

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

**DESEMPENHO DE UM PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO
OPERANDO NA REMOÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE AEROSSÓIS**

Camila Roberta de Meira

**São Carlos
Setembro/2009**

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

**DESEMPENHO DE UM PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO
OPERANDO NA REMOÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE AEROSSÓIS**

Camila Roberta de Meira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

**Orientador: Prof. Dr. José Renato Coury
Co-orientador: Dr. Fábio de Oliveira Arouca**

**São Carlos
Setembro/2009**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

M514dp

Meira, Camila Roberta de.

Desempenho de um precipitador eletrostático operando na remoção de nanopartículas de aerossóis / Camila Roberta de Meira. -- São Carlos : UFSCar, 2009. 106 f.

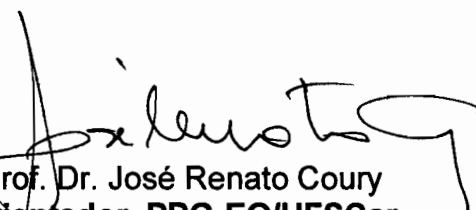
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Filtração. 2. Precipitador eletrostático. 3. Nanopartículas. 4. Eficiência de coleta. I. Título.

CDD: 660.284245 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
CAMILA ROBERTA DE MEIRA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SÃO CARLOS, EM 16 DE SETEMBRO DE 2009.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Renato Coury
Orientador, PPG-EQ/UFSCar



Dr. Reinaldo Pisani Júnior
UNAERP



Dr.^a Vádila Giovana Guerra
DEQ/UFSCar

Aos meus pais, Antonio Carlos e Joana.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Joana e Antonio Carlos, pessoas fundamentais em minha vida, pelo amor, dedicação, incentivo, apoio em todas as etapas de minha vida e todo o esforço para proporcionar sempre o melhor para mim e meus irmãos Rafael e Caio, que também são pessoas muito importantes para mim, obrigada meninas pelo apoio, paciência e carinho.

Ao Fábio pelo seu companheirismo, amor, paciência, incentivo, atenção e ajuda essenciais para eu conseguir vencer mais essa etapa.

A todos os meus familiares que sempre torceram muito por mim, em especial a tia Teresa que sempre se preocupou e rezou muito por mim.

Ao Prof. Dr. José Renato Coury pela orientação, oportunidade, apoio e paciência durante a realização deste trabalho.

Ao Dr. Francisco Braga pela oportunidade, por todo o apoio e incentivo para nunca parar os estudos.

Ao Dr. Fábio Arouca pela amizade, orientação, dedicação, paciência e enorme contribuição para realização deste trabalho.

À Giovana, minha amiga de todas as horas, pela força, ajuda, companheirismo e cumplicidade.

À Natália pela amizade, conversas durante as realizações dos experimentos e participação fundamental no desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas do departamento de Engenharia Química, Ivana, Tatiane, Néstor, Ana Maria, Clarice, Giovanna, Ediane, Renata, Bruna, Sandra, Giann e Eduardo.

Aos colegas do laboratório de Controle Ambiental I.

Ao Dorival pela elaboração de todos os desenhos.

Ao Oscar pela manutenção da unidade experimental.

Ao departamento de Engenharia Química da UFSCar pela disponibilidade e instalações utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

Às empresas Consulmat Produtos Técnicos Indústria e Comércio Ltda. e Critéria Indústria e Comércio de Produtos Medicinais e Odontológicos Ltda. pela disponibilidade de horários necessários para realização deste trabalho.

Agradeço muito a Deus por sempre iluminar meus passos e me dar força para vencer os obstáculos.

RESUMO

A remoção de nanopartículas de aerossóis é importante devido aos efeitos adversos que estas podem causar ao meio ambiente e a saúde humana e também pelas aplicações em processos industriais. Dentre os equipamentos capazes de operar na remoção de material particulado, tem-se o precipitador eletrostático, que, além de controlar a poluição removendo as partículas de meios gasosos em ampla faixa granulométrica, pode ser utilizado na recuperação de produtos de alto valor agregado. No presente trabalho, avaliou-se o desempenho de um precipitador eletrostático do tipo placa-fio de simples estágio operando na remoção de nanopartículas de um aerossol. O sistema experimental simulava uma contaminação de partículas nanométricas polidispersas de NaCl, produzidas na faixa de 6 a 245 nm. O desempenho do precipitador foi avaliado através da análise da eficiência de remoção das nanopartículas, pela contagem das mesmas antes e após a passagem pelo equipamento, utilizando a técnica de mobilidade elétrica. Tal procedimento foi realizado variando-se o potencial aplicado aos eletrodos de descarga. Os resultados mostraram que o precipitador eletrostático é um equipamento com capacidade para remover partículas nanométricas de um aerossol com elevados valores de eficiência. Foi possível obter eficiência acima de 99% para todas as velocidades estudadas, de 1 a 10 cm/s, com intervalados de 1 em 1 cm/s para campo elétrico de 4 a 5,5 kV/cm. A eficiência do precipitador eletrostático tende a aumentar com o decréscimo do diâmetro das partículas até aproximadamente 20 nm, provavelmente devido à maior mobilidade elétrica das partículas menores. Para diâmetros abaixo de 20 nm houve uma queda na eficiência de coleta, que pode ter sido causada pelo baixo carregamento das partículas. O modelo clássico de Deutsch-Anderson não se ajustou bem aos dados experimentais, a eficiência teórica superestimou a eficiência experimental.

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

ABSTRACT

The removal of ultrafine particles is becoming an increasingly important operation due to the occupational problems caused to the environment and to the human health, such as inhalation of particulate matter, as well as by its applications in industrial processes. Among the equipments commonly employed for the removal of particulates from aerosols, the electrostatic precipitator (ESP) is the one capable to remove particles in a large size range with high efficiencies and can be used in the recovery of products of high aggregated value. The aim of this work was to evaluate the influence of operational parameters in the collection efficiency of a plate-wire electrostatic precipitator operating in the removal of nano-sized particles. The experimental system simulated a contamination by polydispersed nanoparticles ranging from 6 to 245 nm in an extra pure air stream. The efficiency for nano-sized particles was obtained by counting of particles before and after the electrostatic precipitator, using an electrical mobility analyzer. This procedure was performed varying the potential is applied to the discharge electrodes. The results shows the ESP presented a high efficiency of removal for nanoparticles of aerosol, where efficiencies larger than 99% were obtained for all velocities studied (1 to 10 cm/s, with intervals of 1 in 1 cm/s) for electric field from 4 to 5.5 kV/cm. The efficiency increased with the decrease of the diameter particles up to approximately 20 nm, probably due to the higher electrical mobility of smaller particles. For diameters below 20 nm there was a drop in collection efficiency, which may have been caused by the low particles charging. The classical Deutsch-Anderson model didn't adjustment to the experimental data, the theoretical efficiency overestimated the experimental efficiency.

Keywords: Electrostatic precipitator; nanoparticles; collection efficiency.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELA.....	ix
NOMENCLATURA.....	x
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Poluentes Atmosféricos	4
2.2 Nanopartículas	5
2.2.1 Definição.....	5
2.2.2 Efeitos Nocivos à Saúde Humana.....	6
2.2.3 Aplicações das Nanopartículas	8
2.3 Continuidade do Meio	11
2.4 Correção para Escoamento em Meio Não Contínuo	12
2.5 Precipitador Eletrostático.....	16
2.5.1 Ionização do Gás.....	19
2.5.2 Carregamento das Partículas.....	20
2.5.3 Campo Elétrico	22
2.5.4 Velocidade de Migração das Partículas	24
2.5.5 Eficiência de Coleta para Precipitadores Eletrostáticos.....	24
2.6 Desempenho de Precipitadores Eletrostáticos na Remoção de Nanopartículas	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 Componentes da Unidade Experimental.....	29
3.1.1 Compressor de Ar	29
3.1.2 Filtros de Purificação de Ar	31
3.1.3 Geradores de Partículas	31
3.1.3.1 Gerador de Partículas Nanométricas – DEQ-UFSCar	31
3.1.3.2 Gerador Atomizador da TSI	34
3.1.4 Solução para Geração do Aerossol	35
3.1.5 Secador por Difusão.....	36

3.1.6	Fontes Neutralizadoras	37
3.1.7	Amostragem de Partículas	37
3.1.8	Medidor de Vazão.....	38
3.1.9	Medidor de Temperatura e Umidade	39
3.1.10	Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (<i>Scanning Mobility Particle Sizer – SMPS</i>)	39
3.1.11	Fonte de Alta Tensão	41
3.1.12	Precipitador Eletrostático.....	42
3.2	Procedimento Experimental.....	44
3.2.1	Testes Preliminares	44
3.2.2	Determinação da Curva Corrente-Tensão.....	47
3.2.3	Testes do Desempenho do Precipitador Eletrostático.....	48
3.2.4	Eficiência do Precipitador.....	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	Determinação da Curva Corrente-Tensão.....	52
4.2	Testes do Desempenho do Precipitador Eletrostático.....	54
4.3	Eficiência do Precipitador.....	65
4.4	Comparação da Eficiência Experimental do Precipitador Eletrostático com os Modelos da Literatura.....	71
5	CONCLUSÕES	76
	SUGESTÕES	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
	APÊNDICE A	84
	APÊNDICE B.....	99
	APÊNDICE C.....	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação do sistema respiratório (U.S.EPA, 2004).....	8
Figura 2.2 – Tipos de precipitadores: (a) simples estágio; (b) duplo estágio (PARKER, 1997).....	17
Figura 2.3 – Modelos de precipitadores eletrostáticos: (a) tubo-fio; (b) placa-fio (PARKER, 1997).	18
Figura 2.4 – Princípio do efeito corona.	20
Figura 2.5 – Linhas do campo elétrico (a) partícula descarregada; (b) partícula com carga de saturação (HINDS, 1999)	21
Figura 2.6 – Relação típica corrente-tensão (RIEHLE, 1997).	23
Figura 2.7 – Eficiência de coleta em função do diâmetro das partículas para diferentes áreas específicas de coleta (MIZUNO, 2000).....	25
Figura 3.1 – Unidade experimental	30
Figura 3.2 – Filtros de purificação.	31
Figura 3.3 – Gerador de Partículas Nanométricas – DEQ-UFSCar: (1) Reservatório de armazenamento da solução, (2) Bico Atomizador e (3) Recipiente para coleta do excesso de líquido.....	32
Figura 3.4 – Bico atomizador: (1) Entrada de ar comprimido, (2) Alimentação da solução, (3) Drenagem de líquido em excesso, (4) Ponto de igual pressão do frasco de líquido drenado e (5) Canal condutor do aerossol.....	33
Figura 3.5 – Gerador atomizador da TSI, modelo 3079.....	34
Figura 3.6 – Esquema do gerador atomizador TSI, modelo 3079 (www.tsi.com).....	35
Figura 3.7 – Secador de difusão.	36
Figura 3.8 – Sonda de amostragem no duto de escoamento do aerossol.....	38
Figura 3.9 – SMPS: Classificador Eletrostático (à direita) e Contador de Partículas Ultrafinas (à esquerda).....	39
Figura 3.10 – Funcionamento do DMA.	40
Figura 3.11 – Vista lateral e superior do precipitador eletrostático com dimensões (cm).	42
Figura 3.12 – Barra de cobre que faz a ligação dos eletrodos de descarga com o cabo de alta tensão.	43
Figura 3.13 – Distribuidor de gás.	44
Figura 3.14 – Distribuições de tamanhos de partículas para diferentes concentrações de soluções de NaCl.	45
Figura 3.15 – Comparação das distribuições de tamanhos de partículas nanométricas em porcentagens de concentrações para diversas condições de amostragem (FEITOSA, 2009). 46	

Figura 3.16 – Esquema da unidade experimental.....	48
Figura 4.1 – Curvas corrente-tensão para as velocidades estudadas.	52
Figura 4.2 – Influência da presença de partículas na curva corrente-tensão.	53
Figura 4.3 – Réplicas de curvas de distribuição de partículas para velocidades de 4 cm/s.....	56
Figura 4.4 – Réplicas de curvas de distribuição de partículas para velocidades de 9 cm/s.....	56
Figura 4.5 – Curvas médias de distribuição de partículas com desvio padrão para velocidade de 4 cm/s.....	57
Figura 4.6 – Curvas médias de distribuição de partículas com desvio padrão para velocidade de 9 cm/s.....	57
Figura 4.7 – Influência da velocidade de 1 a 5 cm/s nas curvas de distribuição de partículas (Gerador DEQ-UFSCar).....	58
Figura 4.8 – Influência da velocidade de 6 a 10 cm/s nas curvas de distribuição de partículas (Gerador TSI).	59
Figura 4.9 – Curvas de concentração antes e após a passagem do aerossol pelo precipitador eletrostático para velocidade de 1 cm/s: (a) $V = 6$ kV; (b) $V = 7$ kV; (c) $V = 7,2$ kV e (d) $V = 7,4$ kV.....	60
Figura 4.10 – Curvas de concentração antes e após a passagem do aerossol pelo precipitador eletrostático para velocidade de 1 cm/s: (a) $V = 7,6$ kV e (b) $V = 7,8$ kV.....	61
Figura 4.11 – Distribuição de partículas em porcentagem de concentração.	62
Figura 4.12 – Curvas de distribuição de partículas: (a) $v = 4$ cm/s, $E_{ps} = 3,5$ kV/cm; (b) $v = 4$ cm/s, $E_{ps} = 4$ kV/cm; (c) $v = 8$ cm/s, $E_{ps} = 3,5$ kV/cm; (d) $v = 8$ cm/s, $E_{ps} = 4$ kV/cm.....	63
Figura 4.13 – Curvas de concentração de partículas: (a) antes do precipitador para $v = 2$ cm/s; (b) depois do precipitador para $v = 2$ cm/s e $E_{ps} = 4$ kV/cm; (c) antes do precipitador para $v = 6$ cm/s; (d) depois do precipitador para $v = 6$ cm/s e $E_{ps} = 4,5$ kV/cm.....	64
Figura 4.14 – Eficiência fracionária para as velocidades: (a) $v = 1$ cm/s e (b) $v = 2$ cm/s.....	65
Figura 4.15 – Eficiência fracionária para as velocidades: (a) $v = 3$ cm/s; (b) $v = 4$ cm/s; (c) $v = 5$ cm/s e (d) $v = 6$ cm/s.....	66
Figura 4.16 – Eficiência fracionária para as velocidades: (a) $v = 7$ cm/s; (b) $v = 8$ cm/s; (c) $v = 9$ cm/s e (d) $v = 10$ cm/s.....	67
Figura 4.17 – Eficiência fracionária para o campo elétrico de 3,6 kV/cm.	69
Figura 4.18 – Eficiência fracionária para o campo elétrico: (a) 4,5 kV/cm e (b) 5 kV/cm.....	70
Figura 4.19 – Influência da velocidade sobre a eficiência: (a) $E_{ps} = 3,5$ kV/cm e (b) $E_{ps} = 3,9$ kV/cm.....	70
Figura 4.20 – Eficiência teórica pelo modelo de Deutsch-Anderson: (a) $v = 3$ cm/s; (b) $v = 4$ cm/s; (c) $v = 5$ cm/s e (d) $v = 6$ cm/s.	72
Figura 4.21 – Eficiência teórica pelo modelo de Deutsch-Anderson: (a) $v = 7$ cm/s; (b) $v = 8$ cm/s; (c) $v = 9$ cm/s e (d) $v = 10$ cm/s.	73

Figura 4.22 – (a) comparação entre a eficiência experimental e teórica pelo modelo de Deutsch-Anderson para velocidade de 10 cm/s e (b) zoom da área demarcada.....	74
Figura A.1 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 2 cm/s: (a) 3 kV/cm; (b) 3,5 kV/cm; (c) 3,6 kV/cm; (d) 3,7 kV/cm; (e) 3,8 kV/cm e (f) 3,9 kV/cm.	85
Figura A.2 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 2 cm/s e 4 kV/cm.....	86
Figura A.3 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 3 cm/s: (a) 3 kV/cm; (b) 3,5 kV/cm; (c) 3,6 kV/cm e (d) 3,7 kV/cm.....	86
Figura A.4 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 3 cm/s: (a) 3,8 kV/cm; (b) 3,9 kV/cm e (c) 4 kV/cm.....	87
Figura A.5 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 4 cm/s: (a) 3 kV/cm e (b) 3,5 kV/cm.	87
Figura A.6 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 4 cm/s: (a) 3,6 kV/cm; (b) 3,7 kV/cm; (c) 3,8 kV/cm; (d) 3,9 kV/cm; (e) 4 kV/cm e (f) 4,5 kV/cm.	88
Figura A.7 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 5 cm/s: (a) 3 kV/cm; (b) 3,5 kV/cm; (c) 3,6 kV/cm; (d) 3,7 kV/cm; (e) 3,8 kV/cm e (f) 3,9 kV/cm.	89
Figura A.8 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 5 cm/s: (a) 4 kV/cm e (b) 4,5 kV/cm.	90
Figura A.9 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 6 cm/s: (a) 3 kV/cm e (b) 3,5 kV/cm.	90
Figura A.10 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 6 cm/s: (a) 3,6 kV/cm; (b) 3,7 kV/cm; (c) 3,8 kV/cm; (d) 3,9 kV/cm; (e) 4 kV/cm e (f) 4,5 kV/cm.	91
Figura A.11 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 7 cm/s: (a) 3 kV/cm; (b) 3,5 kV/cm; (c) 3,6 kV/m; (d) 3,7 kV/cm; (e) 3,8 kV/cm e (f) 3,9 kV/cm.	92
Figura A.12 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 7 cm/s: (a) 4 kV/cm; (b) 4,5 kV/cm e (c) 5 kV/cm.....	93
Figura A.13 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 8 cm/s: (a) 3 kV/cm e (b) 3,5 kV/cm.	93
Figura A.14 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 8 cm/s: (a) 3,6 kV/cm, (b) 3,7 kV/cm, (c) 3,8 kV/cm, (d) 3,9 kV/cm, (e) 4 kV/cm e (f) 4,5 kV/cm.....	94
Figura A.15 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 8 cm/s e 5 kV/cm.....	95
Figura A.16 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 9 cm/s: (a) 3 kV/cm, (b) 3,5 kV/cm, (c) 3,6 kV/cm e (d) 3,7 kV/cm.	95
Figura A.17 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 9 cm/s: (a) 3,8 kV/cm; (b) 3,9 kV/cm; (c) 4 kV/cm; (d) 4,5 kV/cm e (e) 5 kV/cm.	96
Figura A.18 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 10 cm/s: (a) 3 kV/cm, (b) 3,5 kV/cm, (c) 3,6 kV/cm, (d) 3,7 kV/cm, (e) 3,8 kV/cm e (f) 3,9 kV/cm.....	97
Figura A.19 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 10 cm/s: (a) 4 kV/cm, (b) 4,5 kV/cm, (c) 5 kV/cm e (d) 5,5 kV/cm.	98

Figura B.1 – Eficiência fracionária para campo elétrico de 4 kV/cm: (a) $v = 1$ cm/s; (b) $v = 2$ cm/s e (c) $v = 3$ cm/s.....	100
Figura B.2 – Eficiência fracionária para campo elétrico de 4,5 kV/cm: (a) $v = 4$ cm/s; (b) $v = 5$ cm/s e (c) $v = 6$ cm/s.....	101
Figura B.3 – Eficiência fracionária para campo elétrico de 5 kV/cm: (a) $v = 7$ cm/s; (b) $v = 8$ cm/s e (c) $v = 9$ cm/s.....	102
Figura B.4 – Eficiência fracionária para campo elétrico de 5,5 kV/cm e $v = 10$ cm/s.....	103
Figura C.1 – Eficiência fracionária para o campo elétrico: (a) 3 kV/cm; (b) 3,5 kV/cm;.....	105
(c) 3,7 kV/cm e (d) 3,8 kV/cm.....	105
Figura C.2 – Eficiência fracionária para o campo elétrico: (a) 3,9 kV/cm e (b) 4 kV/cm. ...	106

LISTA DE TABELA

Tabela 3.1 – Propriedades do cloreto de sódio	36
Tabela 3.2 – Dimensões do precipitador eletrostático.....	43
Tabela 4.1 – Número de Reynolds no precipitador eletrostático	55

