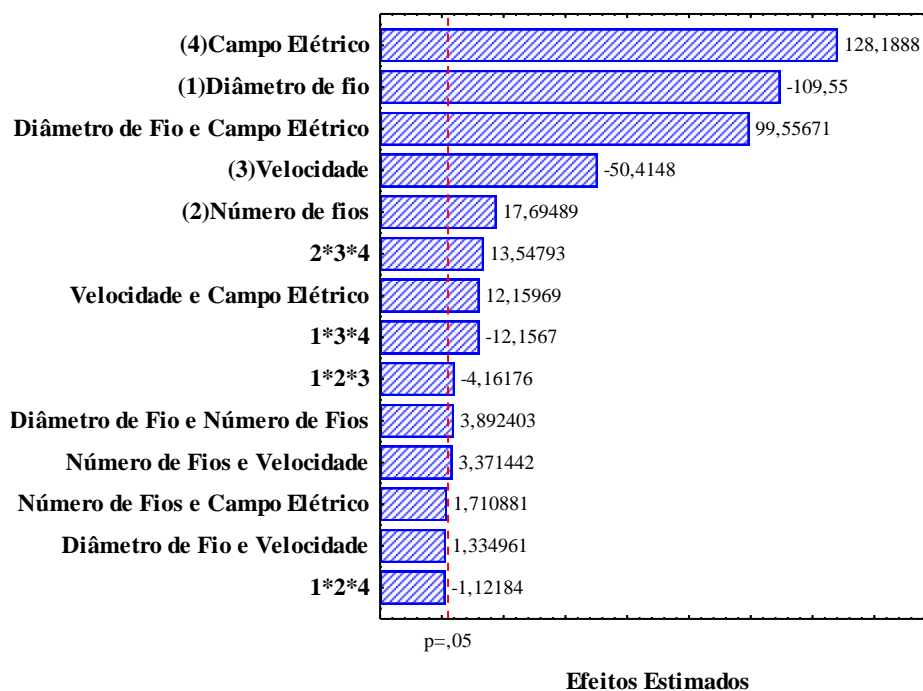
Além disso, o gráfico dos valores de eficiência preditos *versus* os valores observados (Figura 49) apresentou um excelente ajuste do modelo aos dados experimentais, com o valor de R^2 de 0,9979. A falta de ajuste foi muito menor do que a obtida na ANOVA da etapa 1, indicando que o modelo da etapa 2 se ajustou melhor aos dados experimentais.



Fonte: Autor, 2020.

Para compreender melhor quais efeitos foram mais significativos nos resultados de eficiência de coleta, foi construído o diagrama de Pareto (Figura 50). Assim como na etapa 1, o campo elétrico foi o fator de maior influência, apresentando um efeito positivo, ou seja, ocorreu o aumento da eficiência ao aumentar o campo elétrico aplicado. O segundo fator mais significativo foi o diâmetro de fio, com um efeito negativo, uma vez que o diâmetro de 0,4 mm atingiu uma eficiência inferior quando comparado com o diâmetro de 0,3 mm. Do mesmo modo, a velocidade apresentou um efeito negativo, bem como na etapa 1. É importante ressaltar que a interação entre o diâmetro de fio e o campo elétrico apresentou efeito positivo, pois, mesmo aumentando o diâmetro de fio para 0,4 mm, ao utilizar o campo elétrico de 3,38 kV/cm ocorreu o aumento da eficiência de coleta. Além disso, foi observado novamente o efeito positivo do número de fios.

Figura 50: Diagrama de Pareto referente aos resultados da etapa 2



Fonte: Autor, 2020.

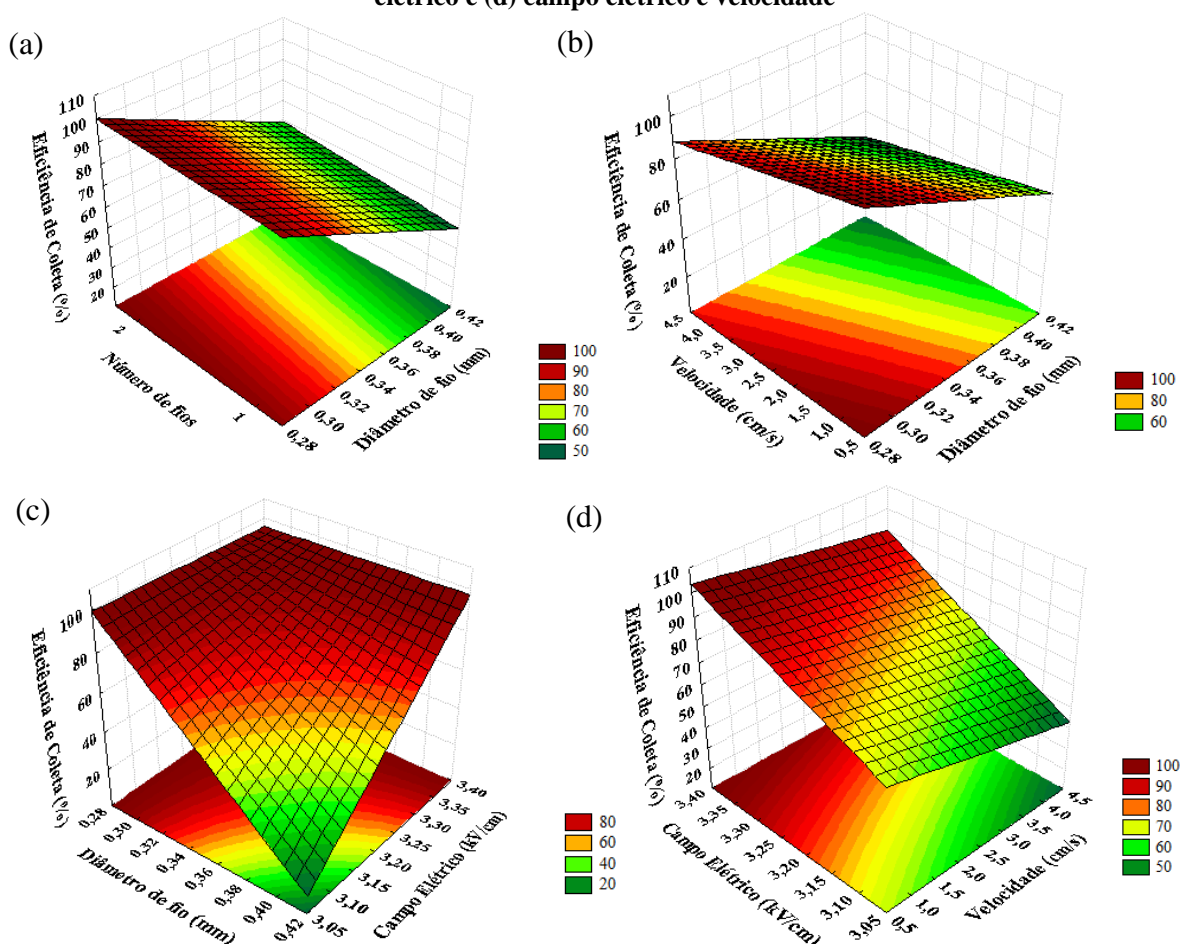
Por fim, foram plotadas as superfícies de resposta da eficiência de coleta em função dos fatores avaliados. A Figura 51-a apresenta uma relação aproximadamente linear entre a eficiência de coleta de partículas e o número de fios, onde pode ser observado que os resultados obtidos com 1 fio foram inferiores ao de 2 fios. Essa relação linear também ocorre entre a eficiência de coleta e o diâmetro de fio utilizado, entretanto, de uma forma inversamente proporcional. Ou seja, quanto maior o diâmetro de fio, menor a porcentagem de partículas coletadas.