NOMENCLATURA

A_{ne}	área de coleta do precipitador.....	[L ²]
$2c$	espaçamento entre os eletrodos de descarga.....	[L]
C_0	concentração de partículas antes do precipitador eletrostático....	[M L ⁻³]
C_s	concentração de partículas depois do precipitador eletrostático..	[M L ⁻³]
Cu	fator de correção de Cunningham.....	[-]
De	número de Deutsch.....	[-]
D_{eq}	diâmetro equivalente.....	[L]
d_p	diâmetro da partícula.....	[L]
D_{pi}	difusividade da partícula.....	[L ² t ⁻¹]
E	campo elétrico.....	[M L I ⁻¹ t ⁻³]
E_{ps}	campo elétrico pseudo-homogêneo.....	[M L I ⁻¹ t ⁻³]
F_w	força de arraste.....	[M L t ⁻²]
h_{ne}	altura do precipitador eletrostático.....	[L]
K_B	constante de Boltzmann.....	[M L ² t ⁻² T ⁻¹]
k_d	coeficiente de arraste.....	[M t ⁻¹]
Kn	número de Knudsen.....	[-]
L_{ne}	comprimento do precipitador eletrostático.....	[L]
M	peso molecular.....	[M]
\bar{M}	massa atômica da partícula.....	[M]
m_g	massa do gás.....	[M]
m_p	massa partícula.....	[M]
N	densidade do gás em número.....	[M L ⁻³]
P	pressão.....	[M L ⁻¹ t ⁻²]
Pe	número de Peclet.....	[-]
Q	vazão volumétrica.....	[L ³ t]
Q_p^∞	carga da partícula na saturação.....	[I t]

R	constante universal dos gases.....	[M L ² t ⁻² mol ⁻¹ T ⁻¹]
Re	número de Reynolds.....	[-]
r_p	raio da partícula.....	[L]
r_{se}	raio do eletrodo de descarga.....	[L]
$2r_{se}$	diâmetro do eletrodo de descarga.....	[L]
s	distância entre o eletrodo de descarga e o eletrodo de coleta.....	[L]
$2s$	distância entre as placas de coleta.....	[L]
T	temperatura absoluta.....	[T]
T_m	temperatura de fusão.....	[T]
v	velocidade do gás.....	[L t ⁻¹]
V	tensão aplicada.....	[M L ² I ⁻¹ t ⁻³]
V_o	tensão na qual se inicia a descarga corona.....	[M L ² I ⁻¹ t ⁻³]
V_{cr}	tensão na qual ocorre o rompimento elétrico do gás.....	[M L ² I ⁻¹ t ⁻³]
V_m	volume específico do sólido no ponto de fusão.....	[L ³ mol ⁻¹]
w_{th}	velocidade teórica de migração.....	[L t ⁻¹]
ε	energia característica para o potencial de Lennard-Jones 12-6....	[T]
ε_0	permissividade elétrica do vácuo.....	[t ² C ² M ⁻¹ L ⁻³]
ε_r	constante dielétrica da partícula.....	[-]
η_{dpi}	eficiência de coleta das partículas de diâmetro d_{pi}	[-]
λ	caminho livre médio das moléculas no gás.....	[L]
μ	viscosidade do gás.....	[M L ⁻¹ t ⁻¹]
ρ	resistividade elétrica do material.....	[M L ³ I ⁻² t ⁻³]
ρ_p	densidade da partícula.....	[M L ⁻³]
σ	diâmetro característico para o potencial de Lennard-Jones 12-6.	[L]
φ	potencial eletrostático.....	[M L ² I ⁻¹ t ⁻³]
#/cm ³	número de partículas por unidade de volume.....	[-]

1 INTRODUÇÃO

Partículas ultrafinas têm se tornado alvo de várias pesquisas, devido ao avanço tecnológico através da nanociência e nanotecnologia e às novas aplicações e aperfeiçoamentos obtidos por causa das propriedades mecânica, óptica, magnética e química distintas que as nanopartículas apresentam em relação às partículas macroscópicas. O aproveitamento dessas propriedades na nanotecnologia de materiais oferece a perspectiva de grandes avanços que permitam melhorar a qualidade de vida e ajudem a preservar o meio ambiente.

A nanotecnologia pode trazer benefícios para a prevenção da poluição ou danos indiretos causados ao meio ambiente, através do uso de nanomateriais que aumentam a eficiência e a seletividade de processos industriais. A mesma vem permitindo a fabricação de sensores cada vez menores, mais seletivos e mais sensíveis para a detecção e monitoramento de poluentes orgânicos e inorgânicos no meio ambiente. A grande área superficial das nanopartículas lhes confere, em muitos casos, excelentes propriedades de adsorção de metais e substâncias orgânicas, o que pode ser útil no tratamento da poluição.

Entretanto, apesar dos benefícios que a nanotecnologia pode gerar, também há uma crescente preocupação com o controle de materiais particulados lançados ao meio ambiente, principalmente a contaminação por partículas finas que permanecem na atmosfera por longos períodos, o que resulta em potenciais problemas de visibilidade e efeitos adversos à saúde humana.

O material particulado no ambiente, especialmente na atmosfera, é uma mistura complexa de partículas naturais (incluindo as emissões vulcânicas) e geológicas (poeira), fuligem natural e material particulado carbonado ou artificial. Este último inclui um excesso de material particulado de combustão, abrangendo a geração de energia, queimas agrícolas, transporte, erosão, detritos de tintas e revestimentos, pneus, outros produtos de reações secundárias e uma vasta gama de material particulado biogênico (MURR e GARZA, 2009).

A presença de material particulado com diâmetro médio menor que 2,5 μm , denominadas partículas respiráveis de alto risco ($\text{PM}_{2,5}$), na atmosfera oferece sérios problemas à saúde humana, uma vez que o sistema respiratório superior não consegue reter

essas partículas, que atingem os alvéolos pulmonares. Os efeitos tóxicos destas partículas podem causar doenças e a diminuição da expectativa de vida (DONALDSON et al., 1998).

Estudos epidemiológicos ligando o nível de partículas finas no ambiente com a morbidade e a mortalidade prematura tem aumentado a preocupação com a qualidade do ar e saúde humana (ZURAIMI e THAM, 2009). Por isso o controle do material particulado é cada vez mais rigoroso, com a aplicação de novas regulamentações e leis, como o controle das partículas respiráveis de alto risco (PM_{2,5}) feito nos Estados Unidos. Conseqüentemente, ocorre um aumento no interesse do desempenho dos dispositivos de controle na escala da partícula fina.

O pequeno tamanho das nanopartículas facilita sua difusão e transporte na atmosfera, em águas e em solos. A captura das partículas compreendidas nessa faixa granulométrica torna-se necessária para a preservação da qualidade de vida da presente e futura gerações, qualidade do ar, danos que podem causar a saúde humana e ao meio ambiente, e também pela recuperação para uso e aplicação de partículas nanométricas geradas na forma de aerossóis em muitos processos. Neste sentido, o aprimoramento de processos utilizados na remoção de particulados submicrométricos e nanométricos em aerossóis está cada vez mais sendo discutido, devido a esta grande preocupação com problemas ambientais e as possíveis conseqüências para o bem estar da população.

Dentre os equipamentos utilizados para remoção de material particulado, tem-se o precipitador eletrostático que além de remover as partículas de meios gasosos, em amplas faixas granulométricas, possibilita também o reaproveitamento de materiais com alto valor agregado.

De acordo com Falaguasta (2005), o precipitador eletrostático apresenta a vantagem de atingir alta eficiência de remoção para uma ampla faixa granulométrica, incluindo as partículas mais finas. Os precipitadores industriais apresentam eficiência de coleta acima de 99% em termos de massa para grandes volumes de gases, no entanto ocorre a penetração das partículas submicrométricas (NÓBREGA, 2002; ZHUANG et al., 2000; HUANG e CHEN, 2002).

Considerando a importância do conhecimento do comportamento das nanopartículas, sua remoção de efluentes gasosos e os poucos trabalhos presentes na literatura, o presente trabalho, inserido em uma linha de pesquisa que vem desenvolvendo

estudos com partículas nanométricas (FALAGUASTA, 2005; STEFFENS, 2007; FEITOSA, 2009), teve como objetivo estudar a eficiência de um precipitador eletrostático do tipo placa-fio em estágio simples na remoção de nanopartículas polidispersas de uma corrente gasosa. O desempenho do precipitador eletrostático foi avaliado variando-se o campo elétrico pseudo-homogêneo (E_{ps}) e a velocidade de escoamento do gás (v). A comparação foi realizada através da eficiência de remoção das nanopartículas pelo equipamento.

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos: o Capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica, abordando as aplicações e implicações no uso de nanopartículas e alguns fundamentos importantes do princípio de operação do precipitador eletrostático. No Capítulo 3 são descritos os materiais utilizados e o procedimento experimental adotado para a pesquisa, no Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos no presente trabalho e discussão dos mesmos e no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Poluentes Atmosféricos

Os poluentes atmosféricos são provenientes de uma variedade de fontes naturais e artificiais. As fontes naturais incluem vento, poeira e fuligem de incêndios florestais. As fontes artificiais incluem os automóveis, utilitários elétricos, queima de combustível industrial e as operações industriais.

Considera-se poluente qualquer substância que pela sua concentração no ar torne-o impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, causando inconveniência ao bem estar público, danos aos materiais, a fauna e a flora, ou seja, é prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

A poluição por material particulado (MP) é a principal causa da redução da visibilidade. O material particulado é formado por um conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho. Muitas fontes naturais ou artificiais emitem material particulado diretamente ou emitem outros poluentes na atmosfera, como dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COV), que são emitidos principalmente em atividades de combustão, transformando-se em partículas como resultado de reações químicas no ar (www.cetesb.sp.gov.br). Estas partículas suspensas no ar são exemplos de aerossóis.

Aerossol é uma mistura complexa de líquidos e partículas sólidas suspensas em um meio gasoso. O tamanho das partículas que constituem um aerossol estão na faixa de 0,002 a 100 µm (HINDS, 1999). A medida do tamanho leva em consideração o diâmetro aerodinâmico da partícula, que é definido como o diâmetro de uma esfera de densidade unitária com a mesma velocidade terminal da partícula em questão (DULLIEN, 1989).

O tamanho das partículas de um aerossol está diretamente ligado ao seu potencial em causar problemas à saúde.

A exposição a partículas muito pequenas presentes na atmosfera tem sido associada com aumento de doenças respiratórias, diminuição da função pulmonar, e até mesmo a morte prematura. Além disso, as partículas, tais como sulfatos e nitratos contribuem para a formação da chuva ácida, que torna lagos e rios impróprios para muitos peixes e de forma indireta afeta a saúde humana, uma vez que os poluentes que provocam chuva ácida, dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x) interagem na atmosfera formando finas partículas de nitrato e sulfato que podem ser transportadas a longas distâncias pelos ventos e inaladas atingindo o pulmão das pessoas.

A *U. S. Environmental Protection Agency* (USEPA) define padrões de concentrações máximas de material particulado no ar ambiente e divide o material particulado em duas categorias:

- Partículas inaláveis grossas (PM₁₀): são maiores que 2,5 µm e inferior a 10 µm de diâmetro;
- Partículas finas (PM_{2,5}): com diâmetros menores que 2,5 µm.

O PM₁₀ representa uma preocupação à saúde, porque pode ser inalado e acumular-se no sistema respiratório. O PM_{2,5} apresenta alto risco à saúde, pois devido a seu pequeno tamanho, as partículas finas podem hospedar-se nos pulmões. As principais fontes de emissões de partículas finas incluem todos os tipos de combustão (veículos automotores, centrais de energia, queima de madeira, etc) e alguns processos industriais.

2.2 Nanopartículas

2.2.1 Definição

Na literatura encontram-se vários trabalhos com diferentes definições para a faixa de tamanho da escala nanométrica.

A *International Organization for Standardization* (ISO) classifica partículas nanométricas como aquelas com diâmetro aerodinâmico menor que 40 nm.

Entretanto, os autores de trabalhos presentes na literatura adotam outras definições. Falaguasta (2005), Hinds (1999), Kittelson (1998) e Pui e Chen (1997) consideram nanopartículas aquelas que possuem diâmetro menor que 50 nm.

Para Steffens (2007), Aitken et al. (2004) e Davies (2001) as partículas nanométricas são aquelas que apresentam diâmetro menor que 100 nm.

USEPA (2004) classifica como nanopartículas aquelas na faixa entre 1 e 100 nm.

ZHIQIANG et al. (2000) entendem que as nanopartículas possuem diâmetros menores que 1 μm .

Neste trabalho são consideradas nanopartículas aquelas com diâmetro inferior a 250 nm.

2.2.2 Efeitos Nocivos à Saúde Humana

Existem estudos epidemiológicos ligando o nível de partículas finas no ambiente com a morbidade e a mortalidade prematura (ZURAIMI e THAM, 2009). Segundo Derbyshire (2005), a concentração de poeira, tempestades de poeira, queimadas e acumulação de fumaça são responsáveis por algumas mortalidades diárias. Foi estimado que a poluição global cause cerca de 40% das mortes mundiais (PIMENTEL et al., 2007).

Embora as partículas ultrafinas ou nanopartículas respondam por menos de 1% da massa externa de material particulado, elas representam uma fração significativa (>90%) em termos de número de concentração (OBERDÖRSTER, 2001). Estas partículas são associadas com questões adversas da saúde respiratória.

Quando inaladas ou infiltradas as nanopartículas induzem a inflamação pulmonar e implicação nos órgãos distantes de sua inserção em animais e a indução ou exacerbação de doenças pulmonares e cardiovasculares em humanos (MURR e GARZA, 2009).

Como o grau de toxicidade de uma partícula é função de sua área superficial, partículas com diâmetro abaixo de 50 nm apresentam uma toxicidade excepcional. Os efeitos

à saúde que estas podem causar dependem também da composição química das mesmas (OBERDÖRSTER, 1996 apud DONALDSON et al., 1998).

É comprovado que a exposição à sílica (SiO_2) e outras partículas de poeiras minerais, como carvão, grafite, e as diversas formas de nanofibras de amianto induz à inflamação pulmonar, estresse oxidativo, fibrose e citotoxicidade. Efeitos a longo prazo incluem câncer pulmonar, como mesotelioma que pode ocorrer entre 30 e 50 anos após a exposição ao amianto (MURR e GARZA, 2009).

Para elucidar os mecanismos de toxicidade que ligam fenômenos físicos e químicos da nanopartícula inalada com respostas biológicas, células *in vitro* de mamíferos têm sido cultivadas e tratadas com vários tipos de partículas nanométricas fabricadas. Os resultados comprovam respostas citotóxicas *in vitro* para uma vasta gama de nanopartículas agregadas, mas ainda não se sabe qual característica comum ou mecanismo fundamental (a reatividade (efeitos de transferência do elétron), fenômenos de superfície ou interfacial ou área superficial) é responsável pelos problemas causados (MURR e GARZA, 2009).

O sistema respiratório pode ser dividido em três regiões: extratorácica, traqueobrônquica e alveolar, como mostra a Figura 2.1. A região extratorácica é constituída pelas vias aéreas no interior da cabeça, ou seja, passagens nasais, orais e laringe. As partículas maiores que $2,5 \mu\text{m}$ quando inaladas depositam-se nessas vias sendo expelidas para o sistema gastrointestinal pelas mucosas. As partículas mais finas, menores que $2,5 \mu\text{m}$, atingem as partes mais profundas do pulmão, de onde são removidas pela ação dos macrófagos que as fagocitam e a expelem com o muco formado, minimizando a interação das mesmas com o organismo e limpando o pulmão. Se houver uma grande concentração destas partículas no sistema respiratório estas não serão removidas efetivamente, pois entram em contato com o epitélio e são absorvidas rapidamente em função de seu pequeno diâmetro (DONALDSON et al., 1998).

As partículas nanométricas podem ficar retidas no pulmão por um longo período ou penetrar nos interstícios e na membrana celular fazendo com que materiais relativamente insolúveis e adsorvidos a elas, atravessem o sistema respiratório (PUI e CHEN, 1997).

Estudos têm demonstrado uma maior toxicidade de partículas ultrafinas em comparação com as partículas finas do mesmo material (DONALDSON et al., 1998).

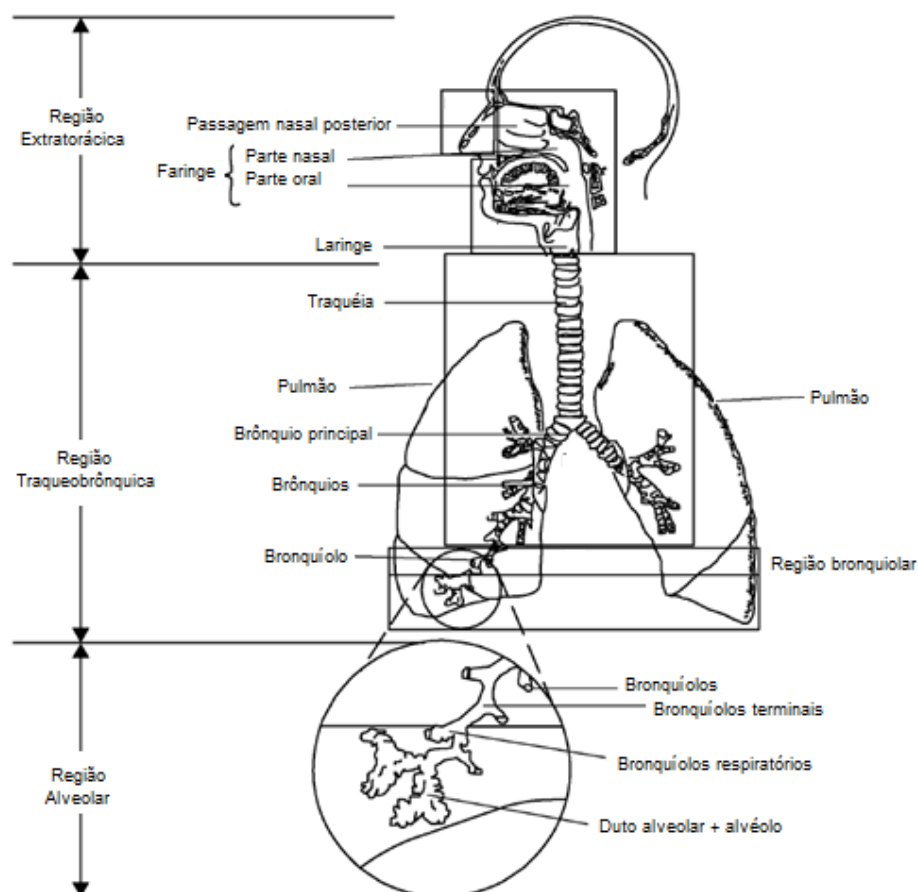


Figura 2.1 – Representação do sistema respiratório (U.S.EPA, 2004).

Apesar dos efeitos nocivos à saúde humana que as nanopartículas podem causar, a nanotecnologia permite avanços para melhorar a qualidade de vida, ajudar a preservar o meio ambiente e desenvolvimento de novos produtos em vários setores.

2.2.3 Aplicações das Nanopartículas

Os materiais compostos de partículas nanométricas apresentam melhorias significativas em suas propriedades ópticas, mecânicas, elétricas e magnéticas, que são desejáveis em muitas aplicações na engenharia (CHEN et al., 1998). As nanopartículas apresentam uma grande área superficial e propriedades distintas de partículas e superfícies

macroscópicas. O aproveitamento dessas propriedades em aplicações tecnológicas forma a base da nanotecnologia de materiais.

Em 2004, Quina publicou um artigo prevendo grandes benefícios provenientes da nanotecnologia, segundo o autor o uso de nanomateriais catalíticos que aumentam a eficiência e a seletividade de processos industriais resultaria em um aproveitamento mais eficiente de matérias-primas, com um consumo menor de energia e produção de menores quantidades de resíduos indesejáveis.

Avanços em sensores para a detecção de poluentes implicam diretamente num melhor controle de processos industriais e na detecção mais precoce e precisa da existência de problemas de contaminação.

Como mais um benefício para o meio ambiente, a nanotecnologia vem contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de iluminação de baixo consumo energético.

Na área de informática, processadores menores, mais rápidos e mais versáteis representam uma busca constante para a indústria. Pesquisadores das universidades Stanford e da Flórida e do Laboratório Nacional Lawrence Livermore, nos Estados Unidos, conseguiram criar um dos tipos básicos de semicondutores utilizando fitas nanométricas de grafeno. O objetivo dos pesquisadores é encontrar uma nova maneira de modificar uma nanofita de grafeno de modo que ela seja capaz de conduzir elétrons, requisito fundamental para que o material possa ser empregado na produção de dispositivos eletrônicos (www.agencia.fapesp.com.br). A nanotecnologia também vem aprimorando o desenvolvimento de displays mais leves e com melhor definição, que apresentam as vantagens da ausência de metais tóxicos na sua fabricação e tem um consumo menor de energia.

Pesquisadores da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) desenvolveram nanofibras por eletrofição, técnica que possibilita a obtenção de fibras com superfície de contato muito maior do que as produzidas normalmente. As nanofibras possuem a vantagem de terem uma área superficial extremamente elevada. São aplicáveis em diversas áreas, como medicina (em enxertos de pele artificial, suportes para crescimento celular de órgãos *in situ*, crescimento de vasos capilares, liberação de fármacos e filtração de vírus e bactérias) ou engenharia, por exemplo, na filtração de partículas micrométricas em tecidos especiais (www.agencia.fapesp.com.br).

Através das recentes descobertas no campo da nanotecnologia uma equipe internacional multidisciplinar utiliza a modificação química para produzir metais com superfícies inteligentes, capazes de interagir positivamente com as células ajudando a controlar a reação biológica. O tratamento químico de superfícies metálicas poderá, no futuro, ter aplicações em implantes médicos e dentários, minimizando a rejeição de próteses metálicas pelo corpo humano. O estudo apresenta a versatilidade das novas soluções utilizadas para tratamento químico de superfícies metálicas para modificações na nanoescala, dimensão em que ocorre a sinalização celular, e mostra que as alterações nas células do organismo acontecem tanto na expressão gênica como na expressão de proteínas (www.agencia.fapesp.com.br).

A Nanox, empresa de nanotecnologia multimercados, lançou na Brasilplast 2009 em parceria com a Resimax Plásticos um aditivo antimicrobiano para o mercado de plásticos, tornando os produtos que o utilizam livres de bactérias e fungos durante toda a sua vida útil, e conseqüentemente, mais higiênicos (www.nanox.com.br).

Outro grande setor que está utilizando a nanotecnologia é o agronegócio, em maio de 2009 foi inaugurado o Laboratório Nacional de Nanotecnologia para o Agronegócio (LNNA) na sede da Embrapa Instrumentação Agropecuária, unidade da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, em São Carlos, SP. As linhas de pesquisa são: sensores e biossensores para monitoramento de processos e produtos; membranas de separação e embalagens biodegradáveis, bioativas e inteligentes e novos usos de produtos agropecuários.

A nanotecnologia vem sendo aplicada em vários outros setores, como por exemplo, na engenharia aeroespacial, a aplicação de nanotubos de carbono em compósitos estruturais busca obter avanços significativos em termos de aumento das suas propriedades mecânicas, térmicas e de condutividade elétrica.

No setor de alimentos, a Bayer produz um filme plástico transparente contendo nanopartículas de argila que estão dispersas em todo o plástico e são capazes de bloquear o oxigênio, dióxido de carbono e umidade para que não atinja a carne fresca ou outros alimentos.

Devido ao crescente desenvolvimento da nanotecnologia e aos efeitos nocivos que as nanopartículas podem causar ao meio ambiente e à saúde humana, torna-se

indispensável o estudo de métodos para a remoção destas do ar atmosférico. Dentre os equipamentos com essa capacidade destaca-se o precipitador eletrostático.

2.3 Continuidade do Meio

Para o estudo das nanopartículas é importante a determinação dos processos de transferência de massa e movimento das mesmas. Entretanto, nesta faixa, a teoria não está bem consolidada, devido à perda de continuidade do meio gasoso. A faixa de diâmetro pode influenciar as propriedades das partículas e também tem efeitos sobre o comportamento do aerossol (sua interação com o meio que as cerca) e as leis que governam as propriedades do mesmo (HINDS, 1999).

A perda da continuidade do meio está relacionada à interação das nanopartículas com o meio gasoso. Em função de seu reduzido tamanho, da mesma ordem de grandeza do caminho livre médio das moléculas, as partículas “enxergam” o meio gasoso não mais como uma massa contínua e sim como um aglomerado de moléculas (FALAGUASTA, 2005).

O transporte das partículas em um fluido está fortemente ligado à interação entre o gás e as partículas constituintes. Esta interação pode ser determinada através do número de Knudsen (Kn), um número adimensional, que relaciona o caminho livre médio das moléculas no gás (λ) e o diâmetro das partículas (d_p) (HINDS, 1999):

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (2.1)$$

O caminho livre das moléculas no gás (λ) é a distância que uma molécula do gás percorre antes de se chocar com outra. Se o fluido for o ar, o caminho livre médio (λ) pode ser determinado pela equação (DULLIEN, 1989):

$$\lambda = \frac{\mu}{0,499 P \left(\frac{8M}{\pi RT} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.2)$$

na qual λ é o caminho livre médio em m, μ é a viscosidade do ar em kg/m.s, P é a pressão em Pa, M é o peso molecular e T a temperatura absoluta em Kelvin.

Como o tamanho da partícula influencia o comportamento do aerossol e as leis que determinam as propriedades do mesmo, o comportamento da partícula em relação ao gás é caracterizado através do número de Knudsen (HINDS, 1999). Se $Kn \gg 1$, as partículas apresentam tamanhos da mesma ordem de grandeza do caminho livre médio das moléculas do gás e não enxergam o meio gasoso como uma massa contínua, mas como um aglomerado de partículas, seguindo a teoria cinética dos gases. Se $Kn \ll 1$ a partícula é muito maior que o caminho livre médio e enxergará o gás como um meio contínuo.

Quando $Kn \cong 1$, denominada região de transição, ainda existem dificuldades para a caracterização do comportamento da partícula e os resultados obtidos não são confiáveis (PUI e CHEN, 1997).

2.4 Correção para Escoamento em Meio Não Contínuo

O transporte de partículas através de um fluido está diretamente relacionado à interação entre as duas partes, que se altera com a diminuição do tamanho da partícula ou aumento do número de Knudsen. Conforme o Kn se distancia de zero, as equações válidas para o regime contínuo perdem a sua validade e seu emprego resulta em grande erro.

Cunningham propôs uma equação, modificada por Knudsen e Weber, para corrigir o efeito de interações em nível molecular quando as partículas que escoam no fluido são menores que 20 μm . Esta equação é amplamente utilizada para corrigir a equação de

Stokes que define a força de arraste para baixos valores de Reynolds (FUCHS, 1964 apud FALAGUASTA, 2005).

$$F_w = k_d v \quad (2.3)$$

na qual, v é a velocidade do gás e k_d é o coeficiente de arraste, definido pela equação:

$$k_d = \frac{6\pi\mu r_p}{Cu} \quad (2.4)$$

em que r_p é o raio da partícula, Cu é o fator de correção de Cunningham, representado pela equação abaixo (PARKER, 1997).

$$Cu = 1 + Kn \left[1,246 + 0,42 \exp\left(\frac{-0,87}{Kn}\right) \right] \quad (2.5)$$

O fator de correção de Cunningham leva em conta a não-continuidade do meio para partículas que apresentam tamanho próximo ao caminho livre médio (λ). Para valores altos de Kn , que caracterizam o regime de moléculas livres, a correção de Cunningham não é satisfatória.

Algumas equações foram propostas com o intuito de definir a interação fluido-partícula para altos valores de Knudsen. Li & Wang (2003 a, b) examinaram as correlações existentes e desenvolveram uma nova equação para o coeficiente de arraste baseada na teoria de Chapman-Eskog e nos modelos de espalhamento difuso e especular. O resultado obtido está apresentado nas equações a seguir:

$$k_{d\infty} = \frac{8}{3} \sqrt{2\pi m_r K_B T} N (d_p/2)^2 \Omega_{med}^{(1,1)*} \quad (2.6)$$

sendo:

$$\Omega_{\text{med}}^{(1,1)*} = \varphi \Omega_d^{(1,1)*} + (1 - \varphi) \Omega_s^{(1,1)*} \quad (2.7)$$

$$\varphi = \frac{1 + 0,9 Kn \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{d_p / 2}{2,5} \right)^{15}} \right)}{1 + Kn} \quad (2.8)$$

$$\Omega_d^{(1,1)*} = 1 + \frac{\pi}{8} + \left[1,072 + \frac{2,078}{T^{*1/4}} + \frac{1,261}{T^{*1/2}} \right] \left(\frac{\sigma}{(d_p / 2)} \right) + \left[3,285 - \frac{8,872}{T^{*1/4}} + \frac{5,225}{T^{*1/2}} \right] \left(\frac{\sigma}{(d_p / 2)} \right)^2 \quad (2.9)$$

$$\Omega_s^{(1,1)*} = 1 + \frac{\pi}{8} + \left[0,316 + \frac{1,47}{T^{*1/4}} + \frac{0,476}{T^{*1/2}} \right] \left(\frac{\sigma}{(d_p / 2)} \right) + \left[1,53 - \frac{5,013}{T^{*1/4}} + \frac{4,025}{T^{*1/2}} \right] \left(\frac{\sigma}{(d_p / 2)} \right)^2 \quad (2.10)$$

$$T^* = \frac{K_B T}{\varepsilon'} \quad (2.11)$$

$$\varepsilon' = 2\pi\varepsilon \frac{\sigma^3}{3V} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_g \varepsilon_p} \quad (2.13)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_g + \sigma_p}{2} \quad (2.14)$$

$$V = \frac{\bar{M}}{\rho_p} \quad (2.15)$$

$$m_r = \frac{m_g m_p}{m_g + m_p} \quad (2.16)$$

nas quais, m_g é a massa do gás; m_p é a massa partícula; K_B é a constante de Boltzmann; σ é o diâmetro característico para o potencial de Lennard-Jones 12-6; d_p é o diâmetro da partícula, ε é a energia característica para o potencial de Lennard-Jones 12-6; \bar{M} é a massa atômica da partícula; T é a temperatura absoluta; N é a densidade do gás em número.

O diâmetro característico da molécula (σ), frequentemente denominado como diâmetro de colisão e a energia característica de interação entre as moléculas (ε), que é a energia máxima de atração entre duas moléculas, podem ser obtidos, de acordo com Bird et al. (2004), a partir das equações:

$$\sigma = 1,222 V_m^{\frac{1}{3}} \quad (2.17)$$

$$\varepsilon = 1,92 T_m \quad (2.18)$$

nas quais, σ é dado em Angström; ε é dado em (K); T_m é a temperatura de fusão (K); V_m é o volume específico do sólido no ponto de fusão (cm^3/mol).

A equação obtida por Li e Wang (2003 a, b) é válida apenas para o regime de moléculas livres. Para a região de transição entre este regime e o contínuo ($0,25 \leq Kn \leq 10$), os autores propõem uma aproximação semi-empírica, inserindo uma função na equação anterior de modo que, para baixos valores de Knudsen (Equação 2.19 e 2.20) α' tende a zero e a equação se torna igual à de Stokes. Por outro lado, para altos valores de Kn , α' tende a infinito e a equação se torna a equação original proposta pelos autores. Na determinação de α' foi empregada uma constante w igual a 1,143, determinada a partir de um ajuste da equação aos dados de Millikan (LI e WANG, 2003 a, b).

$$k_d = \frac{\alpha'}{(1 + \alpha'^w)^{1/w}} k_{d\infty} \quad (2.19)$$

$$\alpha' = \frac{9\sqrt{2}\pi\mu}{8\Omega_{\text{med}}^{(1,1)*}\sqrt{m_r K_B T N r_p}} \quad (2.20)$$

2.5 Precipitador Eletrostático

O precipitador eletrostático é um dos dispositivos mais comuns para controle de material particulado. Comercialmente é utilizado por quase um século para controlar as emissões de cinzas de caldeiras, incineradores e muitos processos industriais, como por exemplo, fabricação de cal, cimento, papel e processamento e produção de ácidos. Possui vantagens quando comparado com outros equipamentos da mesma categoria, pois opera a elevadas temperaturas, atinge alta eficiência de coleta das partículas, possui baixa perda de carga e baixo custo de manutenção (KIM et al., 2001; PARKER, 2003). Outra importante aplicação é na recuperação de produtos de alto valor agregado dispersos no aerossol e na coleta de partículas nanométricas geradas na forma de aerossóis para aplicação industriais.

O princípio de operação de um precipitador eletrostático consiste no fornecimento de carga elétrica a partícula, que ocorre através da ionização do gás pelo efeito corona, e então as partículas carregadas são submetidas a um campo elétrico de modo que sua velocidade de migração eletrostática cause a coleta das mesmas sobre uma placa aterrada, onde perdem suas cargas e a camada de pó formada é removida do sistema para posterior descarte.

A taxa de migração das partículas carregadas para os eletrodos de coleta é função do seu tamanho, da magnitude da carga na partícula, da intensidade do campo elétrico e do fluxo gasoso (DULLIEN, 1989).

Há basicamente dois tipos de precipitadores eletrostáticos encontrados na prática: o simples estágio, onde o processo de carregamento e a migração das partículas para a placa coletora ocorrem em uma única etapa e o duplo estágio, onde as partículas são carregadas na primeira seção e removidas na seção seguinte, conforme ilustra a Figura 2.2.

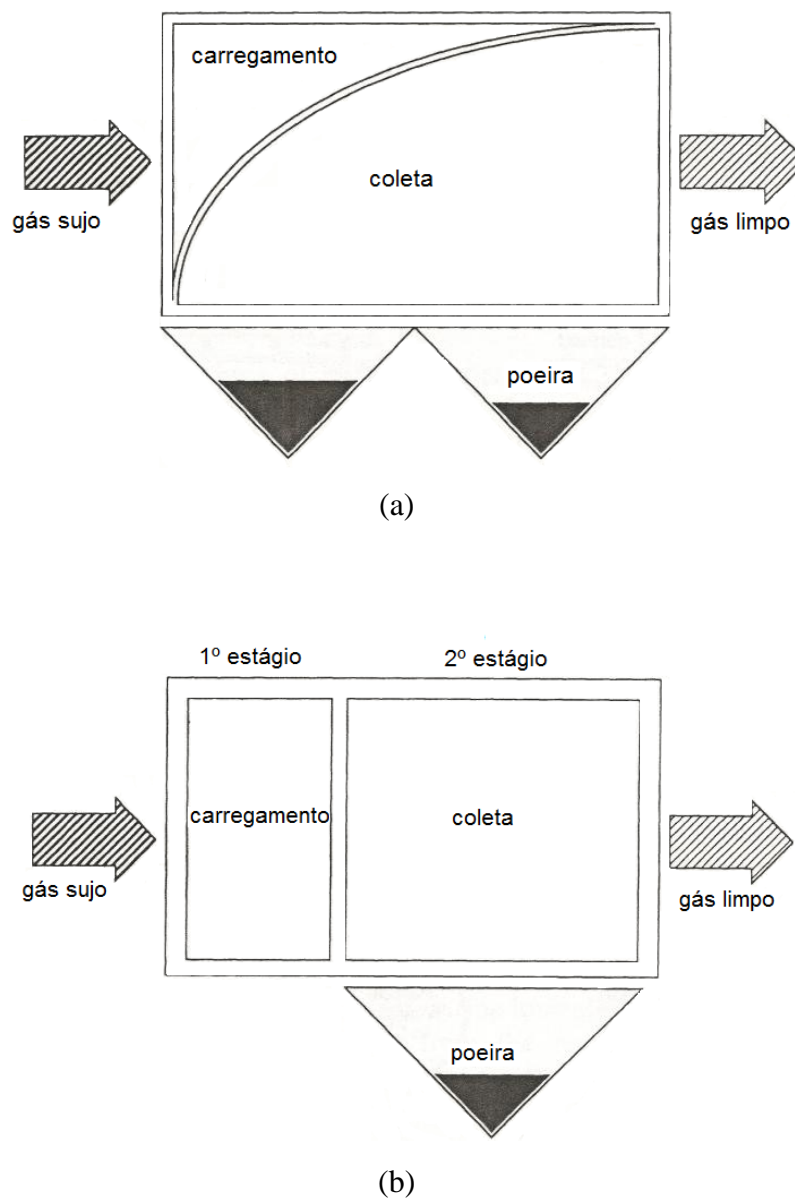


Figura 2.2 – Tipos de precipitadores: (a) simples estágio; (b) duplo estágio (PARKER, 1997).

O precipitador de estágio simples apresenta a vantagem de minimizar a ressuspensão das partículas já coletadas (MIZUNO, 2000) e o duplo estágio um maior tempo de carregamento da partícula e menor propensão ao fenômeno denominado corona reversa (FALAGUASTA, 2005). A configuração de duplo estágio é utilizada em aplicações de pequena escala, como tecnologia de salas limpas (PARKER, 1997).

Em precipitações eletrostáticas de simples estágio existem duas principais configurações: placa-fio e tubo-fio, apresentados na Figura 2.3.

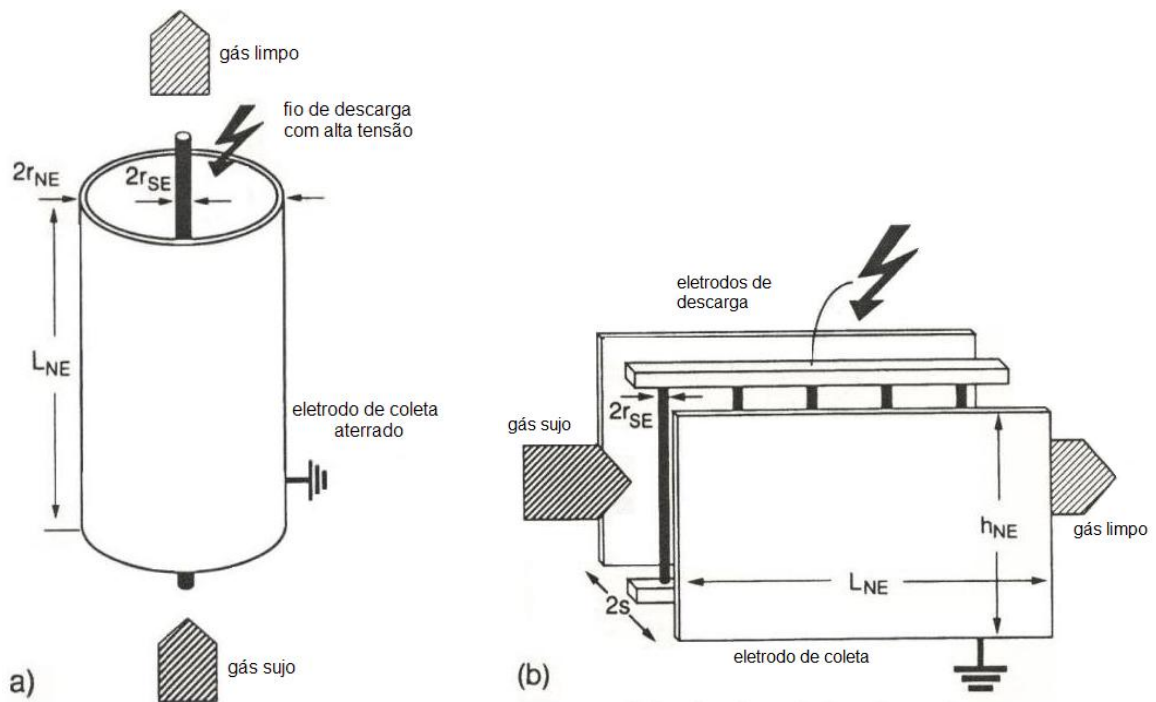


Figura 2.3 – Modelos de precipitadores eletrostáticos:

(a) tubo-fio; (b) placa-fio (PARKER, 1997).

Em precipitadores eletrostáticos do tipo tubo-fio o eletrodo de descarga e o tubo são orientados ao longo do eixo gravitacional e, na maioria das atuais aplicações, as placas de coleta são limpas através de um filme líquido aplicado na superfície do tubo.

Em precipitadores do tipo placa-fio uma fila de fios de descarga, orientados ao longo do eixo gravitacional, são posicionados entre placas de coleta formando um duto. As partículas são depositadas nas placas coletoras devido às forças, elétrica e de Van der Waals. As placas são limpas por impacto mecânico e as partículas depositadas em reservatórios para descarte.

2.5.1 Ionização do Gás

A descarga corona está entre as técnicas mais comuns para produzir altas concentrações de íons. Foram realizados numerosos estudos no passado e esta foi usada em muitas aplicações industriais, tais como revestimentos e precipitações eletrostáticas.

A descarga corona é uma descarga elétrica que ocorre entre dois eletrodos quando submetidos a uma alta diferença de potencial. O campo elétrico de alta intensidade, obtido pela aplicação de altos potenciais ao eletrodo de descarga, é necessário para a produção de grande quantidade de íons em fase gasosa.

O fenômeno da descarga corona depende da presença de elétrons e íons positivos no gás, que iniciam o movimento sob a influência de um campo elétrico. Se o campo elétrico é muito forte, o que acontece perto do fio com um pequeno raio de curvatura, os elétrons livres são acelerados a velocidades suficientes para colidirem violentamente com moléculas do gás, formando um íon positivo e outro elétron livre. Este outro elétron livre pode ser acelerado a uma velocidade suficiente para causar outro impacto ionizante. Este processo causa uma avalanche de elétrons, pois é repetido muitas vezes, resultando na produção de grande quantidade de elétrons livres e íons positivos na região da descarga corona (DULLIEN, 1989).