Um comportamento muito semelhante ocorre na relação entre a eficiência de coleta com a velocidade e o diâmetro de fio (Figura 51-b). A eficiência de coleta e a velocidade possuem uma relação linear, inversamente proporcional, atingindo as maiores eficiências com menores velocidades.

A Figura 51-c mostra a relação entre a eficiência de coleta com o diâmetro de fio e o campo elétrico. Como observado anteriormente, a relação entre a eficiência e o diâmetro de fio é linear e inversamente proporcional. Por outro lado, a reação entre a eficiência e o campo elétrico é diretamente proporcional, seguindo um perfil linear. Através da superfície de resposta observa-se que as maiores eficiências foram atingidas quando utilizados menores diâmetros de

firos e campos elétricos de maior intensidade. Por fim, a Figura 51-d exibe a relação entre a eficiência de coleta com o campo elétrico e a velocidade, discutidos nessa seção.

Figura 51: Superfícies de resposta referentes aos resultados de eficiência de coleta da etapa 2 em função de: (a) número de firos e diâmetro de fio, (b) velocidade e diâmetro de fio e (c) diâmetro de fio e campo elétrico e (d) campo elétrico e velocidade



Fonte: Autor, 2020.

5.5.3 Etapa 3

Na terceira etapa do estudo foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos na primeira etapa e os obtidos com o novo espaçamento entre os firos de 12 cm, apenas para a configuração de 2 firos. Desse modo, foram avaliados 4 fatores: o espaçamento entre os firos, o diâmetro dos firos, a velocidade do ar e o campo elétrico, com 2, 2, 3 e 3 níveis, respectivamente. Esse comportamento foi o mesmo obtido na avaliação dos dados da etapa 2. Dessa forma, foram avaliados os experimentos realizados com o espaçamento entre os firos de 6,5 e 12 cm, para os diâmetros de firos de 0,3 e 0,4 mm. As velocidades do ar e campos elétricos selecionados foram os mesmos da etapa 2, 1,03 cm/s e 4,08 cm/s e 3,08 e 3,38 kV/cm.

Analisando os resultados obtidos para a etapa 3 (Tabela 20), observa-se que o único fator que não foi significativo para os resultados de eficiência foi o espaçamento entre os fios, com valor de p maior que 0,05. Apenas quando combinado com outros fatores apresentou efeitos significativos, mas pouco expressivos quando comparados aos efeitos dos demais fatores. O diâmetro de fio e a velocidade do ar apresentaram efeito negativo, uma vez que ao utilizar um fio de maior diâmetro ocorre a redução da eficiência de coleta, o mesmo comportamento ocorre com o aumento da velocidade. O diâmetro de fio e a velocidade reduziram a eficiência de coleta em 33 e 10 %, respectivamente, valores muito semelhantes aos obtidos na etapa 2.

Tabela 20: Efeito estimado, erro puro, valor de t e grau de significância estatística (p) para os dados da etapa 3

Fator	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (32)	p
Média	78,7890	0,172964	455,5234	0,000000
(1) Espaçamento entre os Fios	0,4021	0,345927	1,1623	0,253695
(2) Diâmetro de Fio	-33,1563	0,345927	-95,8475	0,000000
(3) Velocidade	-10,3079	0,345927	-29,7979	0,000000
(4) Campo Elétrico	37,3779	0,345927	108,0514	0,000000
Espaçamento entre os Fios e Diâmetro de Fio	-3,4104	0,345927	-9,8588	0,000000
Espaçamento entre os Fios e Velocidade	2,9362	0,345927	8,4881	0,000000
Espaçamento entre os Fios e Campo Elétrico	0,8071	0,345927	2,3331	0,026089
Diâmetro de Fio e Velocidade	-1,5304	0,345927	-4,4241	0,000105
Diâmetro de Fio e Campo Elétrico	31,1687	0,345927	90,1021	0,000000
Velocidade e Campo Elétrico	5,4571	0,345927	15,7752	0,000000
1*2*3	-0,7346	0,345927	-2,1235	0,041537
1*2*4	3,4562	0,345927	9,9913	0,000000
1*3*4	-1,7804	0,345927	-5,1468	0,000013
2*3*4	-0,4804	0,345927	-1,3888	0,174491

Fonte: Autor, 2020.

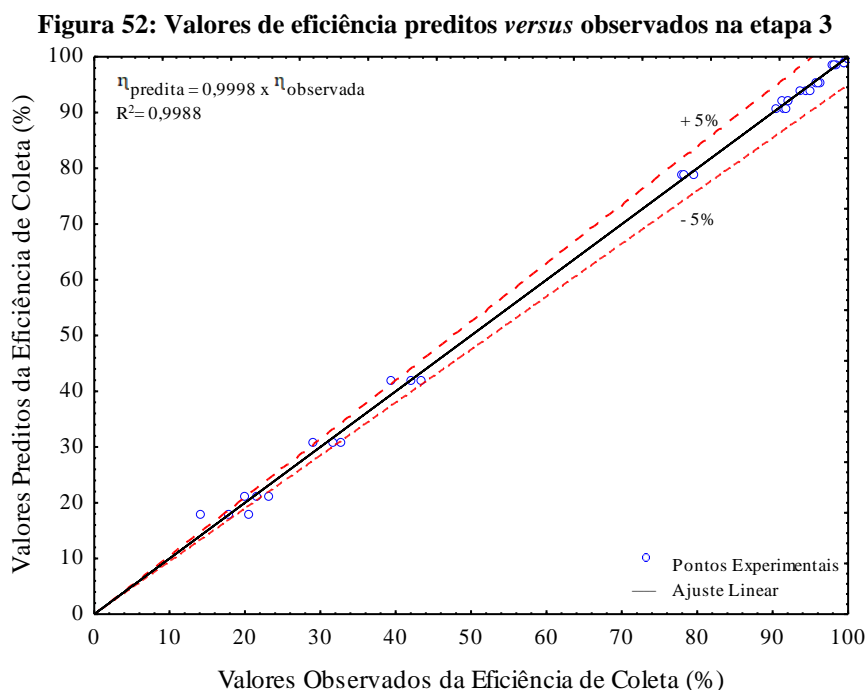
A predição do modelo foi comprovada através da ANOVA (Tabela 21) e o valor da falta de ajuste foi muito pequeno, apenas 8,68. Nesse caso, o erro puro foi maior que a falta de ajuste, o que não ocorreu nas análises das etapas 1 e 2. Do mesmo modo, os resultados indicaram que o espaçamento entre os fios não foi estatisticamente significativo. O modelo se ajustou bem aos dados, atingindo um valor de R^2 de 0,9988, comprovando o baixo valor da falta de ajuste.