A descarga corona pode ser tanto positiva como negativa. Na corona negativa, os elétrons produzidos migram em direção ao eletrodo de coleta (placas aterradas) e os íons positivos em direção ao eletrodo de descarga (fio), que é responsável pela realimentação de elétrons no processo de ionização. Este processo pode ocorrer de dois modos: liberação de elétrons do eletrodo de descarga por colisão de íons positivos com o mesmo e por efeito fotoelétrico, devido à ação da radiação ultravioleta emitida.

Na corona positiva, os elétrons produzidos são atraídos para o fio e os íons positivos para o eletrodo de coleta. O fio serve apenas como eletrodo de coleta para os elétrons, não tendo função de ionização. Portanto, a corona positiva é um processo inteiramente gasoso, com a ionização ocorrendo através da liberação fotoelétrica de elétrons das moléculas do gás (WHITE, 1963 apud NÓBREGA, 2002).

A descarga corona apresenta duas zonas distintas: a zona ativa, que é composta por íons positivos e negativos, elétrons livres e moléculas e a zona passiva, onde ocorre o carregamento das partículas (Figura 2.4).

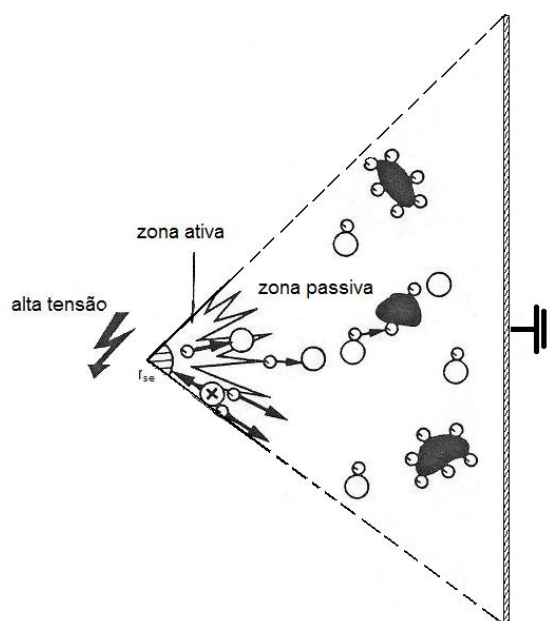


Figura 2.4 – Princípio do efeito corona.

2.5.2 Carregamento das Partículas

O mecanismo de carregamento das partículas pelo efeito corona varia com o tamanho das mesmas, as maiores que $0,5 \mu\text{m}$ em diâmetro são predominantemente carregadas por bombardeamento também conhecido como carregamento por campo e as partículas menores são carregadas por difusão (WHITE, 1963 apud DULLIEN, 1989).

Segundo Intra (2009), Hinds (1999) e Parker (1997), para partículas micrométricas ($>1 \mu\text{m}$) o carregamento por campo é dominante e para partículas ultrafinas ($<0,1 \mu\text{m}$) o carregamento por difusão é predominante. As partículas entre essa faixa de tamanho apresentam variação no processo de carregamento.

No carregamento por campo os íons se deslocam ao longo das linhas de força entre os eletrodos de descarga e coleta, e o rápido movimento dos mesmos gera freqüentes

colisões com as partículas descarregadas, o que resulta em fornecimento de carga as partículas. Quando uma partícula esférica descarregada é colocada em um campo elétrico uniforme, ela distorce o campo, como mostrado na Figura 2.5a.

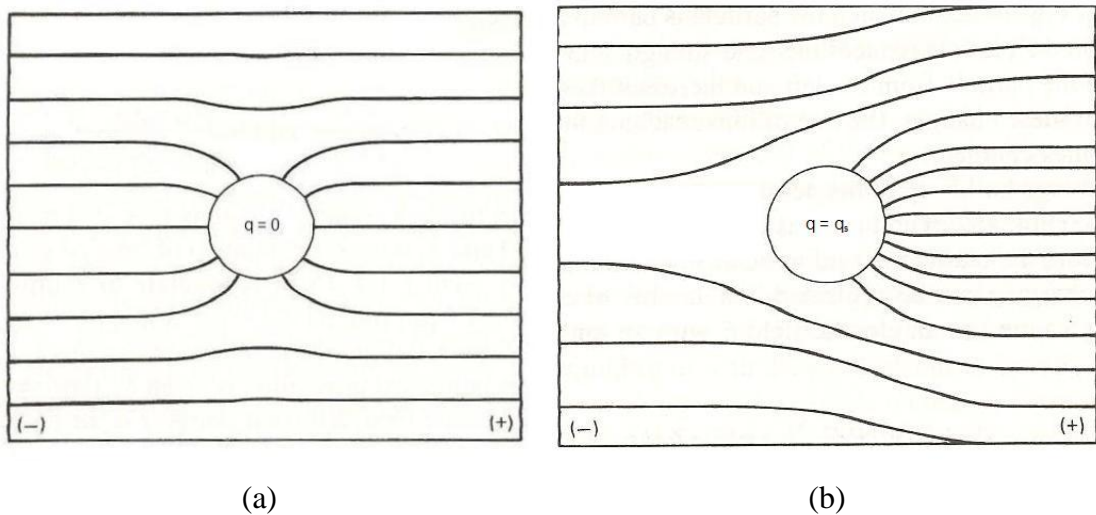


Figura 2.5 – Linhas do campo elétrico (a) partícula descarregada; (b) partícula com carga de saturação (HINDS, 1999)

As linhas do campo mostrados representam as trajetórias de íons. O grau de distorção do campo depende da constante dielétrica do material e da carga da partícula.

Há um ponto em que a partícula adquire carga de forma que as linhas do campo não convergem mais sobre a mesma e conseqüentemente os íons não a atingem mais, Figura 2.5b. Esta condição de carga máxima é chamada de carga de saturação.

O carregamento por difusão é resultado do impacto, que é causado pelo movimento térmico dos íons e partículas.

A carga adquirida pela partícula pode ser calculada pela equação de Cochet (PARKER, 1997):

$$Q_p^\infty = \left\{ \left(1 + 2\lambda / d_p \right)^2 + \left(\frac{2}{1 + 2\lambda / d_p} \right) \cdot \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \right\} \pi \epsilon_0 d_p^2 E \quad (2.21)$$

na qual, Q_p^∞ é a carga da partícula na saturação, λ é o caminho livre médio das moléculas, d_p é o diâmetro da partícula, ε_r é a constante dielétrica da partícula, ε_0 é a permissividade elétrica do vácuo e E é o campo elétrico aplicado.

Segundo Intra (2009), a eficiência do carregamento é função do tamanho das partículas, da descarga corona e da vazão do aerossol. A eficiência de carregamento aumenta com o diâmetro da partícula e decresce com o aumento da vazão do aerossol. O autor afirma que normalmente a descarga corona tem pouca eficiência de carregamento para partículas ultrafinas ($d_p < 20$ nm), pois devido à elevada concentração de íons necessários para um eficiente carregamento por difusão é necessário um elevado campo elétrico para carregar as partículas do aerossol.

2.5.3 Campo Elétrico

O campo elétrico é o responsável pelo carregamento das partículas no processo de precipitação eletrostática. O campo formado entre os eletrodos de descarga e de coleta depende da aplicação de uma diferença de potencial elétrico e da existência de íons e partículas carregadas entre os eletrodos (OGLESBY e NICHOLS, 1978 apud FALAGUASTA, 2005).

O campo elétrico (E) é de difícil determinação, pois depende de fatores desconhecidos como o escoamento dos íons e das partículas carregadas e a influência destes sobre o campo elétrico. Devido à dificuldade de determinação do campo elétrico real no precipitador, utiliza-se a Equação 2.22 (RIEHLE, 1997), onde o campo elétrico é o campo formado entre eletrodos compostos por placas paralelas, podendo ser uma aproximação para um precipitador do tipo placa-fio. O campo elétrico é considerado constante em todo o precipitador e denominado campo pseudo-homogêneo (E_{ps}).

$$E_{ps} = \frac{V}{s} \quad (2.22)$$

onde, V é a tensão aplicado e s é a distância entre o eletrodo de descarga e o eletrodo de coleta.

Quando o potencial aplicado ao eletrodo de descarga atinge determinado valor (V_0), uma corrente elétrica entre os eletrodos de descarga e de coleta é gerada, indicando o início da descarga corona. O aumento do potencial aplicado causa um aumento da corrente, até que se atinge um potencial crítico (V_{cr}), onde ocorre o rompimento elétrico do gás. A relação corrente-potencial é mostrada na Figura 2.6.

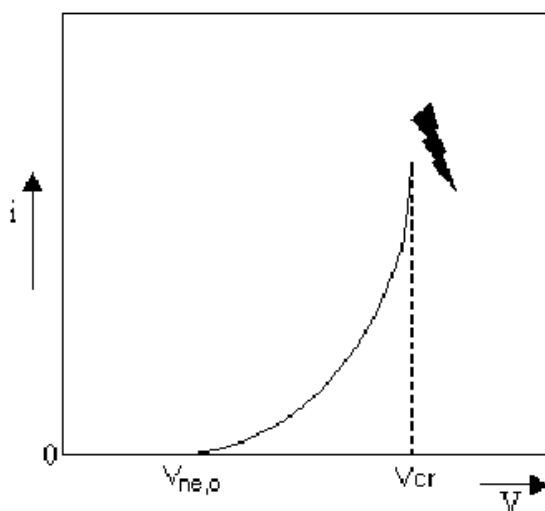


Figura 2.6 – Relação típica corrente-tensão (RIEHLE, 1997).

A diferença de potencial depende da configuração do precipitador, sendo função do raio do eletrodo de descarga (r_{se}), do espaçamento entre os eletrodos de descarga ($2c$) e da distância entre as placas de coleta ($2s$) (RIEHLE, 1997).

A relação corrente-tensão pode ser alterada pela concentração de partículas (WHITE, 1963 apud FALAGUASTA, 2005), pelo formato do eletrodo de descarga (JEDRUSIK et al., 1998) e pelo espaçamento entre eles (MILLER et al., 1998).

2.5.4 Velocidade de Migração das Partículas

Sob a influência de um campo eletrostático, uma partícula migrará em direção a placa coletora com uma velocidade dependente da magnitude da força elétrica e da força de arraste do gás sobre a mesma (OGLESBY e NICHOLS, 1978 apud FALAGUASTA, 2005). Um balanço de forças sobre uma partícula num precipitador eletrostático, considerando válida a lei de Stokes e admitindo-se que a partícula atingiu sua carga de saturação, fornece a velocidade teórica de migração (w_{th}):

$$w_{th} = \frac{Q_p^\infty E C u}{3 \pi \mu d_p} \quad (2.23)$$

na qual, Q_p^∞ é a carga da partícula na saturação, E é o campo elétrico, $C u$ é o fator de correção de Cunningham, μ é a viscosidade dinâmica do gás e d_p é o diâmetro da partícula.

2.5.5 Eficiência de Coleta para Precipitadores Eletrostáticos

A eficiência de coleta em função do diâmetro das partículas para um precipitador eletrostático apresenta um ponto mínimo, conforme mostra a Figura 2.7.

Esse ponto de mínimo ocorre para diâmetros entre 0,1 e 1 μm porque a velocidade teórica de migração é proporcional a carga das partículas, que aumenta com o tamanho das mesmas, e ao fator de correção de Cunningham, que apresenta valores altos para as partículas pequenas e tende a 1 para as partículas maiores (MIZUNO, 2000). A maior eficiência de remoção para as partículas mais finas também se justifica pela alta mobilidade elétrica que compensa a baixa carga das mesmas (FLAGAN e SEINFELD, 1988).

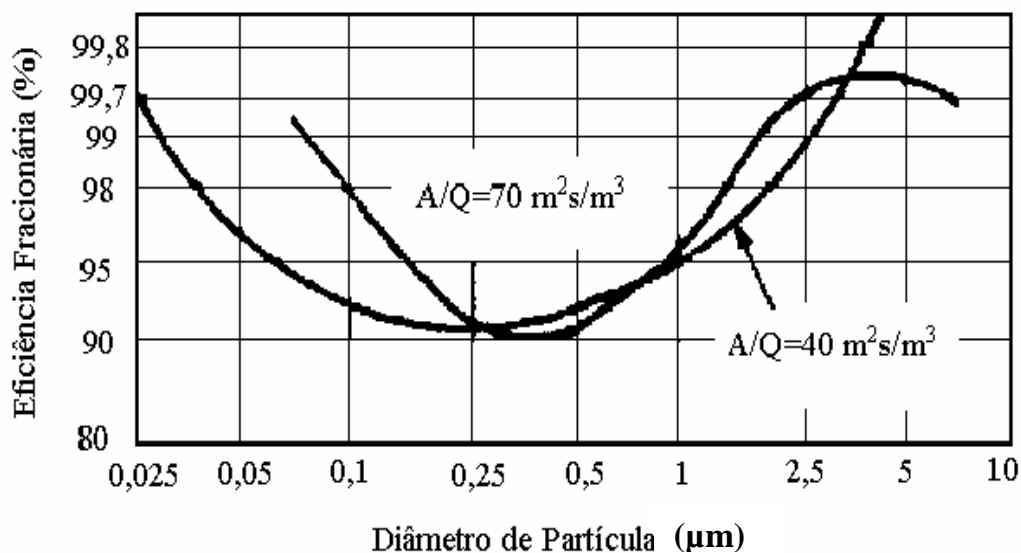


Figura 2.7 – Eficiência de coleta em função do diâmetro das partículas para diferentes áreas específicas de coleta (MIZUNO, 2000).

Para determinação da eficiência de coleta de um precipitador eletrostático, pode-se utilizar a equação de Deutsch-Anderson (1922):

$$\eta_{dpi} = 1 - \exp\left(-\frac{w_{th} L_{ne}}{v s}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{w_{th} A_{ne}}{Q}\right) \quad (2.24)$$

em que η_{dpi} é a eficiência de coleta das partículas de diâmetro d_{pi} , L_{ne} é o comprimento do precipitador eletrostático, v é a velocidade do gás, s é a distância entre o eletrodo de descarga e de coleta, A_{ne} é área de coleta do precipitador e Q é a vazão volumétrica.

Embora a equação de Deutsch-Anderson seja amplamente utilizada para a concepção de precipitadores eletrostáticos, a mesma assume que as partículas estão uniformemente distribuídas no início e que a velocidade de deslocamento é constante (STRAUSS, 1975).

Outros pesquisadores tentaram explicar o processo de difusão das partículas e a força eletrostática no precipitador eletrostático. Kim et al. (2001), Cooperman (1984)

considerou a re-entrância da partícula e os efeitos da mistura turbulenta longitudinal. Leonard et al. (1980) considerou o coeficiente de difusão turbulento finito, e Zhibin e Guoquan (1992) o perfil de velocidade do ar não-uniforme e o coeficiente de mistura turbulenta. Dessa forma, novos modelos para determinação da eficiência foram desenvolvidos.

O modelo desenvolvido por Zhibin e Guoquan (1992) que insere a influência da turbulência é apresentado a seguir:

$$\eta_{dpi} = 1 - \frac{\sqrt{Pe}}{2 \cdot s \cdot \sqrt{\pi} \cdot De} \int_0^s \exp \left[-\frac{Pe}{4 \cdot De} \left(\frac{y}{s} - De \right)^2 \right] dy \quad (2.25)$$

$$De = \frac{w_{th} \cdot L_{ne}}{v \cdot s} \quad (2.26)$$

$$Pe = \frac{w_{th} \cdot s}{D_{pi}} \quad (2.27)$$

na qual, De é o número de Deutsch; Pe é o número de Peclet; D_{pi} é a difusividade da partícula (m^2/s).

2.6 Desempenho de Precipitadores Eletrostáticos na Remoção de Nanopartículas

Devido às novas aplicações das nanopartículas há um aumento dos estudos sobre a aplicação de precipitadores eletrostáticos na remoção de tais partículas das correntes gasosas. Será apresentado a seguir um breve resumo de alguns trabalhos que utilizam o precipitador eletrostático para remoção das partículas finas.

Kanazawa et al. (1993), Watanabe et al. (1995), Laitinen et al. (1996) e Lackowski (2001) estudaram a aglomeração das partículas como meio de aumentar a remoção das partículas pelo precipitador. Os autores observaram um crescimento das partículas que

chegou a dobrar o diâmetro médio das mesmas e conseqüentemente gerou um aumento da eficiência de coleta.

Huang e Chen (2001) avaliaram a influência da polaridade da corona e o efeito da vazão na remoção de partículas de 30 nm a 10 μ m, os autores observaram que a polaridade negativa possui uma penetração de partículas bem menor que a positiva para toda a faixa de tamanho estudada, conseguindo eficiências maiores que 90% para a remoção de partículas nanométricas.

Os mesmos autores em 2002 estudaram como os parâmetros, incluindo o tamanho de partícula, vazão e a voltagem do eletrodo de descarga, afetam na penetração de partículas monodispersas (tamanhos entre 10 e 60 nm) em precipitadores de 1 e 2 estágios. Os resultados mostraram que a penetração para o simples estágio aumenta para partículas inferiores a 20 nm e no duplo estágio a penetração é maior para partículas inferiores a 50 nm. Os autores concluíram que é mais econômico utilizar precipitadores de simples estágio para coletar partículas menores que 16 nm, levando em consideração o consumo de energia e para coletar partículas maiores que 16 nm é mais econômico utilizar precipitadores de duplo estágio.

Falaguasta (2005) avaliou a influência dos parâmetros de operação e de projeto na eficiência de remoção de partículas submicrométricas ($PM_{2,5}$) e nanométricas (8 a 100 nm) por um precipitador eletrostático do tipo placa-fio. Para as partículas submicrométricas, os parâmetros de projeto analisados foram comprimento do duto, diâmetros dos eletrodos de descarga e espaçamento entre eles. As variáveis de operação foram o campo elétrico e a velocidade de escoamento do gás. Para as partículas nanométricas, avaliou-se o comprimento do duto, a relação $s/2c$ e a distância entre as placas de coleta e as variáveis de operação foram velocidade e densidade de corrente. Seus resultados mostraram alta eficiência de remoção, inclusive para partículas nanométricas. A eficiência fracionária elevou-se com o decréscimo do diâmetro das partículas, até aproximadamente 20 nm, após esse ponto ocorreu uma queda da eficiência, que a autora atribuiu ao baixo carregamento das partículas. O aumento da velocidade do gás, o menor comprimento das placas coletoras e a diminuição da corrente gerada causaram uma diminuição da eficiência. Por outro lado, o maior espaçamento entre as placas gerou um aumento da eficiência. E a relação $s/2c$ não apresentou uma tendência clara na remoção do material particulado. A autora avaliou modelos presentes na literatura para

ajustes aos dados experimentais, o modelo que melhor se ajustou foi o modelo clássico de Deutsch.

Tepper e Kessick (2008) construíram e testaram precipitadores eletrostáticos incorporando uma série de *electrospray*. A ionização das partículas e a eficiência de coleta foram medidas, independentemente, para partículas aerotransportadas em função da vazão do ar, magnitude do campo elétrico e tamanho das partículas (0,3; 0,5 e 5 μm). Os resultados mostraram eficiências próximas a 100% para a vazão de 21,6 l/min e aplicação de potencial de -13 kV para os diâmetros de 0,3 e 0,5 μm e com aplicação de potencial de -8 kV para o diâmetro de 5 μm . Os testes indicaram o número de cargas elementares depositadas em uma dada partícula depende fortemente do diâmetro da partícula e para partículas submicrométricas é muito baixo. Para uma alta eficiência global de coleta das partículas é necessário um projeto cuidadoso da região de precipitação, onde o tempo máximo de coleta das partículas deve ser menor que o tempo de residência destas no precipitador.

Sillanpää et al. (2008) desenvolveram um novo sistema para coletar partículas para estudos *in vitro*. O sistema era composto por um concentrador de partículas e por um precipitador eletrostático. O desempenho do precipitador foi avaliado com aplicação de descarga corona positiva, com partículas monodispersas de poliestireno e com partículas polidispersas de sulfato de amônio e ácido glutárico. A intensidade do campo elétrico otimizado para a vazão de 1,8 l/min foi de 5,3 kV/cm. A otimização foi baseada no equilíbrio entre alta eficiência de remoção com baixa produção de ozônio. Os testes laboratoriais com diferentes tipos de materiais mostraram que a eficiência de coleta do precipitador não depende significativamente da composição das partículas. A eficiência de coleta sob condições otimizadas foi superior a 95% para todos os diâmetros medidos (18 nm a 3 μm) e a perda de partículas dentro do equipamento foi insignificante (< 1%). Foi demonstrado que o precipitador eletrostático não tem efeito nocivo sobre a viabilidade celular durante 2 horas de exposição da célula.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar o desempenho de um precipitador eletrostático do tipo placa-fio na remoção de nanopartículas de aerossóis, foi projetada e construída uma unidade experimental que simulava a contaminação de partículas nanométricas polidispersas de cloreto de sódio (NaCl) em uma corrente de ar puro. Esse aerossol gerado passava pelo precipitador eletrostático para remoção das partículas e análise do desempenho do equipamento.