Tabela 21: Análise de variância do modelo ajustado para a eficiência de coleta de partículas na etapa 3

Fator	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
(1) Espaçamento entre os Fios	1,94	1	1,94	1,35	0,253695
(2) Diâmetro de Fio	13192,04	1	13192,04	9186,74	0,000000
(3) Velocidade	1275,04	1	1275,04	887,92	0,000000
(4) Campo Elétrico	16765,30	1	16765,30	11675,10	0,000000
Espaçamento entre os Fios e Diâmetro de Fio	139,57	1	139,57	97,20	0,000000
Espaçamento entre os Fios e Velocidade	103,46	1	103,46	72,05	0,000000
Espaçamento entre os Fios e Campo Elétrico	7,82	1	7,82	5,44	0,026089
Diâmetro de Fio e Velocidade	28,11	1	28,11	19,57	0,000105
Diâmetro de Fio e Campo Elétrico	11657,89	1	11657,89	8118,38	0,000000
Velocidade e Campo Elétrico	357,36	1	357,36	248,86	0,000000
1*2*3	6,48	1	6,48	4,51	0,041537
1*2*4	143,35	1	143,35	99,83	0,000000
1*3*4	38,04	1	38,04	26,49	0,000013
2*3*4	2,77	1	2,77	1,93	0,174491
Falta de Ajuste	8,68	1	8,68	6,04	0,019554
Erro Puro	45,95	32	1,44		
Soma Quadrática Total	43773,79	47			

Fonte: Autor, 2020.

O ajuste dos dados pode ser observado na Figura 52, que exhibe os valores preditos da eficiência de coleta *versus* os resultados obtidos experimentalmente, que apresentaram um comportamento linear, como previsto pelo modelo.



Fonte: Autor, 2020.

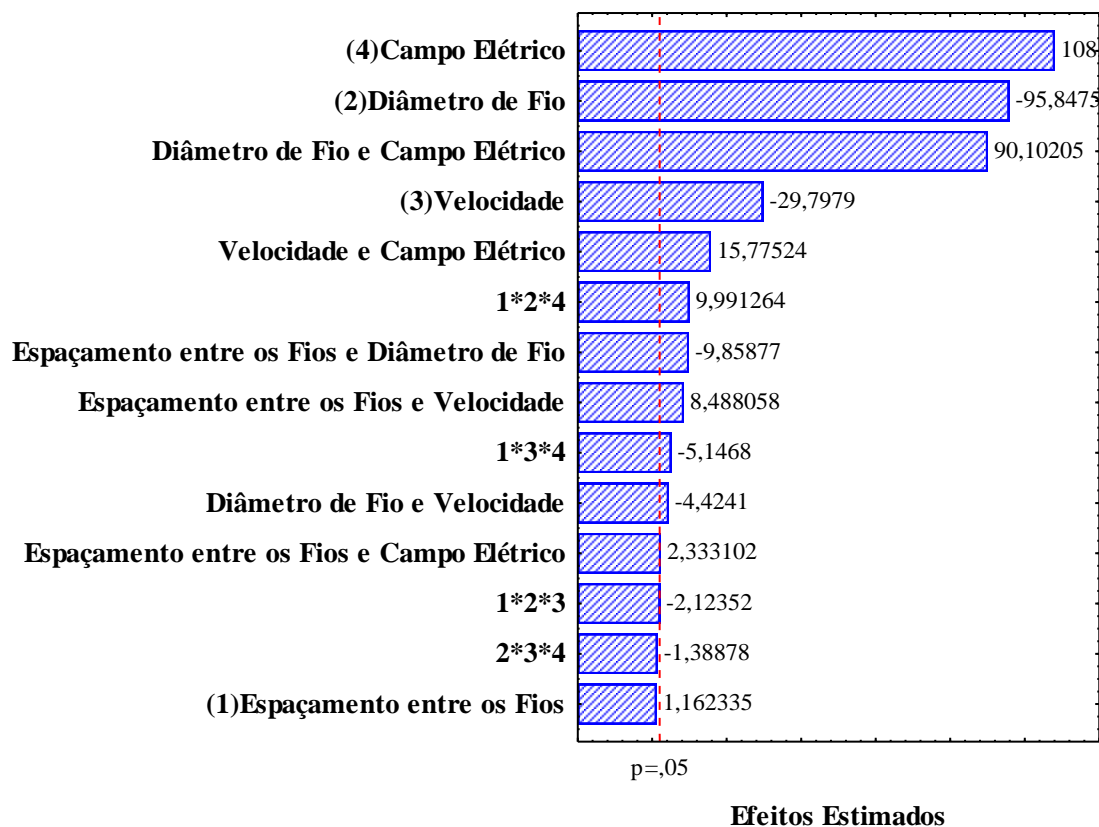
Pelo diagrama de Pareto (Figura 53), observa-se que, assim como na etapa 2, os fatores de maior significância foram o campo elétrico, o diâmetro de fio, além do efeito conjunto desses dois fatores. A velocidade e o efeito conjunto da velocidade com o campo elétrico seguiram os mesmos comportamentos descritos anteriormente.

Dois efeitos conjuntos englobando o espaçamento entre os fios foram significativos. Primeiramente, o efeito negativo do espaçamento entre os fios e o diâmetro de fios. Isso ocorreu por conta da redução da eficiência de coleta ao aumentar o espaçamento entre os fios e o diâmetro de fio, mesmo que o aumento do espaçamento entre os fios reduza o efeito da blindagem, o diâmetro de fio apresenta uma maior influência nos resultados. Isso pode ser comprovado pelo fato de que diâmetro de fio foi o segundo fator mais significativo nos resultados.

Por outro lado, ao analisar conjuntamente o espaçamento entre os fios e a velocidade, pode ser constatado um efeito positivo sob a eficiência de coleta. Esse comportamento ocorre devido ao aumento do espaçamento entre os fios, que reduz o efeito da blindagem entre os fios,

de modo que ocorre o aumento da corrente elétrica, que compensa o efeito negativo do aumento da velocidade.