Para realização dos experimentos a unidade experimental foi planejada e montada, integrando os módulos e equipamentos necessários para a execução dos testes experimentais.

A Figura 3.1 apresenta uma representação gráfica da unidade experimental, vista em perspectiva, construída para a realização dos testes. Os componentes que constituem a unidade experimental estão descritos nas seções seguintes.

3.1 Componentes da Unidade Experimental

3.1.1 Compressor de Ar

O compressor de pistão da marca Schulz, modelo MSV12/175, localizado na parte externa do laboratório, com capacidade de 120 psi, e isento de óleo de forma a evitar a contaminação da corrente gasosa, forneceu ar comprimido para a diluição das partículas nanométricas. Para este trabalho, a pressão estabelecida para o funcionamento do compressor foi de 110 psi. Antes de entrar no sistema o ar passava por um filtro coalescente e por uma coluna dessecante contendo sílica-gel, seguindo até uma válvula reguladora de pressão, situada no mesmo local em que estava a unidade experimental.

Legenda:

- 1 – Filtros de purificação de ar
- 2 – Gerador de nanopartículas
- 3 – Secador de difusão
- 4 – Fonte neutralizadora de Kriptônio
- 5 – Fonte de alta tensão
- 6 – Precipitador eletrostático
- 7 – Fonte neutralizadora de Amerício
- 8 – Classificador eletrostático
- 9 – Contador de partículas ultrafinas

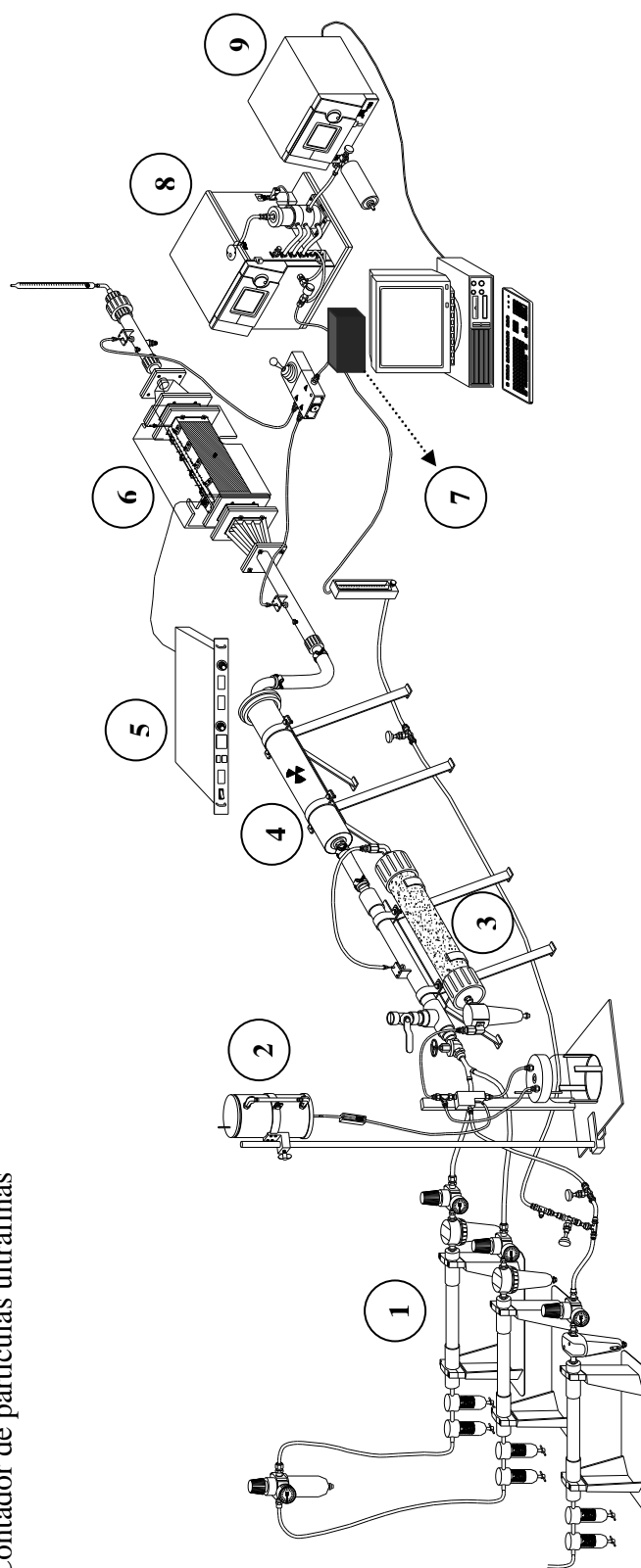


Figura 3.1 – Unidade experimental

3.1.2 Filtros de Purificação de Ar

Para obtenção de ar ultrapuro, o ar proveniente do compressor passava por dispositivos de purificação de ar, da marca TSI Incorporated (*Trust, Science, Innovation*) modelo 3074B (Figura 3.2).

Cada dispositivo de purificação de ar era formado por um conjunto de três filtros e um sistema de membranas. Esses dispositivos removiam óleos ou outras gotículas presentes no ar utilizando dois pré-filtros, eliminavam qualquer umidade remanescente pela passagem do ar através de membranas e retiravam partículas finas pela inclusão de um filtro de alta eficiência na saída.



Figura 3.2 – Filtros de purificação.

3.1.3 Geradores de Partículas

3.1.3.1 Gerador de Partículas Nanométricas – DEQ-UFSCar

O Gerador de Partículas Nanométricas – DEQ-UFSCar, apresentado na Figura 3.3, foi projetado e construído nas dependências do DEQ/UFSCar.

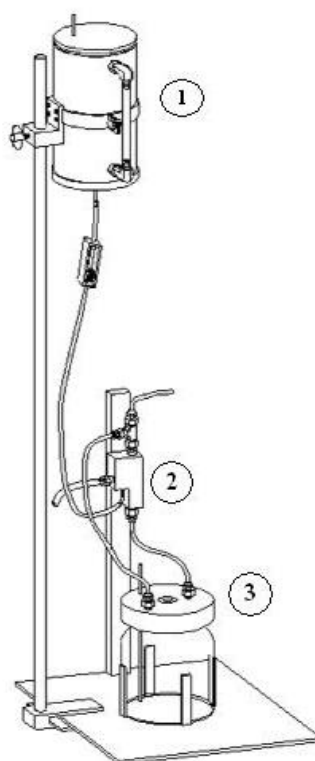


Figura 3.3 – Gerador de Partículas Nanométricas – DEQ-UFSCar: (1) Reservatório de armazenamento da solução, (2) Bico Atomizador e (3) Recipiente para coleta do excesso de líquido.

O gerador era do tipo gerador atomizador composto por:

1. Reservatório de armazenamento da solução: frasco de Mariotte de 20 cm de diâmetro interno, com um tubo de pequeno diâmetro interno no interior do frasco que perfurava a tampa rosqueada do frasco e era introduzido até próximo à sua base, o que permitia que o escoamento ocorresse sob condições de vazão constante. Conforme o líquido escoava por gravidade, bolhas de ar eram introduzidas no frasco através do tubo garantindo a pressão constante. O frasco, de volume de 2 L, era constituído por um tubo de PVC e possuía uma borracha de vedação, do tipo *o'ring*, que garantia o isolamento do sistema fechado. Um tubo metálico de 2 mm de diâmetro interno foi embutido cerca de 2 cm acima do centro da base do frasco para a retirada da solução no interior do mesmo. A conexão do frasco com o bico atomizador foi feita por uma mangueira de silicone de diâmetro interno de 2 mm. O frasco foi posicionado em um nível vertical mais elevado em relação ao bico atomizador.

2. Bico atomizador: o ar comprimido penetrava no sistema e era imediatamente acelerado no exato ponto em que a solução era alimentada. A solução era então atomizada em direção a uma câmara de sessão circular transversal de 1,27 cm de diâmetro. Assim, com a evaporação do líquido, o soluto contido nas gotas se cristalizava em partículas que seguiam o fluxo de ar principal, saindo pelo topo do atomizador. Grandes gotas eram removidas por impactação inercial na parede da câmara onde ocorria a atomização. O excesso de líquido escoava por gravidade através de uma mangueira de diâmetro interno de 0,5 cm para um recipiente fechado, no qual era armazenado. O bico atomizador (Figura 3.4) foi construído de acordo com as dimensões propostas no trabalho de Liu e Lee (1975). Suas dimensões eram as seguintes: 7,62 cm de comprimento e os pontos de entrada da solução e aceleração do ar comprimido possuíam diâmetro de aproximadamente 0,0625 cm.

3. Recipiente para coleta do excesso de líquido: frasco de vidro de 3 L de volume com tampa de PVC vedada com o'ring. Uma mangueira fazia a ligação entre o recipiente e a saída lateral de um conector metálico no topo do atomizador, do tipo *by-pass*, de forma que as pressões nos dois pontos se igualassem e, assim, o aerossol seguisse pelo canal preferencial, conduzindo as nanopartículas em suspensão.

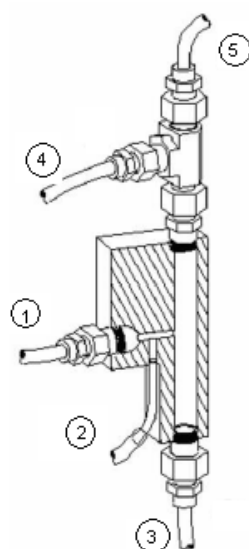


Figura 3.4 – Bico atomizador: (1) Entrada de ar comprimido, (2) Alimentação da solução, (3) Drenagem de líquido em excesso, (4) Ponto de igual pressão do frasco de líquido drenado e (5) Canal condutor do aerossol.

3.1.3.2 Gerador Atomizador da TSI

O gerador atomizador da TSI, modelo 3079, apresentado na Figura 3.5, utiliza um atomizador de ar comprimido com um bico de injeção de fluxo duplo de aço inoxidável para produzir aerossóis polidispersos.



Figura 3.5 – Gerador atomizador da TSI, modelo 3079.

A Figura 3.6 mostra o esquema de funcionamento do gerador, onde um compressor integrado fornece o ar comprimido necessário e um fluxímetro com uma válvula agulha permite ao usuário definir a vazão.

O ar comprimido passa por um filtro de alta eficiência, onde os contaminantes são removidos do fluxo de ar, que é expandido através do bico atomizador, produzindo um jato de alta velocidade. As gotas maiores, resultantes do processo de atomização, são removidas por impactação inercial na própria parede do atomizador, o que leva a uma dimensão das partículas resultantes predominantemente inferior a 1 μm .

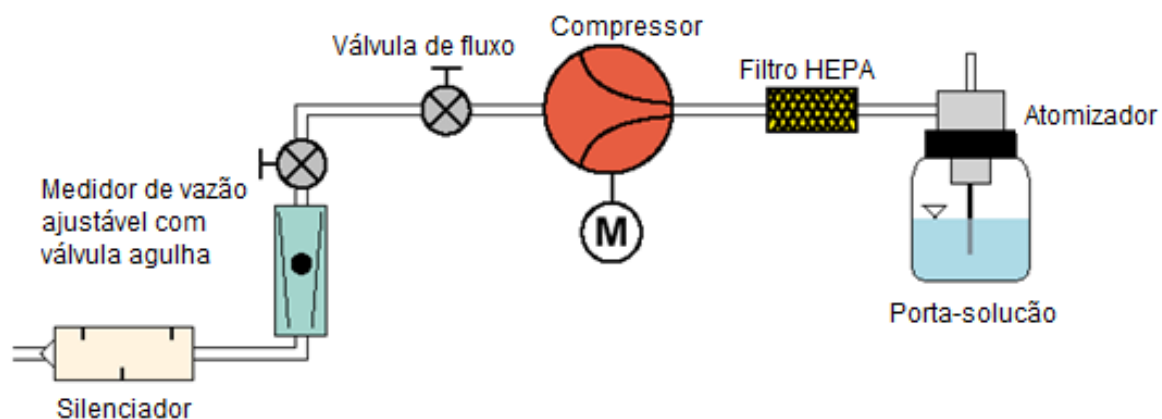


Figura 3.6 – Esquema do gerador atomizador TSI, modelo 3079 (www.tsi.com).

A vazão máxima de operação é 250 L/h, (\cong 4,2 L/min), sendo a vazão mínima igual a 1,0 L/min.

A concentração das partículas geradas é ajustada pela válvula, e decresce com a redução da vazão volumétrica do aerossol. O equipamento é capaz de gerar 10^8 partículas/cm³.

3.1.4 Solução para Geração do Aerossol

Para geração das partículas nanométricas foi utilizada solução de cloreto de sódio (NaCl) com concentração de 0,5 g/L.

Para o preparo da solução foi utilizado cloreto de sódio de pureza analítica da marca *Synth* e água deionizada, obtida com o uso do *Simplicity Ultrapure Water System*, da Millipore, que remove contaminantes remanescentes da água destilada através da filtração por resinas de troca iônica.

A Tabela 3.1 apresenta a densidade, a resistividade, obtida por Falaguasta (2005) e a constante dielétrica, obtida por Lide (1997), do cloreto de sódio.

Tabela 3.1 – Propriedades do cloreto de sódio

ρ_p (g/cm ³)	ρ (Ω .m)	ϵ_r
2,165	2.10^7	5,9

3.1.5 Secador por Difusão

O secador por difusão da marca TSI, modelo 3062, Figura 3.7, foi utilizado para remover a umidade remanescente do aerossol proveniente dos geradores.

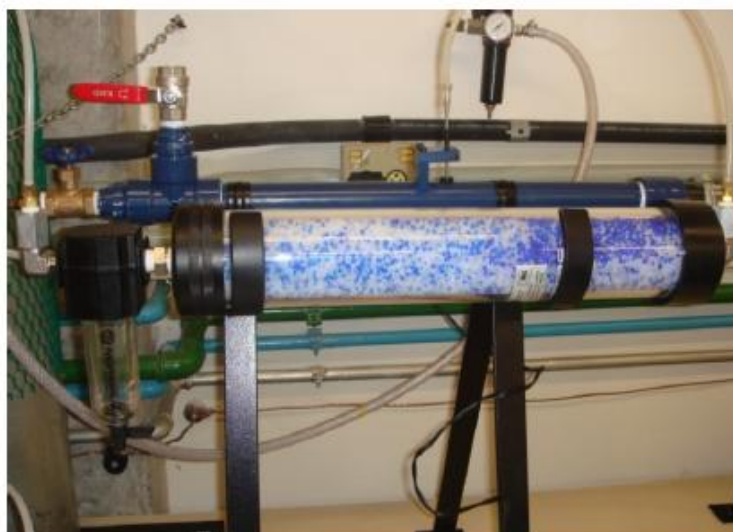


Figura 3.7 – Secador de difusão.

O secador inclui um extrator removível para coletar as gotas maiores de água e sua estrutura é composta por dois cilindros concêntricos, o externo é de acrílico e o interno é formado por uma tela de fio metálico.

O material dessecante (sílica-gel) em torno do fluxo dos aerossóis remove o excesso de umidade por difusão.

3.1.6 Fontes Neutralizadoras

O uso de fontes ionizantes assegurou a neutralização de eventuais cargas eletrostáticas presentes nas partículas geradas, uma vez que partículas eletrizadas apresentam maior probabilidade de serem depositadas nas paredes das tubulações e mangueiras, devido às forças eletrostáticas atuantes no sistema e também ocasionariam um resultado equivocado sobre a eficiência do precipitador eletrostático, visto que sua eficiência de coleta é dependente da carga da partícula.

Foram utilizadas duas fontes na unidade experimental. A fonte de Kriptônio 85 foi empregada logo após a passagem do aerossol pelo secador de difusão.

A fonte de Amerício 241, que estava acondicionada em uma caixa revestida de chumbo, foi instalada antes do aerossol seguir para análise no equipamento que mede a concentração e a distribuição de tamanhos das partículas (*Scanning Mobility Particle Sizer – SMPS*). Como o princípio de funcionamento do precipitador eletrostático se baseia no fornecimento de carga elétrica às partículas, estas podem adquirir cargas insuficientes para serem coletadas e seguir o fluxo gasoso carregadas negativamente, portanto o uso da fonte de Amerício foi necessário, pois o SMPS se baseia em uma técnica de detecção por mobilidade elétrica, que está relacionada à habilidade das partículas em atravessar um campo elétrico e que, por sua vez, é diretamente proporcional ao número de cargas presentes nas mesmas.

3.1.7 Amostragem de Partículas

Para a amostragem das partículas antes e após o precipitador eletrostático, instalaram-se duas sondas coletoras no duto em que o aerossol escoava. As sondas metálicas possuíam 2 mm de diâmetro interno, eram curvadas em ângulo reto e foram alinhadas ao centro do duto. A Figura 3.8 esquematiza a disposição da sonda de amostragem no duto de escoamento do gás.

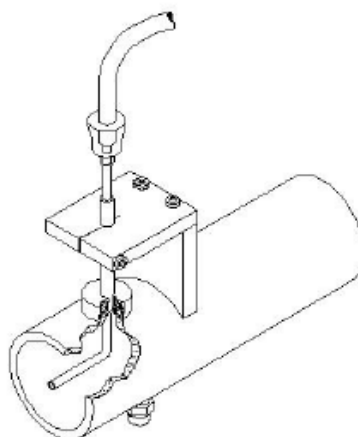


Figura 3.8 – Sonda de amostragem no duto de escoamento do aerossol.

As sondas instaladas a aproximadamente 30 cm do precipitador na unidade experimental permitiu a realização de amostragens do aerossol antes e após o equipamento, de forma a avaliar o seu desempenho. O duto de escoamento do gás no ponto de amostragem possuía diâmetro interno de 2,6 cm. As sondas eram conectadas a mangueiras de 0,5 cm de diâmetro interno que conduzia o aerossol amostrado a uma válvula de três vias, que foi empregada para garantir um acionamento alternado e imediato das amostragens antes e após o precipitador eletrostático. Desta forma, a seleção da amostragem requerida era realizada pelo acionamento manual da alavanca da válvula na posição correspondente à amostragem solicitada.

3.1.8 Medidor de Vazão

A vazão de escoamento do gás foi medida utilizando-se um rotâmetro da marca *Gilmont Instruments Inc.*, Modelo D7200-D7299, número 4, com esfera de vidro, acoplado na saída do sistema.

O controle da vazão na unidade foi feito por uma válvula do tipo agulha localizada na entrada do sistema, logo após os filtros de purificação de ar. Para ajuste fino da

vazão, colocou-se, na seqüência, um sistema de *by-pass* controlado por outra válvula do tipo agulha.

3.1.9 Medidor de Temperatura e Umidade

A temperatura e a umidade do sistema foram medidas no duto de saída de ar com um medidor termopar da marca Tri-Sense, modelo 37000-90 da Cole-Parmer Instruments.

3.1.10 Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (*Scanning Mobility Particle Sizer – SMPS*)

Para realização das medidas da concentração de partículas antes e após o precipitador eletrostático foi utilizado o Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (SMPS) da TSI, modelo 3936. O SMPS é composto pelo Classificador Eletrostático, da TSI, modelo 3080 acoplado a um Analisador de Mobilidade Diferencial (DMA) utilizado juntamente com o Contador de Partículas Ultrafinas (UCPC), modelo 3776 da TSI, ilustrados na Figura 3.9.



Figura 3.9 – SMPS: Classificador Eletrostático (à direita) e Contador de Partículas Ultrafinas (à esquerda).

O SMPS modelo 3936 mede partículas de 6 a 800 nm e tem a capacidade de medir um intervalo de concentração de 1 a 10^8 partículas/cm³. Permite ajustar a vazão da amostra, de 0,2 a 2,0 L/min, o que permite selecionar faixa de tamanho das partículas de interesses.

O SMPS pode ser configurado com dois tipos de DMA's: Long ou Nano. O Long-DMA, modelo 3081 da TSI, oferece uma classificação de partículas na faixa de 6 a 800 nm e o Nano-DMA, modelo 3085 da TSI, classifica partículas entre 2 e 165 nm.

Para medir a distribuição do tamanho de partículas o SMPS utiliza a técnica de detecção por mobilidade elétrica. O aerossol polidisperso e neutralizado pela fonte neutralizadora de Amerício 241 passa pelo impactador, localizado na entrada do SMPS, que remove as partículas maiores que o limite de detecção por impactação inercial. Sequencialmente, as partículas seguem para o DMA e são separadas de acordo com sua mobilidade elétrica, ou seja, de acordo com a sua habilidade em atravessar um campo elétrico no DMA. Uma estreita fração de partículas monodispersas sai do DMA através de uma pequena abertura em sua parte inferior e segue para o UCPC, que mede a concentração das partículas. A análise do aerossol amostrado é apresentada na forma de canais ou faixas de tamanhos de partículas e suas respectivas concentrações volumétricas. A Figura 3.10 mostra o princípio de funcionamento do DMA.