Figura 53: Diagrama de Pareto referente aos resultados da etapa 3



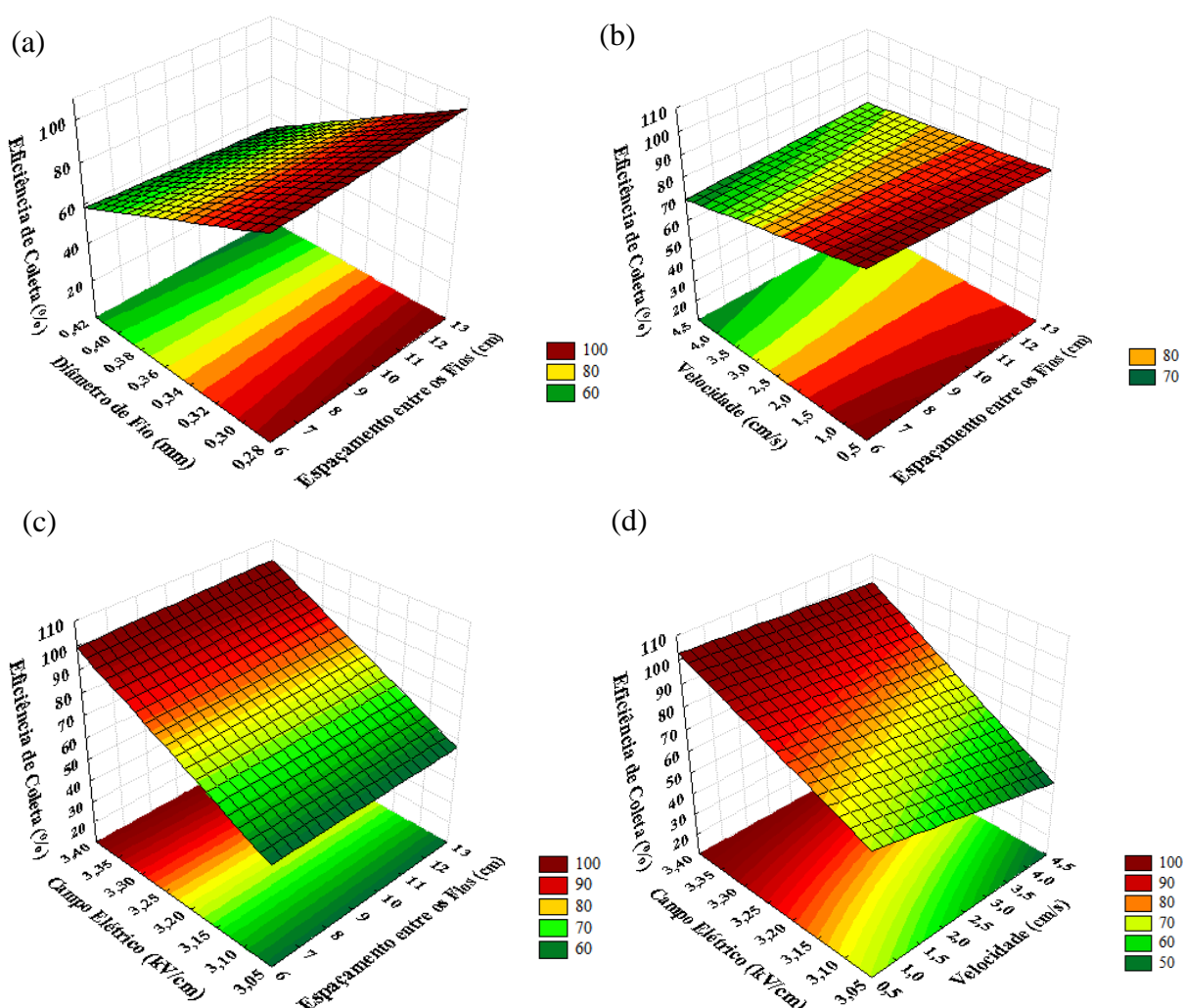
Fonte: Autor, 2020.

As superfícies de resposta da eficiência de coleta em função dos diferentes fatores encontram-se na Figura 54. A Figura 54-a mostra a relação inversamente proporcional entre a eficiência de coleta e o diâmetro de fio. Entretanto, ao observar o comportamento da eficiência de coleta em função do espaçamento entre os fios conclui-se que existe uma relação linear e diretamente proporcional entre eles, ainda que pouco significativa. A Figura 54-b exibe a relação entre a eficiência e a velocidade, já discutida, e mostra que o aumento do espaçamento entre os fios aumenta muito pouco a eficiência de coleta, e esse aumento ocorre para velocidades superiores a 2 cm/s.

A Figura 54-c apresenta a relação diretamente proporcional entre o campo elétrico e a eficiência de coleta de partículas. Além disso, através da figura observa-se que os resultados da eficiência de coleta mantêm-se aproximadamente constantes ao aumentar o espaçamento entre os fios, sofrendo alterações apenas quando analisados em conjunto com o campo elétrico. A

Figura 54-d expõe o aumento da eficiência com o aumento do campo elétrico e a redução com o aumento da velocidade do ar.

Figura 54: Superfícies de resposta referentes aos resultados de eficiência de coleta da etapa 3 em função de: (a) diâmetro de fio e espaçamento entre os fios, (b) velocidade e espaçamento entre os fios (c) campo elétrico e espaçamento entre os fios e (d) campo elétrico e velocidade



Fonte: Autor, 2020.

Analisando os resultados da eficiência de coleta de partículas expostos na subseção 5.3.2 e os resultados da análise estatística, conclui-se que o espaçamento entre os fios pode não ter se apresentado como um fator significativo por conta dos campos elétricos analisados. As eficiências obtidas para os campos elétricos de 3,08 e 3,38 kV/cm com os espaçamentos de 6,5 e 12 cm foram muito semelhantes entre si, e a maior discrepância entre os dados ocorreu para o campo elétrico de 3,23 kV/cm, como mostrado na subseção 5.3.2. Desse modo, como forma de determinar se o espaçamento entre os fios foi significativo para alguma condição

operacional, foi realizada novamente a análise estatística para os dados da etapa 3, porém, os níveis escolhidos para o fator campo elétrico foram de 3,08 e 3,23 kV/cm.

A Tabela 22 exibe os efeitos resultantes de cada fator. O espaçamento entre os fios passou a ser considerado um fator significativo, porém, ao aumentar o espaçamento de 6,5 para 12 cm ocorreu o aumento de apenas 2% na eficiência de coleta, efeito muito inferior aos obtidos com os demais fatores.

Tabela 22: Efeito estimado, erro puro, valor de t e grau de significância estatística (p) para os dados da etapa 3, com os níveis de 3,08 e 3,23 kV/cm

Fator	Efeito	Erro	t (32)	p
	Estimado	Padrão		
Média	75,2390	0,181661	414,172	0,000000
(1) Espaçamento entre os Fios	2,0096	0,363322	5,531	0,000004
(2) Diâmetro de Fio	-38,8046	0,363322	-106,805	0,000000
(3) Velocidade	-17,2763	0,363322	-47,551	0,000000
(4) Campo Elétrico	30,2779	0,363322	83,336	0,000000
Espaçamento entre os Fios e Diâmetro de Fio	-1,8263	0,363322	-5,027	0,000018
Espaçamento entre os Fios e Velocidade	4,6188	0,363322	12,713	0,000000
Espaçamento entre os Fios e Campo Elétrico	2,4146	0,363322	6,646	0,000000
Diâmetro de Fio e Velocidade	-7,1354	0,363322	-19,639	0,000000
Diâmetro de Fio e Campo Elétrico	25,5204	0,363322	70,242	0,000000
Velocidade e Campo Elétrico	-1,5112	0,363322	-4,160	0,000223
1*2*3	0,8962	0,363322	2,467	0,019172
1*2*4	5,0404	0,363322	13,873	0,000000
1*3*4	-0,0979	0,363322	-0,270	0,789272
2*3*4	-6,0854	0,363322	-16,749	0,000000

Fonte: Autor, 2020.

O modelo foi considerado preditivo pela ANOVA (Tabela 23) mas apresentou uma falta de ajuste superior à obtida na primeira parte da etapa 3. Além disso, apresentou um ajuste com

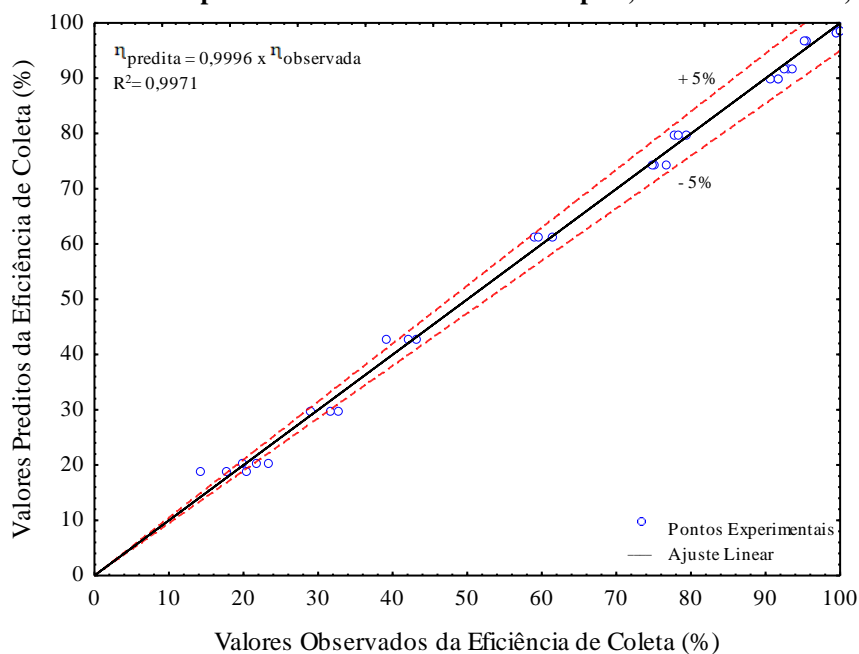
R^2 de 0,9971, que pode ser observado pela Figura 55, que mostra a comparação dos valores preditos e observados da eficiência de coleta.

Tabela 23: Análise de variância do modelo ajustado para a eficiência de coleta de partículas na etapa 3, com os níveis de 3,08 e 3,23 kV/cm

Fator	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
(1) Espaçamento entre os Fios	48,46	1	48,46	30,59	0,000004
(2) Diâmetro de Fio	18069,55	1	18069,55	11407,30	0,000000
(3) Velocidade	3581,63	1	3581,63	2261,08	0,000000
(4) Campo Elétrico	11001,03	1	11001,03	6944,95	0,000000
Espaçamento entre os Fios e Diâmetro de Fio	40,02	1	40,02	25,27	0,000018
Espaçamento entre os Fios e Velocidade	255,99	1	255,99	161,61	0,000000
Espaçamento entre os Fios e Campo Elétrico	69,96	1	69,96	44,17	0,000000
Diâmetro de Fio e Velocidade	610,97	1	610,97	385,71	0,000000
Diâmetro de Fio e Campo Elétrico	7815,50	1	7815,50	4933,92	0,000000
Velocidade e Campo Elétrico	27,41	1	27,41	17,30	0,000223
1*2*3	9,64	1	9,64	6,09	0,019172
1*2*4	304,87	1	304,87	192,46	0,000000
1*3*4	0,12	1	0,12	0,07	0,789272
2*3*4	444,39	1	444,39	280,54	0,000000
Falta de Ajuste	73,88	1	73,88	46,64	0,000000
Erro Puro	50,69	32	1,58		
Soma Quadrática Total	42404,10	47			

Fonte: Autor, 2020.

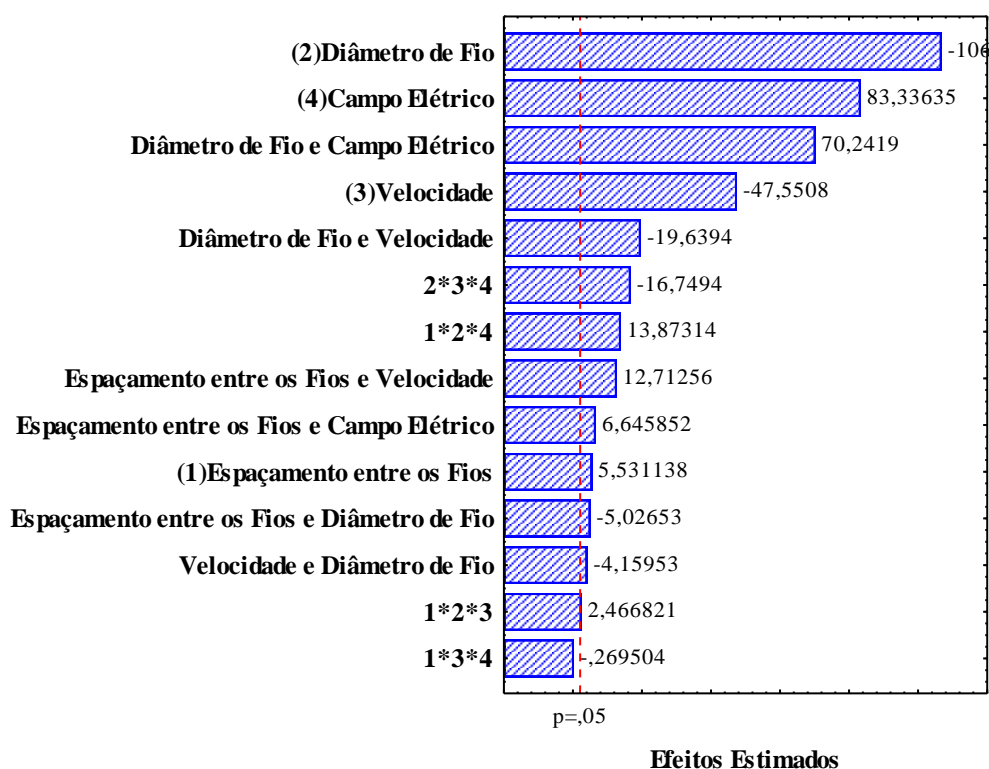
Figura 55: Valores de eficiência preditos *versus* observados na etapa 3, com os níveis de 3,08 e 3,23 kV/cm



Fonte: Autor, 2020.

Através do diagrama de Pareto, observa-se que os fatores mais significativos foram os mesmos obtidos na análise estatística realizada previamente, com os níveis de campo elétrico de 3,08 e 3,38 kV/cm.

Figura 56: Diagrama de Pareto referente aos resultados da etapa 3, com os níveis de 3,08 e 3,23 kV/cm