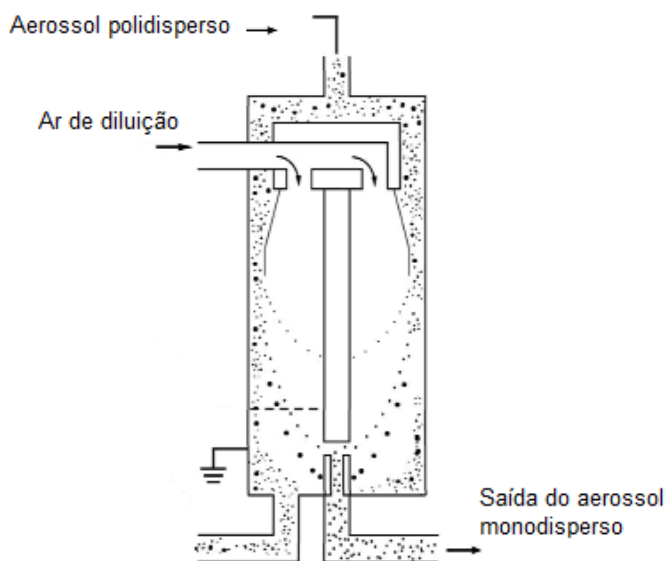


Figura 3.10 – Funcionamento do DMA.

O impactador (*Impactor Inlet*, Modelo 1035900 da TSI) pode ser configurado com três diâmetros de orifício, 0,0457, 0,0508 e 0,0710 cm. A combinação do diâmetro do orifício selecionado e a vazão do aerossol estabelecida dentro do SMPS determinam o diâmetro de corte (d_c) das partículas no impactador.

Os parâmetros que devem ser estabelecidos para o correto funcionamento do SMPS são a viscosidade do gás, a densidade da partícula, o tamanho do impactador, o modelo do DMA empregado, a vazão do aerossol amostrado (*aerosol flow*), a vazão de ar de diluição que é recirculada no interior do DMA (*sheath flow*) e os tempos *scan up* e *retrace*, equivalentes aos tempos de escaneamento para medidas de mobilidade elétrica.

De acordo com o manual da TSI (1933792, da TSI), deve-se constituir uma relação de proporção de 10:1 entre as vazões do ar de diluição no DMA e do aerossol amostrado, respectivamente. O equipamento permite que a vazão de aerossol amostrado possa ser ajustada em uma faixa compreendida entre 0 e 1,5 L/min.

O *scan up* é o tempo em que as partículas serão classificadas, em função da tensão no DMA, e contadas no UCPC. Durante o tempo de escaneamento, a tensão no DMA aumenta exponencialmente de forma a selecionar as faixas de tamanhos das partículas que serão medidas, em termos de concentração, no UCPC. O tempo de *retrace* é o período requerido para a tensão retornar ao seu valor inicial, possibilitando o início de um novo escaneamento. Também pode ser estabelecido o tempo de *break*, que é o período de espera entre um escaneamento e outro. A seleção adequada destes parâmetros é determinante para um bom desempenho do equipamento ao analisar o aerossol.

3.1.11 Fonte de Alta Tensão

A fonte da Spellman, modelo SL 1200, foi utilizada para a realização dos ensaios, fornecendo tensão contínua e estava configurada para gerar corrente corona negativa. A fonte tem faixa de operação que varia de 0 a 50 kV para tensão e de 0 a 20 mA para corrente, podendo produzir corrente corona positiva e negativa.

3.1.12 Precipitador Eletrostático

O equipamento utilizado para a remoção de nanopartículas do aerossol, e análise do seu desempenho nesta operação foi o precipitador eletrostático do tipo placa-fio de um único estágio, conforme ilustrado na Figura 3.11.

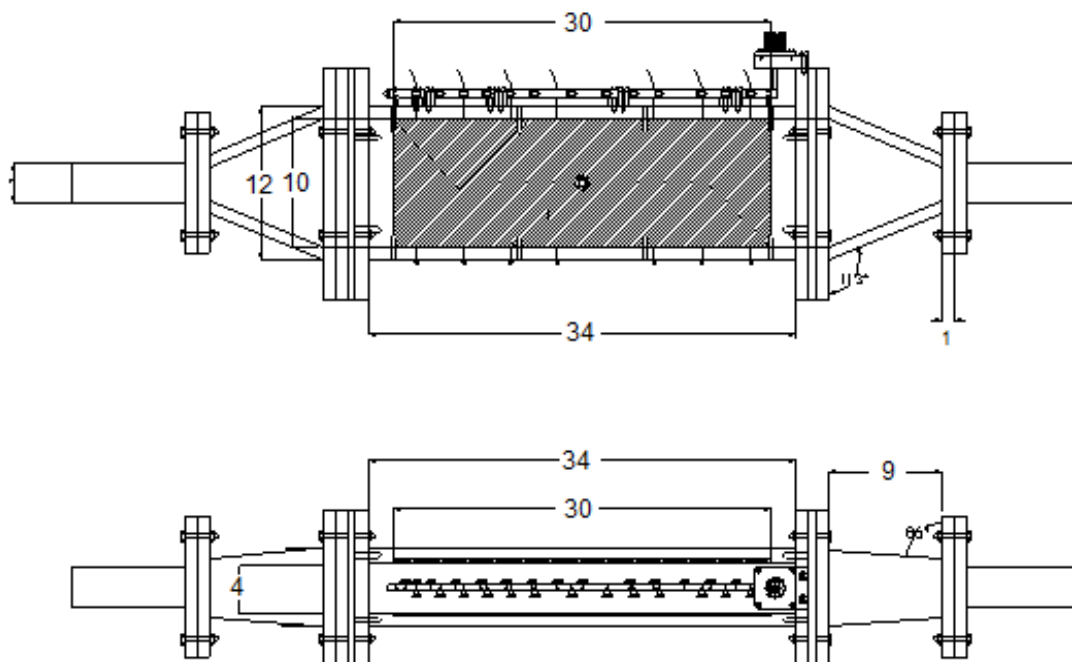


Figura 3.11 – Vista lateral e superior do precipitador eletrostático com dimensões (cm).

As dimensões do precipitador eletrostático: comprimento (L_{ne}), altura (h_{ne}), distância entre as placas de coleta ($2s$), diâmetro dos eletrodos de descarga ($2r_{se}$), espaçamento entre os eletrodos de descarga ($2c$) e a distância entre os eletrodos de descarga e a placa de coleta (s) são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Dimensões do precipitador eletrostático

Dimensão	Medida (cm)
L_{ne}	30
h_{ne}	10
$2s$	4
$2r_{se}$	0,025
$2c$	4
s	2

O precipitador consistia em uma caixa retangular construída em acrílico, cujas paredes laterais internas eram revestidas por placas de cobre, que eram aterradas através da ligação, feita por um fio de cobre revestido, entre um conector em cada lateral externa das paredes e o fio de aterramento. Dessa forma, as placas funcionavam como eletrodos de coleta.

Os eletrodos de descarga, onde era aplicado a tensão para a geração do efeito corona, eram fios de aço inoxidável. Foram utilizados oito eletrodos de descarga, posicionados verticalmente e igualmente espaçados no interior da caixa, paralelos aos eletrodos de coleta.

Os eletrodos de descarga eram fixados, na parte inferior da caixa acrílica com um anel de pressão em sua extremidade e na parte superior os fios eram ligados a uma barra de cobre perfurada que possuía parafusos para fixação dos mesmos, conforme ilustrado na Figura 3.12. A barra de cobre também tinha como função ligar os fios ao cabo de alta tensão. O conector do cabo estava soldado na extremidade da barra de cobre.

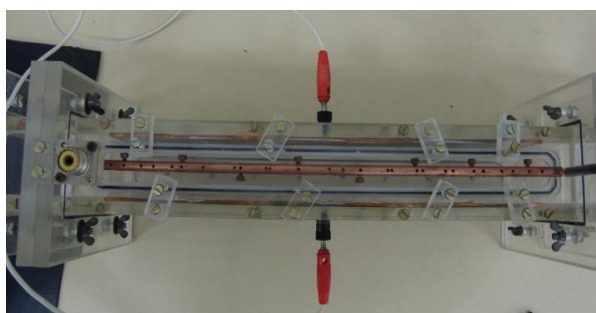


Figura 3.12 – Barra de cobre que faz a ligação dos eletrodos de descarga com o cabo de alta tensão.

Nas extremidades da caixa acrílica eram conectadas peças de acrílico que tinham a forma de tronco de pirâmide, com base retangular, cuja função era minimizar os efeitos de turbulência do gás na entrada e saída do equipamento. Dentro da peça instalada na entrada foi fixada uma grade de metal, com o mesmo formato, que tinha a função de promover a distribuição do gás para uma melhor uniformidade do escoamento dentro do precipitador (Figura 3.13). A vedação da junção das peças com a caixa foi feita com o uso de *o'rings*.

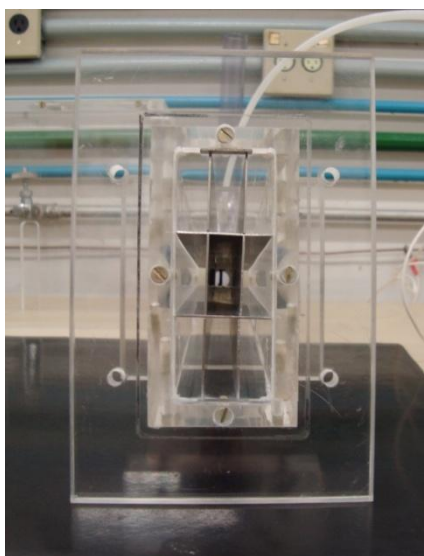


Figura 3.13 – Distribuidor de gás.

3.2 Procedimento Experimental

3.2.1 Testes Preliminares

Antes do início da coleta de dados para avaliação do desempenho do precipitador eletrostático, foram realizados testes preliminares para ajustes da unidade experimental. Os testes tinham como objetivo determinar condições ótimas de operação do

gerador de partículas projetado e construído no DEQ-UFSCar, avaliar as condições dos procedimentos de amostragem do aerossol e definição de parâmetros de operação para o SMPS. O procedimento e os resultados obtidos estão descritos no trabalho de Feitosa (2009), que utilizou a mesma unidade experimental para avaliar a eficiência de filtros fibrosos na remoção de partículas nanométricas de aerossóis.

O gerador de partículas projetado e construído no DEQ-UFSCar se mostrou eficiente para a produção de partículas na escala nanométrica. A Figura 3.14 apresenta as curvas de distribuição de partículas produzidas para diversas concentrações de soluções de cloreto de sódio. Estas representam a capacidade do gerador produzir nanopartículas de cloreto de sódio para as diversas concentrações do soluto com faixa de diâmetros entre 4 e 750 nm.

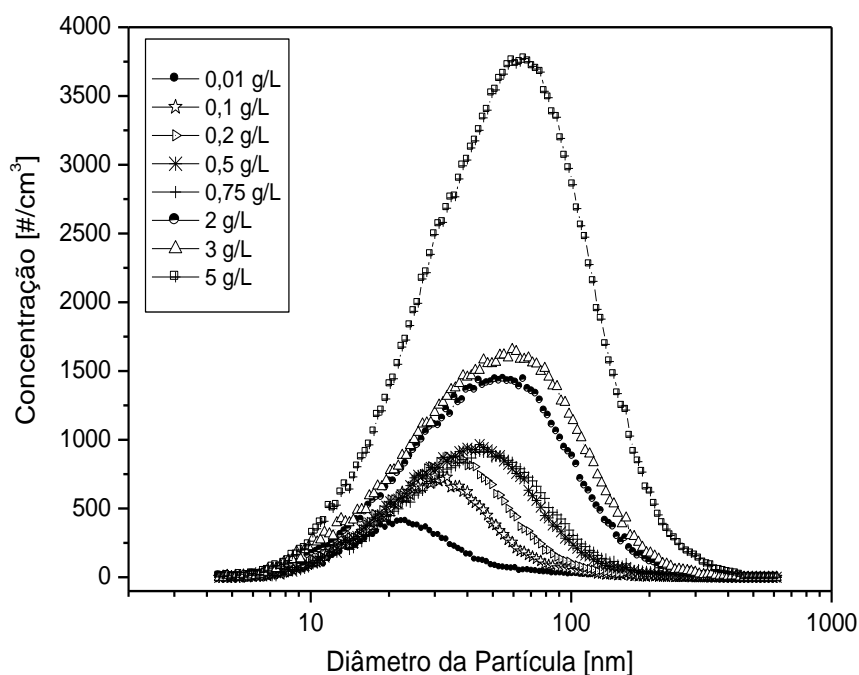


Figura 3.14 – Distribuições de tamanhos de partículas para diferentes concentrações de soluções de NaCl.

Os testes foram realizados sobre condições não isocinéticas, uma vez que os testes mostraram que a amostragem de aerossóis nanométricos independe de condições de isocinetismo, conforme pode ser observado na Figura 3.15.

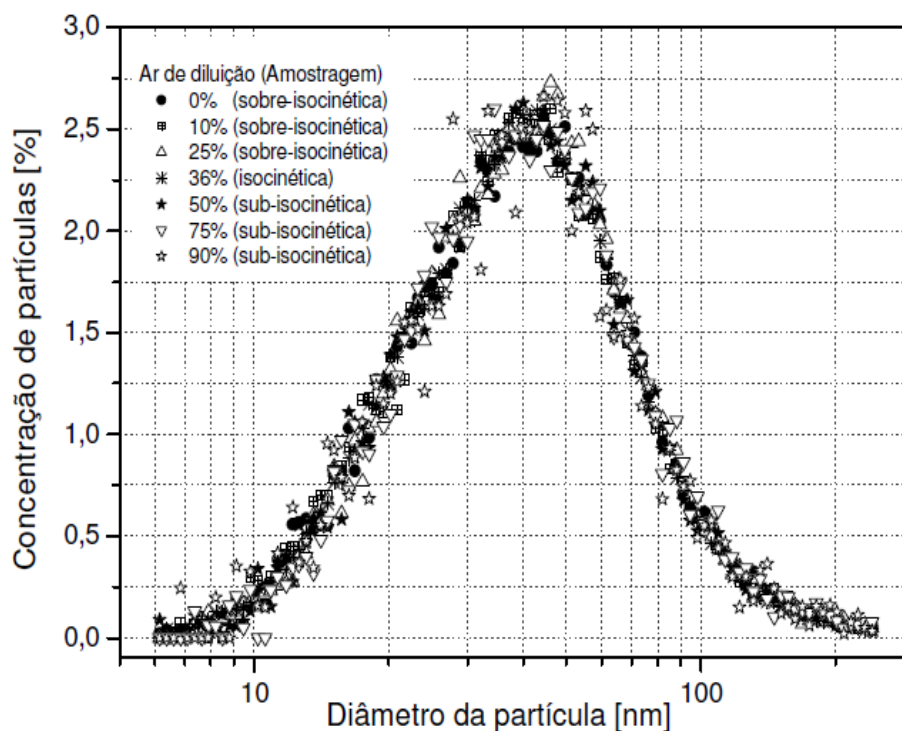


Figura 3.15 – Comparação das distribuições de tamanhos de partículas nanométricas em porcentagens de concentrações para diversas condições de amostragem (FEITOSA, 2009).

Observa-se que em diferentes condições de amostragem não ocorreu coleta preferencial, uma vez que as curvas de distribuição se sobrepõem em distintas condições de coleta do material. Isto comprova que os efeitos inerciais provenientes de mudanças repentinas no escoamento de partículas nanométricas de aerossóis, como no caso de amostragens isocinéticas e não isocinéticas de material no sistema são desprezíveis. Os efeitos inerciais não são significativos, uma vez que as partículas acompanham o escoamento do fluido.

O SMPS foi configurado para operar com o Long-DMA, impactador de 0,0710 cm e vazão do aerossol amostrado igual a 1,4 L/min., pois para baixas vazões do aerossol amostrado (0,3 L/min) efeitos atípicos surgiam nas medidas de concentração de partículas com diâmetro inferior a 10 nm, sendo necessário um maior tempo de *retrace* e *break* para minimizar os efeitos, uma vez que ocorria a perda por difusão das partículas abaixo de 10 nm dentro do equipamento impossibilitando a remoção destas antes do início de um novo teste. Para a vazão do aerossol de 1,4 L/min ocorreu uma menor perda por difusão não se tornando

necessário o *break* entre um escaneamento e outro. Quando o SMPS era configurado a operar com uma vazão de aerossol amostrado de 0,3 L/min, independente do tamanho do impactador, era necessário estabelecer valores adequados dos tempos *retrace* e, principalmente, *break*, para minimizar possíveis erros de medidas de concentração ocasionados por partículas residuais presentes no UCPC.

A partir dos estudos foram estabelecidos os melhores tempos de *scan up*, *retrace* e *break* para realização dos testes de desempenho do precipitador eletrostático. O tempo de *scan up* foi de 300 segundos, sendo esse parâmetro referente ao tempo de escaneamento em que as partículas são classificadas em função da tensão no DMA e contadas no UCPC.

O tempo de *retrace*, referente ao tempo necessário para a tensão retornar ao valor inicial e possibilitar o início de outro escaneamento, foi de 15 segundos e o tempo de *break* de 0 segundos, este último parâmetro se refere ao tempo de espera entre um escaneamento e outro. Essa configuração permitiu análise de partículas com diâmetros entre 6,15 e 241,4 nm.

3.2.2 Determinação da Curva Corrente-Tensão

Para determinação da curva corrente-tensão do precipitador eletrostático a velocidade de escoamento do ar na linha principal foi ajustada com o uso do rotâmetro e a umidade relativa do ar e a temperatura dentro do sistema foram medidas colocando-se o termopar dentro do duto de saída do ar. Em seguida, ligava-se a fonte de alta tensão e aplicava-se potencial de 1 kV até o rompimento elétrico do gás. A tensão era aumentada de 1 em 1 kV e o par de valores corrente-tensão era anotado. O procedimento foi repetido para cada velocidade de escoamento, 1 a 10 cm/s, com variação de 1 em 1 cm/s. Também foi feito o mesmo procedimento sem a presença de aerossol no sistema.

3.2.3 Testes do Desempenho do Precipitador Eletrostático

Para realização dos testes de eficiência do precipitador eletrostático utilizou-se aerossol contendo nanopartículas polidispersas de NaCl. As velocidades de escoamento do aerossol estudadas foram de 1 a 10 cm/s, com variação de 1 em 1 cm/s.

A Figura 3.16 apresenta o esquema da unidade experimental utilizada para a realização destes testes.

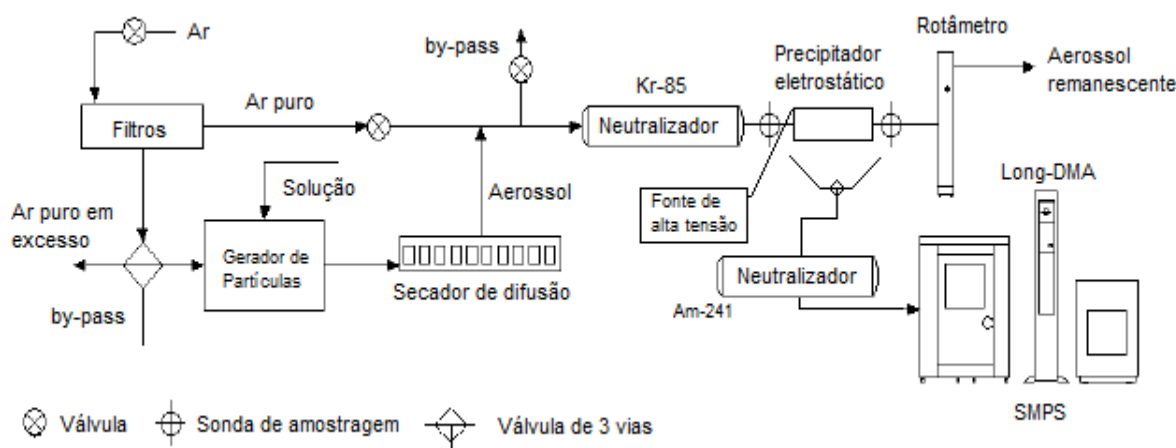


Figura 3.16 – Esquema da unidade experimental.

A unidade experimental consistia em dois módulos independentes: o módulo de geração de partículas seguido pelo secador de difusão e a linha principal, onde as partículas geradas eram alimentadas na corrente de ar puro. Na linha principal o aerossol seco era neutralizado, amostrado para análise, passava pelo precipitador eletrostático, onde as partículas eram removidas, era amostrado e neutralizado novamente e seguia até o SMPS para análise.