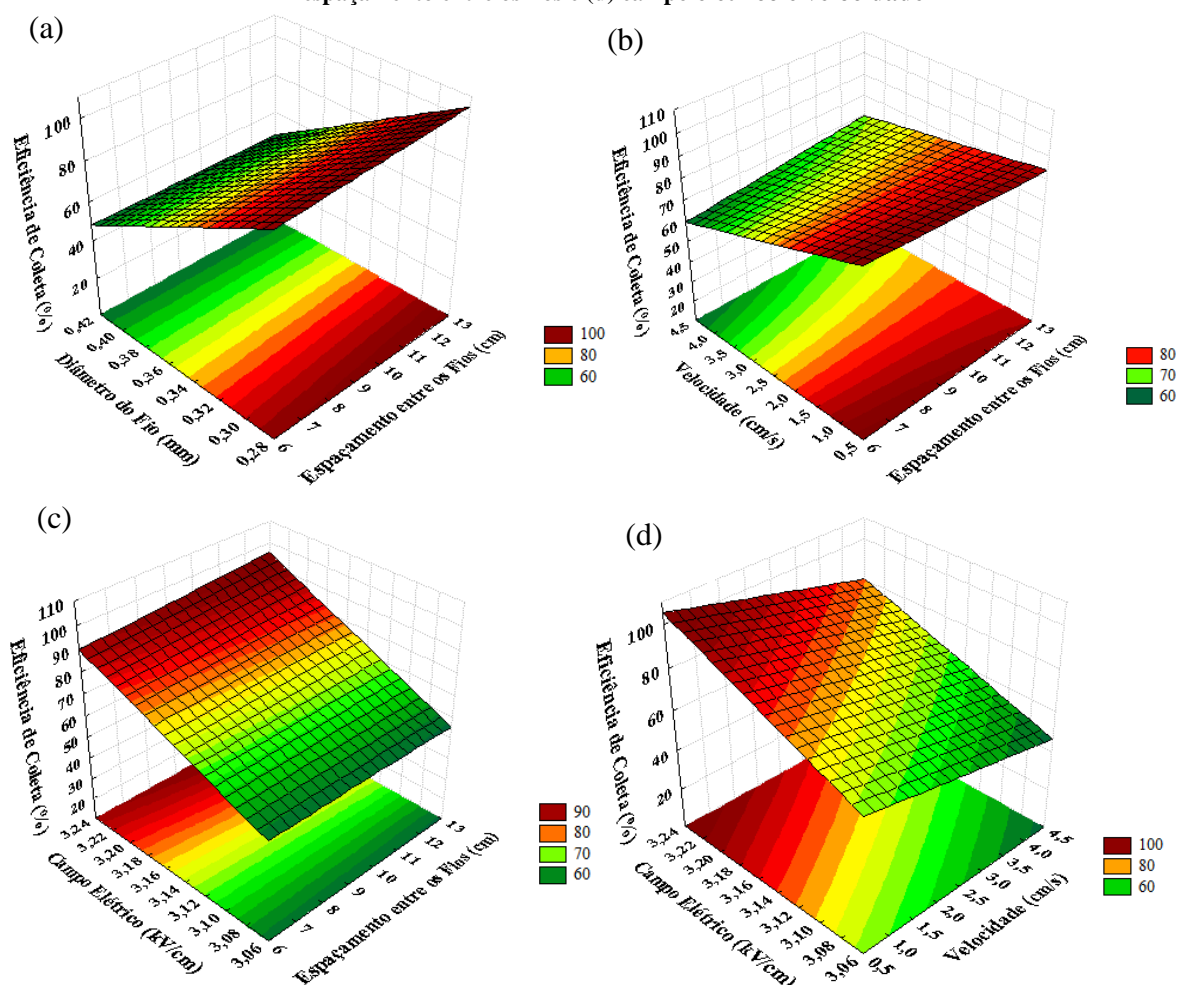


Fonte: Autor, 2020.

Entretanto, é importante ressaltar a significância do espaçamento entre os fios, ainda que pequena, e do efeito positivo obtido pelo espaçamento entre os fios em conjunto com o campo elétrico e com a velocidade. Através do efeito conjunto do espaçamento entre os fios e a velocidade, observa-se que o aumento do espaçamento entre os fios compensou o efeito negativo do aumento da velocidade, devido ao aumento da corrente elétrica ao utilizar o espaçamento de 12 cm.

Analisando as novas superfícies de resposta obtidas (Figura 57), observa-se que elas apresentaram um comportamento praticamente igual às obtidas na análise estatística realizada com os níveis de campo elétrico de 3,08 e 3,38 kV/cm. A diferença mais significativa foi a observada na Figural 57-d, em que o campo elétrico e a velocidade apresentaram uma relação linear crescente. Assim, pode ser concluído que o aumento do espaçamento entre os fios não apresentou uma influência estatisticamente significativa nos resultados de eficiência obtidos, sob as condições operacionais aplicadas.

Figura 57: Superfícies de resposta referentes aos resultados de eficiência de coleta da etapa 3 em função de: (a) diâmetro de fio e espaçamento entre os fios, (b) velocidade e espaçamento entre os fios (c) campo elétrico e espaçamento entre os fios e (d) campo elétrico e velocidade



Fonte: Autor, 2020.

6 CONCLUSÕES

A partir desse estudo, foi possível comprovar a capacidade do precipitador eletrostático de remover nanopartículas presentes em um aerossol. O material particulado utilizado nos experimentos apresentou curvas de distribuição granulométrica bem definidas e com elevada reprodutibilidade. Além disso, a maior parte das partículas geradas possuíam diâmetro entre 10 e 100 nm, com medianas entre 29 e 34 nm. O aumento da velocidade de ar utilizada reduziu a concentração de partículas presentes no aerossol e reduziu o tempo de residência dessas no interior do equipamento, prejudicando a coleta de partículas.

Os resultados da etapa 1 mostram que as velocidades mais baixas forneceram as maiores eficiências de coleta, que aumentaram com o campo elétrico aplicado. Além disso, a concentração da solução inicial de 0,5 g/L favoreceu a coleta de partículas com o campo elétrico de 3,08 kV/cm. Na etapa 2, a redução do diâmetro de fio aumentou a eficiência de coleta de partículas, nos experimentos realizados com 1 e 2 fios, enquanto a etapa 3 identificou que o aumento do espaçamento entre os fios reduz o efeito de blindagem do campo elétrico e melhora a coleta de partículas, para ambos os diâmetros de fios utilizados.

Além disso, nas 3 etapas do estudo, as curvas apresentaram pontos de máxima e mínima eficiência, principalmente para os campos elétricos mais baixos. A análise das forças que atuam no interior do precipitador eletrostático constatou a predominância das forças elétricas, que aumentaram com a intensidade do campo elétrico e, em alguns casos, com o número de eletrodos de descarga. As maiores velocidades do ar reduziram os valores de N_{EHD}/Re^2 , devido à maior atuação das forças viscosas.

A comparação das 3 etapas permitiu determinar que as maiores eficiências globais de coleta foram alcançadas com a velocidade de 1,03 cm/s, obtendo 99,99% de remoção de partículas na etapa 1, para a configuração de 4 fios e concentração de 0,1 g/L. Entretanto, as etapas 2 e 3 alcançaram elevadas eficiências de remoção com a menor velocidade, utilizando apenas 1 e 2 fios de descarga, principalmente para o diâmetro de fio de 0,3 mm. Esse resultado mostra a influência das características dos eletrodos de descarga no desempenho do precipitador eletrostático.

A análise estatística dos dados comprovou a significância da velocidade e do campo elétrico nos resultados de eficiência de coleta de partículas. Além disso, através dos resultados das etapas 1 e 2 foi confirmado que o aumento do número de fios aumenta a eficiência de coleta,

bem como a redução do diâmetro de fio utilizado. Porém, os resultados da etapa 3 mostraram que o espaçamento entre os fios foi considerado um fator não significativo quando comparados os resultados com os campos elétricos de 3,08 e 3,38 kV/cm. Ao serem comparados os resultados com os campos elétricos de 3,08 e 3,23 kV/cm, o espaçamento entre os fios passou a ser significativo, entretanto, o aumento do espaçamento de 6,5 para 12 cm representou uma melhora de apenas 2% na eficiência de coleta de partículas.