No gerador de nanopartículas construído no DEQ-UFSCar, utilizado para os testes com velocidade de escoamento de 1 a 5 cm/s, a solução era transferida para o reservatório de armazenamento da solução de alimentação, disposto em um nível mais

elevado em relação ao bico atomizador. Assim, a solução escoava por gravidade e garantia o equilíbrio de pressões no atomizador, de acordo com as condições operacionais. No gerador, a solução era alimentada no ponto de despressurização do ar, sendo este proveniente de um filtro de purificação de ar (Modelo 3074B da TSI). A pressão do ar na entrada do gerador era ajustada em aproximadamente 10 psi, garantindo assim a atomização do líquido. Deste modo, o excesso da solução não vaporizada escoava para um recipiente de vidro. As partículas geradas seguiam o fluxo principal de ar, passando por um secador de difusão (Modelo 3062, TSI) e, então, eram alimentadas na corrente de ar puro da linha principal.

Para os testes com velocidade de 6 a 10 cm/s utilizou-se o atomizador da TSI (Modelo 3079), que possuía a propriedade de ajustar a vazão de saída do aerossol, o que possibilitava que se estabelecesse maiores velocidades do gás no duto de escoamento da linha principal. O estabelecimento de velocidades relativamente altas na unidade dificultava a alimentação do aerossol no duto da linha principal, devido à contra-pressão exercida pelo sistema. A solução preparada era armazenada no recipiente interno (porta-solução) e a vazão era fixada no valor de 4,0 L/min, uma vez que, quanto maior a vazão volumétrica do aerossol no gerador, maior era a concentração de partículas geradas. Da mesma forma, as partículas geradas antes de serem alimentadas na linha principal, passavam pelo secador de difusão.

A linha principal iniciava-se com o compressor de ar seguido por um filtro coalescente e uma coluna preenchida com sílica-gel, respectivamente. O ar seguia, através de uma mangueira PVC, até um regulador de pressão acoplado na entrada do sistema, que distribuía o ar comprimido para dois filtros de purificação de ar (Modelo 3074B da TSI), utilizados também para a remoção de partículas remanescentes. A pressão máxima na entrada do sistema era 50 psi. Após a passagem pelos filtros, o ar ultrapuro era transportado através do duto de escoamento, tendo sua vazão controlada por uma válvula do tipo agulha. Após a inserção de nanopartículas nesta linha, o aerossol passava por uma fonte de Kriptônio-85 para neutralização das cargas eletrostáticas das partículas. O aerossol neutralizado seguia para o precipitador eletrostático, onde através do potencial aplicado, proveniente da fonte de alta tensão (Spellman, modelo SL 1200), gerava-se uma diferença de potencial entre o eletrodo de descarga e o eletrodo de coleta, gerando a descarga corona, e conseqüentemente, o carregamento das partículas e remoção destas do aerossol.

A tensão a ser aplicada aos eletrodos de descarga eram ajustadas diretamente na fonte de alta tensão, que permitia variar a tensão de 0,1 kV em 0,1 kV. As tensões aplicadas iniciaram-se em 6 kV para todas as velocidades de escoamento estudadas e variaram de acordo com a velocidade de escoamento chegando a 11 kV para a velocidade de 10 cm/s.

Na linha principal o aerossol passava pelos dois pontos de amostragem localizados antes e após o precipitador eletrostático. A amostra de aerossol coletada pelas sondas passava pela fonte neutralizadora de Amerício 241, de forma que as partículas entrassem no SMPS sem carga, não ocasionando uma análise incorreta da concentração de partículas. Após a passagem pela fonte neutralizadora o aerossol era conduzido ao SMPS.

O SMPS foi configurado com a torre Long-DMA, com o impactador de 0,0710 cm de forma que a faixa de partículas analisadas estava compreendida entre 6,15 e 241,4 nm. A vazão do aerossol amostrado requerida pelo SMPS era de 1,4 L/min, o tempo de *scan up* foi ajustado para 300 s, o tempo de *retrace* foi de 15 s e o tempo de *break* de 0 s.

A vazão da linha principal era medida pelo rotâmetro, na saída do sistema. O aerossol remanescente da linha principal era descartado.

3.2.4 Eficiência do Precipitador

Com todo o sistema funcionando, ou seja, com as partículas nanométricas sendo geradas e alimentadas na linha principal, a velocidade de escoamento ajustada, o valor do potencial a ser aplicado regulado na fonte de alta tensão e o SMPS com os parâmetros definidos, iniciava-se a análise do aerossol.

Primeiro era feita a análise do aerossol antes do precipitador eletrostático e em seguida, mudando a posição da válvula de três vias, a análise do aerossol após o equipamento. Foram realizadas três réplicas deste procedimento para cada velocidade e para cada tensão aplicada. O desempenho do precipitador eletrostático foi obtido a partir dos cálculos das eficiências para cada faixa de tamanho das partículas (eficiências fracionárias). A eficiência foi calculada pela equação a seguir:

$$\eta = \frac{C_0 - C_s}{C_0} \quad (3.1)$$

na qual, C_0 é a concentração de partículas antes do precipitador eletrostático e C_s é a concentração de partículas depois do precipitador eletrostático.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Determinação da Curva Corrente-Tensão

A curva corrente-tensão em um precipitador eletrostático é função de suas configurações, como comprimento, distância entre as placas de coleta, diâmetro dos eletrodos de descarga e espaçamento entre os mesmos, e das variáveis de operação, tais como composição, concentração e velocidade do aerossol e campo elétrico.

Neste trabalho foi analisada a influência da velocidade de escoamento e o efeito da concentração de partículas na corrente gasosa sobre a curva corrente-tensão.

A umidade relativa e a temperatura no sistema para realização dos testes eram de 11% e 25°C, respectivamente.

A Figura 4.1 apresenta as curvas corrente-tensão obtidas variando-se o potencial aplicado de 1 kV até o rompimento elétrico do gás no precipitador.

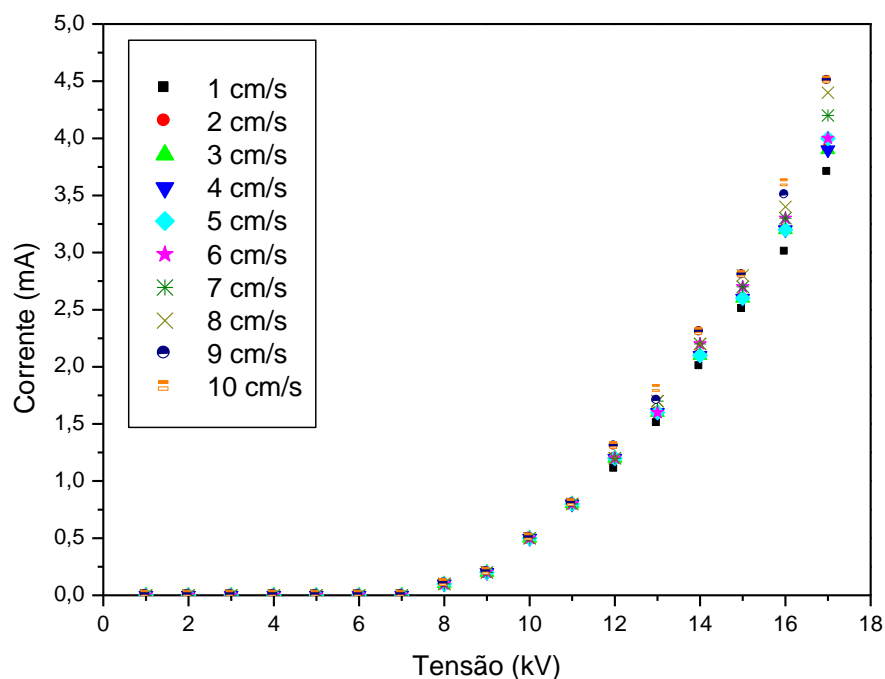


Figura 4.1 – Curvas corrente-tensão para as velocidades estudadas.

Pode-se observar que não há influência da velocidade de escoamento do aerossol sobre o potencial de início da descarga corona e sobre o potencial de rompimento elétrico do gás. Com o aumento da velocidade de escoamento ocorre um aumento da corrente gerada para as tensões acima de 12 kV. A variação máxima é de 0,8 mA para a tensão de 17 kV. Essa variação provavelmente é função da concentração de partículas na corrente gasosa que diminui com o aumento da velocidade de escoamento do aerossol. Segundo White (1963), a presença de partículas, em função de sua menor mobilidade elétrica quando comparada à mobilidade dos íons e elétrons livres, acarreta uma diminuição da corrente gerada.

O aumento da velocidade de escoamento do aerossol ocasionou uma menor concentração de partículas na corrente gasosa. Portanto, a concentração de partículas para as diferentes velocidades estudadas não alterou os potenciais de início da descarga corona e de rompimento elétrico do gás.

Para verificar a influência das partículas sobre a curva corrente-tensão, foi obtida a curva corrente-tensão sem a presença de partículas na corrente gasosa. A Figura 4.2 apresenta uma comparação desta curva com a curva corrente-tensão contendo nanopartículas para a velocidade de 10 cm/s, que apresentou os maiores valores de corrente entre as velocidades estudadas.

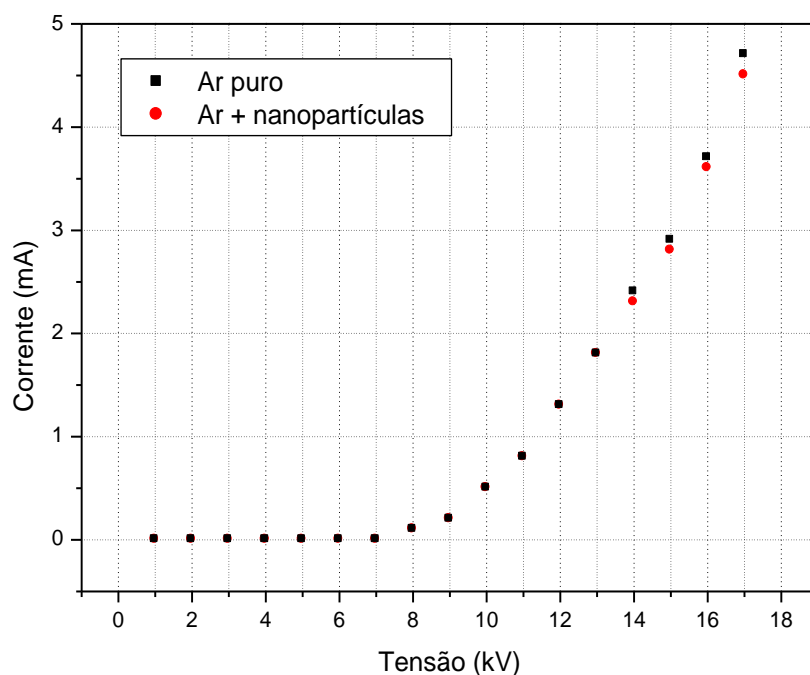


Figura 4.2 – Influência da presença de partículas na curva corrente-tensão.

Pode-se observar que com a presença de partículas no sistema ocorreu uma redução da corrente gerada para tensões acima de 14 kV, mas não ocorreu alteração das tensões de início da descarga corona e de rompimento elétrico do gás.

As curvas tenderam a aumentar exponencialmente com a elevação da tensão aplicada. Pela obtenção dos valores de corrente-tensão observou-se um início de geração de corrente para o potencial de 8 kV, mas pelos testes de eficiência do precipitador observou-se um início de remoção de partículas para o potencial de 6 kV. Isso provavelmente se deve à presença de corrente abaixo do nível de detecção da fonte utilizada para os potenciais entre 6 e 8 kV.

4.2 Testes do Desempenho do Precipitador Eletrostático

Para a realização dos testes de avaliação do desempenho do precipitador eletrostático operando na remoção de nanopartículas polidispersas foram realizadas medidas de concentração de partículas antes e após a passagem do aerossol pelo precipitador. Os testes foram conduzidos variando-se a velocidade de escoamento do aerossol de 1 a 10 cm/s, com variação de 1 em 1 cm/s. O número de Reynolds foi calculado para cada velocidade estudada através da equação:

$$\text{Re} = \frac{\rho v D_{eq}}{\mu} \quad (4.1)$$

na qual ρ é a densidade do ar; v é a velocidade de escoamento; μ é a viscosidade do ar e D_{eq} é o diâmetro equivalente, calculado pela equação:

$$D_{eq} = \frac{2(h_{ne} + 2s)}{h_{ne} + 2s} \quad (4.2)$$

A Tabela 4.1 apresenta o número de Reynolds para todas as velocidades estudadas. Pode-se notar que todos os números de Reynolds estão muito abaixo de 2100, ou seja, todos os testes foram realizados em regime de escoamento estritamente laminar.

Tabela 4.1 – Número de Reynolds no precipitador eletrostático

Velocidade (cm/s)	Número de Reynolds
1	37
2	74
3	111
4	148
5	185
6	222
7	259
8	297
9	334
10	371

Para os testes referentes às velocidades de 1 a 5 cm/s foi utilizado o gerador de partículas construído no DEQ-UFSCar. Para os testes com velocidade de escoamento de 6 a 10 cm/s foi utilizado o gerador da TSI, que apresentou uma maior estabilidade na geração de nanopartículas para essa faixa de velocidades. O estabelecimento de velocidades relativamente altas na unidade dificultava à alimentação do aerossol no duto da linha principal, devido à contra-pressão exercida pelo sistema, e como o gerador da TSI permite o ajuste da vazão de saída do aerossol, isso possibilitou que se estabelecesse maiores velocidades do gás no duto de escoamento da linha principal. A aplicação dos potenciais para geração da corrente corona variou de 6 kV até obtenção de praticamente 100% de eficiência.

Para cada velocidade e para cada potencial aplicado foram realizadas três réplicas experimentais para medidas de concentração de partículas antes do precipitador eletrostático e três réplicas para as medidas realizadas após o equipamento.

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram as três réplicas das curvas de concentração de partículas antes e após a passagem do aerossol pelo precipitador eletrostático mantendo o

campo elétrico igual a 3,5 kV/cm, para as velocidades de 4 e 9 cm/s, onde foram utilizados os geradores de nanopartículas construído no DEQ-UFSCar e da TSI, respectivamente.

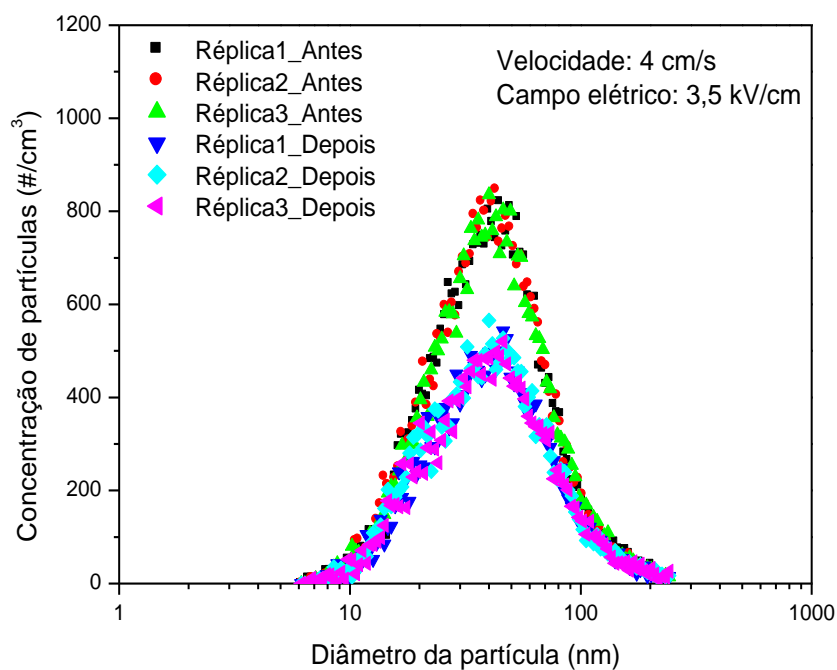


Figura 4.3 – Réplicas de curvas de distribuição de partículas para velocidades de 4 cm/s.

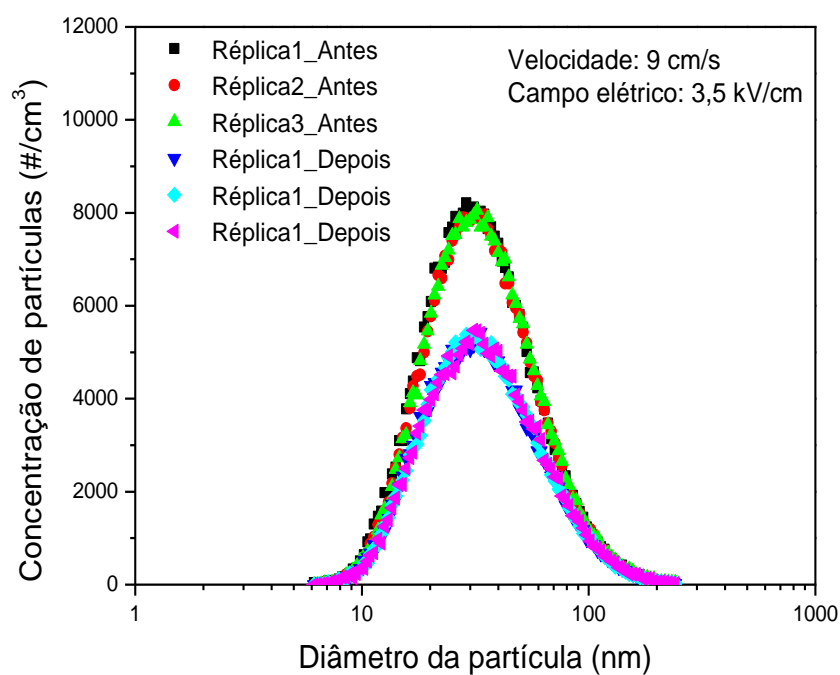


Figura 4.4 – Réplicas de curvas de distribuição de partículas para velocidades de 9 cm/s.

Pode-se observar que em ambos os casos há uma reprodutibilidade das medidas de concentração das partículas, ou seja, o desvio padrão das três medidas é baixo, como ilustrado nas Figuras 4.5 e 4.6.

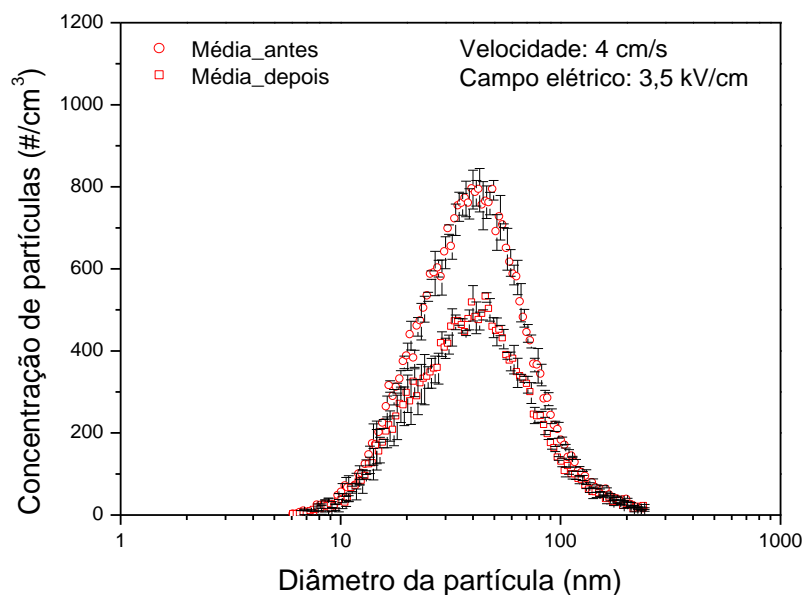


Figura 4.5 – Curvas médias de distribuição de partículas com desvio padrão para velocidade de 4 cm/s

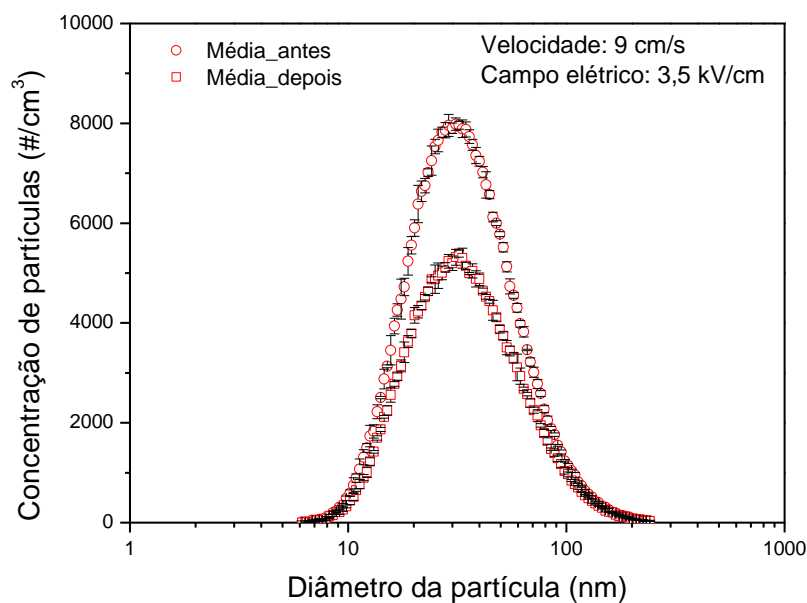


Figura 4.6 – Curvas médias de distribuição de partículas com desvio padrão para velocidade de 9 cm/s.