Assim, o estudo desenvolvido nesse trabalho foi de grande relevância para a compreensão dos fenômenos envolvidos na precipitação eletrostática de nanopartículas e da influência exercida pelas condições operacionais de velocidade e campo elétrico, bem como dos parâmetros de projeto desse equipamento. Para trabalhos futuros, sugere-se aprofundar o estudo do espaçamento entre os fios utilizando uma maior variação desse parâmetro, avaliando o efeito da blindagem. Além disso, a realização de simulações pode contribuir para a análise da influência desse efeito na eficiência e nas características elétricas do precipitador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AISSOU, M; SAID, H. A; NOURI, H. Effect of Relative Humidity on Current-Voltage Characteristics of Monopolar DC Wire-to-Plane System. **Journal Electrostatics**, vol. 76, p. 108-114, 2015.
- ALI, M.; ALAM, K.; AL-MAJALI, Y.T.A.; KENNEDY, M. Novel hybrid composite discharge electrode for electrostatic precipitator. **Journal of the Air & Waste Management Association**, vol. 67, n. 9, p. 1036–1045, 2017.
- BESSADA, D. F. A. **Generalizações do Movimento Browniano e suas Aplicações à Física e a Finanças**. 2005. 185 f. Dissertação (Mestrado em Física Teórica) - Instituto de Física Teórica. Universidade Estadual Paulista, São Paulo.
- BIN, H.; LIN, Z.; YANG, Y.; FEI, L.; CAI, L.; LINJUN, Y. PM_{2.5} and SO₃ collaborative removal in electrostatic precipitator. **Powder Technology**, vol 318, p 484-490, 2017.
- BRASIL. 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 de outubro de 2018.
- BROCILO, D. **Electrode geometry effects on the collection efficiency of submicron and ultrafine dust particles in wire-plate electrostatic precipitators**. 2003, 273 f. Tese (Doutorado de Engenharia Elétrica e de Computação). McMaster University, Hamilton.
- CERDA, E. V. Estudo do Perfil de Concentração em um Precipitador Eletrostático do Tipo Placa-Fio. 2004. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- CETESB. Poluentes, 2018a. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>>. Acesso em: 17 de outubro de 2018.
- _____. Padrões de Qualidade do Ar, 2018b. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>>. Acesso em: 17 de outubro de 2018.
- CHEREMINISINOFF, P. N. Electrostatics and electrostatic precipitation. In: _____. **Air Pollution Control and Design for Industry**. New York: Marcel Dekker, 1993, cap 6, p 157-186.
- CHRISTIAN, P.; VON DER KAMMER, F.; BAALOUSHA, M.; HOFMANN, TH. Nanoparticles: structure, properties, preparation and behavior in environmental media. **Ecotoxicology**, vol. 17, n. 5, p. 326-343, 2008.
- CRESPO, B.; PATIÑO, D.; REGUEIRO, A.; GRANADA, E. Performance of a lab-scale tubular-type electrostatic precipitator using a diesel engine particle emission source. **Energy**, vol. 116, p. 1444-1453, 2016.
- COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. **Air Pollution Control: A Design Approach**. Illinois, Waveland Press Inc., 2002, cap 5, p. 147-175.
- DUNKLE, S. G. Electrostatic Precipitators. In: HEUMANN, W. L. **Industrial Air Pollution Control Systems**. Nova York: McGraw-Hill, 1997, cap 11, 471-510.
- EL DEIN, A. Z.; USAMA, K. Experimental and simulation study of V–I characteristics of wire–plate electrostatic precipitators under clean air conditions. **Arabian Journal for Science and Engineering**, vol. 39, p. 4037–4045, 2014.

ELECTRICAL FOR YOU. Working Principle of Electrostatic Precipitator, 2018. Disponível em: <<https://www.electrical4u.com/electrostatic-precipitator/>>. Acesso: 25 de julho de 2019.

FALAGUASTA, M. C. R. **Estudo do desempenho de um precipitador eletrostático operando na captura de partículas submicrométricas e nanométricas**. 2005. 332 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

FALAGUASTA, M. C. R.; STEFFENS, J.; VALDES, E. E.; COURY, J. R. Overall collection efficiency of a plate-wire electrostatic precipitator operating on the removal of PM_{2.5}. **Latin American Applied Research**, vol. 38, p. 179-186, 2008.

FARNOOSH, N.; ADAMIAK, K.; CASTLE, G. S. P. Three-dimensional analysis of electrohydrodynamic flow in a spiked electrode-plate electrostatic precipitator. **Journal of Electrostatics**, vol. 69, p. 419-428, 2011.

GUTIÉRREZ ORTIZ, F. J.; NAVARRETE, B.; CAÑADAS, L. Assessment of plate-wire electrostatic precipitators based on dimensional and similarity analyses. **Fuel**, vol. 90, p. 2827-2835, 2011.

HE, Z.; MOHAN DASS, E. T. Correlation of design parameters with performance for electrostatic precipitator. Part I. 3D model development and validation. **Applied Mathematical Modelling**, vol. 57, p. 633-655, 2018.

HESKETH, H. E. **Air pollution control: traditional and hazardous pollutants**. Lancaster: Technomic, 1996.

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.

IEEE-DEIS-EHD Technical Committee, “Recommended International Standard for Dimensionless Parameters Used in Electrohydrodynamics,” **IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.**, vol. 10, pp.3–6, 2003.

INCULET, I. I.; TANASESCU, F.; CRAMARIUC, T. **The modern problems of electrostatics with applications in environment protection**. Netherlands: Springer, 1999.

JĘDRUSIK, M.; GAJEWSKI, J. B.; ŚWIERCZOK, A. Effect of the particle diameter and corona electrode geometry on the particle migration velocity in electrostatic precipitators. **Journal of Electrostatics**, vol. 51, p. 245-251, 2001.

KACI, M.; SAID, H. A.; LAIFAOUNI, A.; AISSOU, M.; NOURI, H.; ZEBBOUDJ. Investigation on the Corona Discharge in Blade-to-Plane Electrode Configuration. **Brazilian Journal of Physics**, vol. 45, n. 6, p. 643-655, 2015.

KARATZAS, I.; SHREVE, S. **Brownian Motion and Stochastic Calculus**. 2 ed. New York: Springer-Verlag, 1998.

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

KHERBOUCHE, F.; BENMIMOUN, Y.; TILMATINE, A.; ZOUAGHI, A.; ZOUZOU, N. Study of a new electrostatic precipitator with asymmetrical wire-to-cylinder configuration for cement particles collection. **Journal of Electrostatics**, vol. 83, p. 7-15, 2016.

- KIM, H.; HAN, B.; W, C. G.; KIM, Y. Ozone Emission and Electrical Characteristics of Ionizers with Different Electrode Materials, Numbers, and Diameters. **Transactions on Industry Applications**, vol. 53, n. 1, p. 459-465, 2017.
- KING, S.; JARVIE, H.; DOBSON, P. Nanoparticle, 2019. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/nanoparticle>>. Acesso em: 23 de julho de 2019.
- LARSEN, P. S.; SORENSEN, S. K. Effect of secondary flows and turbulence on electrostatic precipitator efficiency. **Atmospheric Environment**, vol. 18, n. 10, p. 1963-1967, 1984.
- LIANG, W. J.; LIN, T. H. The Characteristics of ionic wind and its effect on electrostatic precipitators. **Aerosol Science and Technology**, vol. 20, n. 4, p. 330-344, 1994.
- LU, C.; YI, C.; YI, R.; LIU, S. Analysis of the operating parameters of a vortex electrostatic precipitator. **Plasma Science and Technology**, vol 19, 2017.
- MEILLER, M.; ZACH, J.; JAKUTTIS, M.; HORNUNG, A. **Development of an electrostatic precipitator for small scale biomass furnaces**. In: 23rd European Biomass Conference & Exhibition. Proceedings, 2015, Vienna.
- MEIRA, C. R. **Desempenho de um precipitador eletrostático operando na remoção de nanopartículas de aerossóis**. 2009. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- MHSP- Mitsubishi Hitachi Power Systems. Electrostatic Precipitators (ESP), 2017. Disponível em: <<https://www.mhps.com/products/aqcs/lineup/dust-collector/>>. Acesso em: 30 de outubro de 2018.
- MICHAELIDES, E. E.; CROWE, C. T.; SCHWARZKOPF, J. D. **Multiphase flow handbook**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Cidades Sustentáveis – Qualidade do Ar, 2018. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/perguntasfrequent.html?catid=10>>. Acesso em: 17 de outubro de 2018.
- MINITAB. Entendendo Análise de Variância (ANOVA) e o teste F, 2019. Disponível em: <<https://blog.minitab.com/pt/entendendo-analise-de-variancia-anova-e-o-teste-f>>. Acesso em: 16 de janeiro de 2020.
- MOROSKO, J. M. Composite discharge electrode for electrostatic precipitator. 2007. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência) - Russ College of Engineering and Technology. Ohio University, Ohio.
- NIELSEN N. F., ANDERSSON C. Electrode Shape and Collector Plate Spacing Effects on ESP Performance. In: Yan K. (eds) Electrostatic Precipitation. Springer, Berlim, Heidelberg, p. 111-118, 2009.
- NIEWULIS, A.; PODLIŃSKI, J.; MIZERACZYK, J. Electrohydrodynamic Flow Patterns in a Narrow Electrostatic Precipitator with Longitudinal Wire Electrode for Various Electrode Geometries. **International Journal of Plasma Environmental Science & Technology**, vol. 4, n. 2, p. 123-127, 2010.
- NING, Z.; PODLINSKI, J.; SHEN, X.; LI, S.; WANG, S.; HAN, P.; YAN, K. Electrode geometry optimization in wire-plate electrostatic precipitator and its impact on collection efficiency. **Journal of Electrostatics**, vol. 80, p. 76-84, 2016.
- NOURI, H.; SAID, H. A; ZEBBOUDJ, Y; ZOUZOU, N.; DASCALESCU, L. Analysis of Electric Field and Current Density in an Electrostatic Precipitator. **Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 23, n. 2, p. 665-670, 2016.

OLIVEIRA, A. E.; GUERRA, V. G. Effect of low gas velocity on the nanoparticle collection performance of an electrostatic precipitator. **Separation Science and Technology**, vol. 54, n 7, p. 1211-1220, 2018.

OLIVEIRA, A. E. **Precipitação eletrostática de nanopartículas: desenvolvimento de metodologias e investigação de fenômenos**. 2019. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

PALANDI, J.; FIGUEIREDO, D. B.; DENARDIN, J. C.; MAGNANO, P. R. **Teoria cinética e termodinâmica**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria- RS, 2010.

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

PARKER, K. R.; RIEHLE, C.; KRIGMONT, H. Possible future developments in the field of electrostatic precipitation. In: PARKER, K. R. **Applied Electrostatic Precipitation**. Londres: Blackie Academic & Professional, 1997, cap 16, p. 483-500.

PORLE, K.; PARKER, K. R. The physical and chemical properties of particles and their effect on performance. In: PARKER, K. R. **Applied Electrostatic Precipitation**. Londres: Blackie Academic & Professional, 1997, cap 6, p. 153-178.

QIAO, H.; LIU, W.; GU, H.; WANG, D.; WANG, Y. The Transport and Deposition of Nanoparticles in Respiratory System by Inhalation. *Journal of Nanomaterials*, vol. 2015, 2015.

RIEHLE, C. Basic and theoretical operation of ESPs. In: PARKER, K. R. **Applied Electrostatic Precipitation**. Londres: Blackie Academic & Professional, 1997a, cap 3, p. 25-87.

_____. Electrostatic precipitation. In: SEVILLE, J. P. K. *Gas Cleaning in Demanding Applications*. Londres: Blackie Academic & Professional, 1997b, cap 10, p 193-228.

SAID, H. A; AISSOU, M; NOURI, H.; ZEBBOUDJ, Y. Effect of Wires Number on Corona Discharge of an Electrostatic Precipitators. **Journal Electrical Systems**, vol. 10, n. 4, p. 392-405, 2014.

SANTOS, G. P. **Metodologia de Superfície de Resposta Aplicada à Secagem de Frutos de Macaúba para Obtenção de Óleo de Polpa de Alta Qualidade**. 2014. 83 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia). Universidade Católica Dom Bosco.

SUNSUNGS. Electrostatic Precipitator, 2017. Disponível em: <<https://www.sunsungs.com/product/dedusting-series/electrostatic-precipitatore/product94.html>>. Acesso em: 21 de julho de 2019.

STATISTICA HELP. Lack of Fit, 2017. Disponível em: <<https://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Glossary/GlossaryTwo/L/LackofFit>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2020.

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

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.

- TSI. TSI Particle Technology (Particle Instruments). Estados Unidos, 2019, 44f.
- TSI. Portable Atomizer Aerosol Generator Model 3079A. Estados Unidos, 2014, 39f.
- TSI. Aerosol Neutralizers Models 3012, 3012A, 3054, 3054A, 3077, 3077A, 348002. Estados Unidos, 2012, 2f.
- TSI. Series 3080: Electrostatic Classifiers. Estados Unidos, 2009, 147f.
- TSI. Model 3776 Ultrafine Condensation Particle Counter: Operation and Service Manual. Estados Unidos, 2006, 137f.
- VILLOT, A.; GONTHIER, Y.; GONZE, E.; BERNIS, A. Effect of the experimental parameters on the number of free electrons in the drift region of a wire-cylinder electrostatic precipitator. **Journal of Electrostatics**, vol. 71, p. 815-822, 2013.
- WHITE, H. J. **Industrial electrostatic precipitation**. Reading: Addison-Wesley, 1963. 376 p.
- _____, Electrode for electric precipitators. US2244278A. Depósito: 01 de mar. 1940. Concessão: 03 de jun. 1941.
- ZHENG, C.; ZHANG, X.; YANG, Z.; LIANG, C.; GUO, Y.; WANG, Y.; GAO, X. Numerical simulation of corona discharge and particle transport behavior with the particle space charge effect, **Journal of Aerosol Science**, vol 118, p. 22-33, 2018.
- ZHUANG, Y.; KIM, Y. J.; LEE, T. G.; BISWAS, P. Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators. **Journal of Electrostatics**, vol. 48, p. 245-260, 2000.
- ZIEDAN, H.; SAYED, A.; MIZUNO, A.; AHMED, A. Onset voltage of corona discharge in wire-duct electrostatic precipitators. **International Journal of Plasma Environmental Science & Technology**, vol. 4, n. 1, 2010.