Observa-se que o desvio padrão para a curva de velocidade de 9 cm/s, na qual foi utilizado o gerador de partículas da TSI, apresenta um desvio padrão menor, o que comprova a maior estabilidade deste gerador.

Todas as réplicas dos experimentos apresentaram reprodutibilidade, desta forma serão apresentadas as curvas de concentração de partículas equivalentes as médias aritméticas das réplicas experimentais. Para o cálculo das eficiências fracionárias foi utilizado os valores das médias aritméticas para a concentração de cada diâmetro de partícula.

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam as curvas de concentração de partículas para as velocidades estudadas.

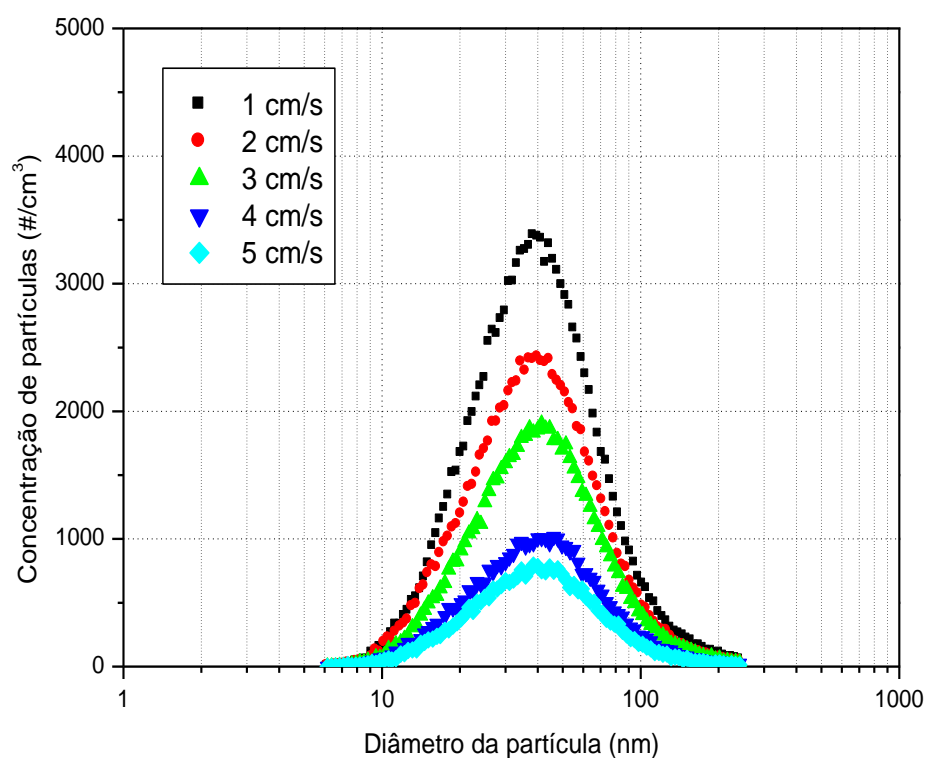


Figura 4.7 – Influência da velocidade de 1 a 5 cm/s nas curvas de distribuição de partículas (Gerador DEQ-UFSCar).

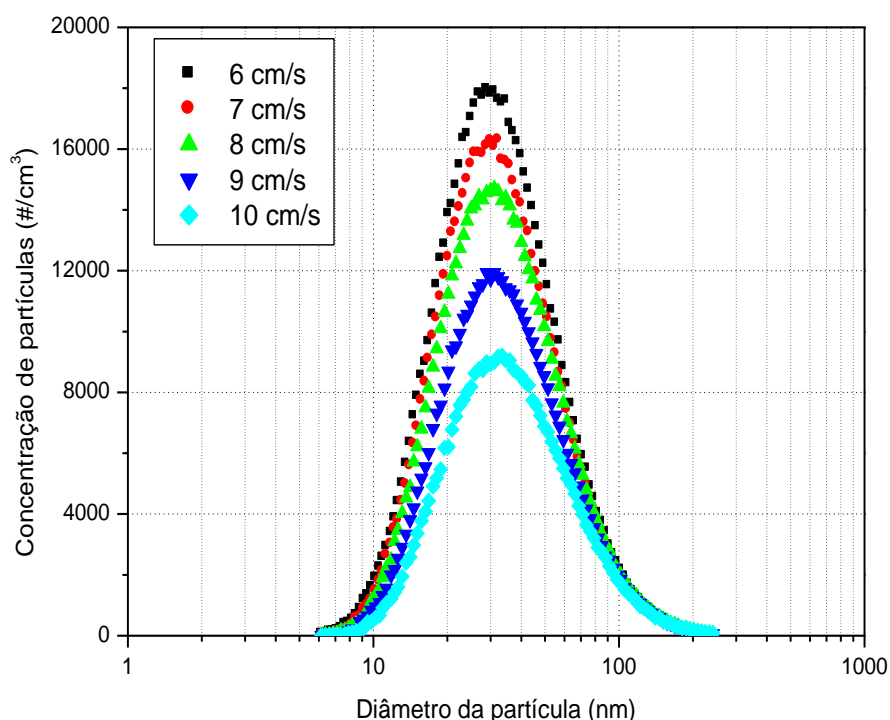
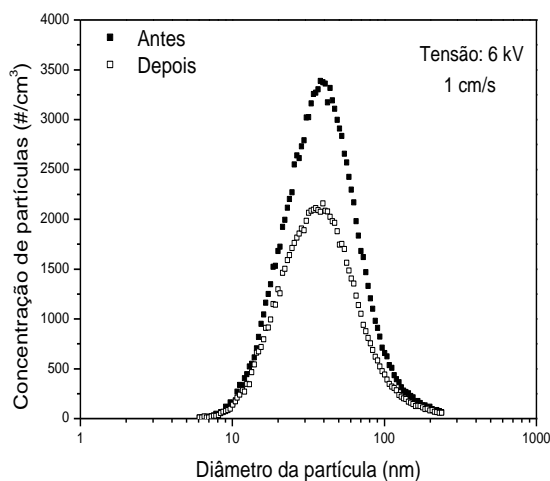


Figura 4.8 – Influência da velocidade de 6 a 10 cm/s nas curvas de distribuição de partículas (Gerador TSI).

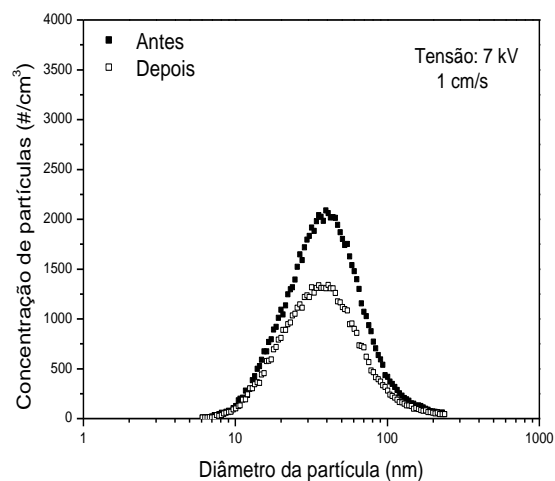
Como pode ser observado nas Figuras 4.7 e 4.8 a geração máxima de partículas ocorreu próximo ao diâmetro de 40 nm, para o gerador de partículas construído no DEQ-UFSCar e para o diâmetro de 30 nm para o gerador da TSI. Com o aumento da velocidade de escoamento do aerossol há um decréscimo na concentração de partículas amostradas antes do precipitador eletrostático. Isto acontece devido à maior quantidade de ar puro presente no sistema. Com o aumento da vazão do sistema e a vazão de geração de nanopartículas fixa, ocorre uma diluição das partículas no aerossol, e conseqüentemente ocasiona à diminuição na concentração de partículas amostradas.

Mesmo com velocidades maiores o gerador da TSI apresentou uma concentração maior de partículas na corrente gasosa, isso ocorre porque, além de possuir maior estabilidade, este gerador possui uma maior vazão de saída do aerossol do que o gerador construído no DEQ-UFSCar, o que facilita a alimentação das partículas na linha principal.

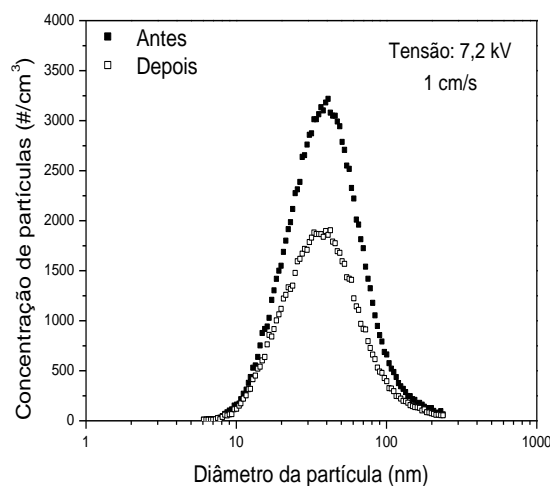
As Figuras 4.9 e 4.10 ilustram as curvas de concentração de partículas antes e após a passagem do aerossol pelo precipitador eletrostático para a velocidade de 1 cm/s e tensão de 6 a 7,8 kV.



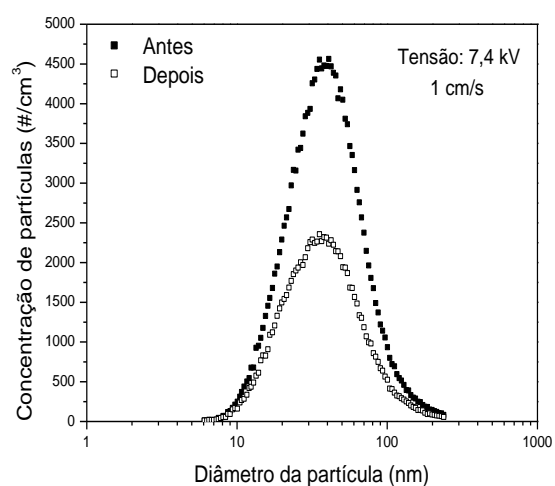
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.9 – Curvas de concentração antes e após a passagem do aerossol pelo precipitador eletrostático para velocidade de 1 cm/s: (a) $V = 6$ kV; (b) $V = 7$ kV; (c) $V = 7,2$ kV e (d) $V = 7,4$ kV.

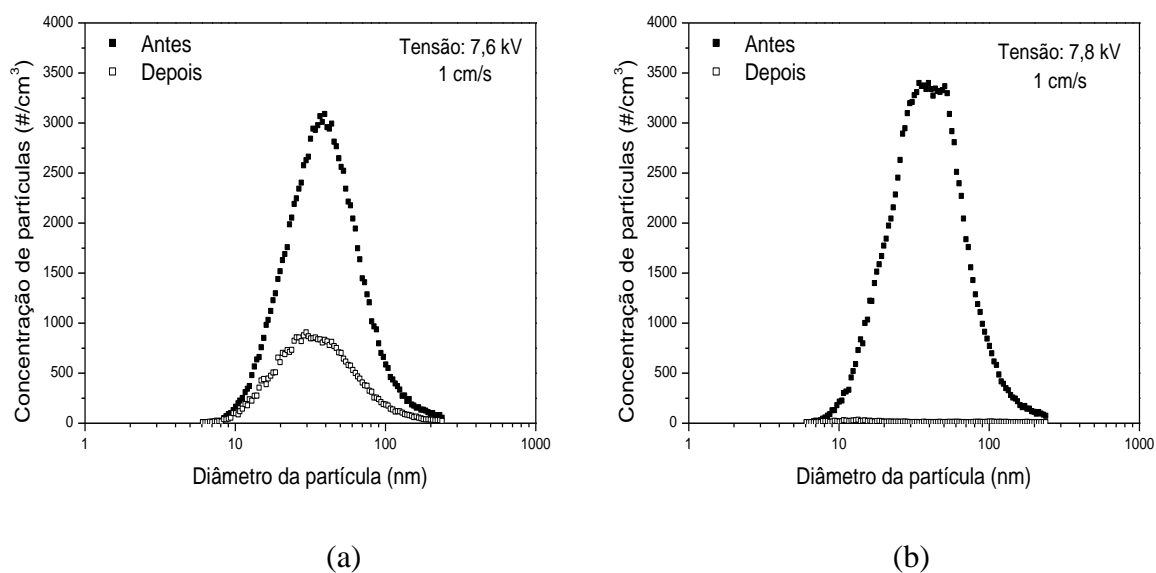


Figura 4.10 – Curvas de concentração antes e após a passagem do aerossol pelo precipitador eletrostático para velocidade de 1 cm/s: (a) $V = 7,6$ kV e (b) $V = 7,8$ kV.

Observa-se uma variação na concentração de partículas amostradas antes do precipitador eletrostático, tal ocorrência é devido à instabilidade do gerador. Essa instabilidade não afetou as medidas de concentração para cada velocidade e tensão, uma vez que as medidas foram feitas sequencialmente e para cada condição estudada foram realizadas três réplicas, que não apresentaram discrepâncias.

As diferenças de concentração não afetam a distribuição de partículas para cada diâmetro, isto pode ser comprovado plotando o gráfico de distribuição em termos de porcentagem de concentração de partículas por diâmetro (relação da concentração de partículas para cada faixa de tamanho com a concentração de partículas no aerossol, por unidade de volume).

A Figura 4.11 mostra as curvas de concentração amostradas antes do precipitador eletrostático para a velocidade de 1 cm/s, apresentadas nas Figuras 4.9 e 4.10, plotadas em porcentagem de concentração.

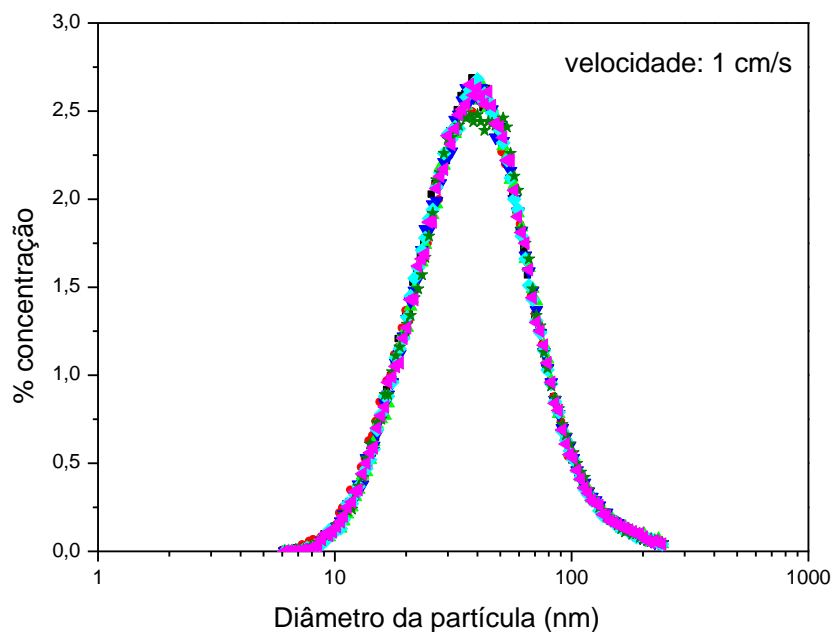


Figura 4.11 – Distribuição de partículas em porcentagem de concentração.

A Figura 4.12 ilustra as curvas de concentração de partículas antes e após a passagem do aerossol pelo precipitador eletrostático para as velocidades de 4 e 8 cm/s e campo elétrico de 3,5 e 4 kV/cm. As figuras com todas as curvas de concentração antes e após a passagem do aerossol pelo precipitador eletrostático, para todas as velocidades e todas as tensões aplicadas, são apresentadas no Apêndice A.

Os valores do campo elétrico foram calculados de acordo com a Equação 2.22, uma vez que o valor ajustado na fonte de alta tensão foi o valor da tensão a ser aplicada.

Observa-se que as curvas possuem a mesma distribuição de partículas nas amostragens antes do precipitador eletrostático e que quanto maior a tensão aplicada para cada velocidade, menor a penetração de partículas, ou seja, quanto maior a intensidade do campo elétrico formado no interior do precipitador eletrostático, maior era a eficiência de coleta do mesmo.

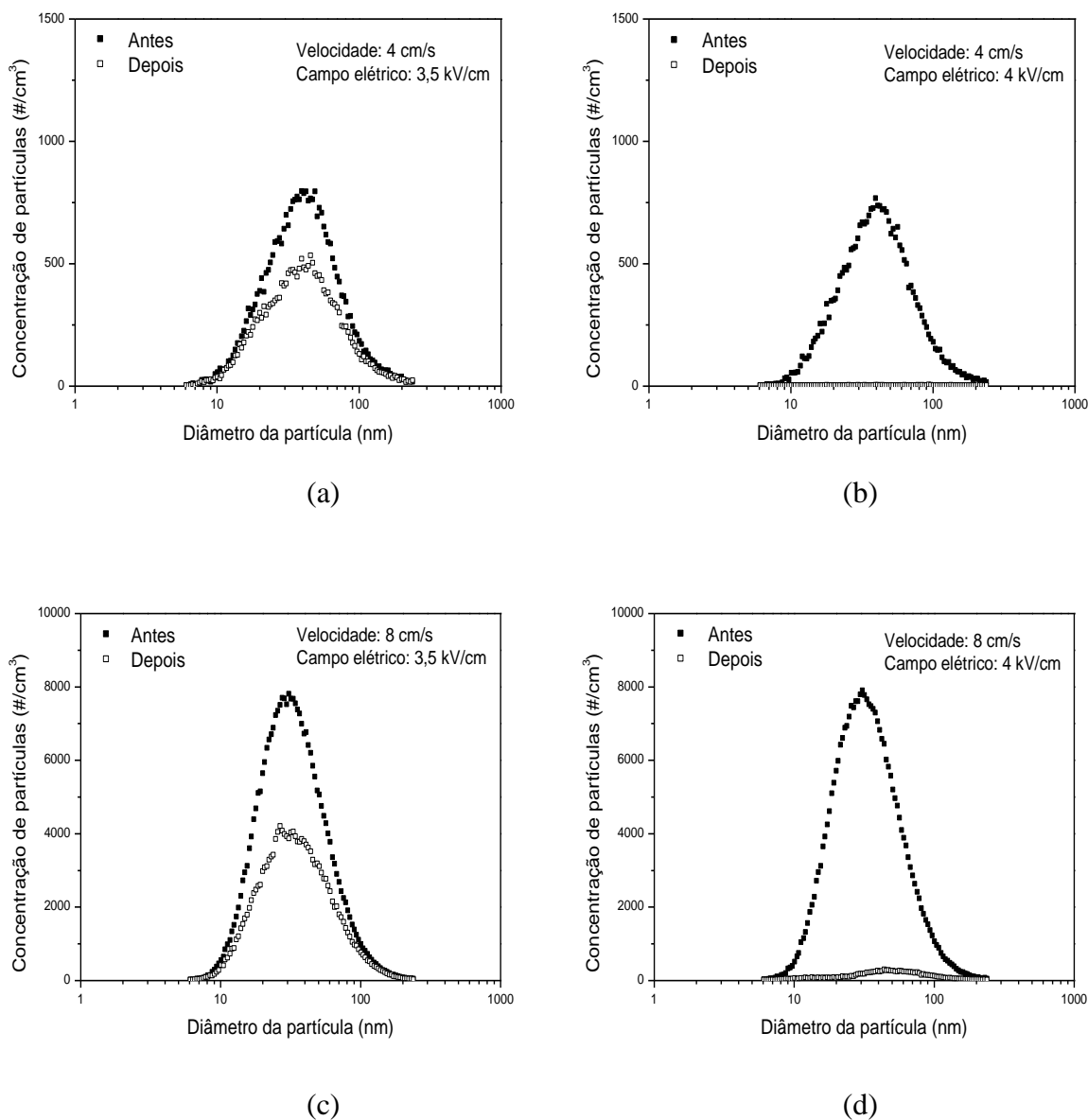


Figura 4.12 – Curvas de distribuição de partículas: (a) $v = 4$ cm/s, $E_{ps} = 3,5$ kV/cm; (b) $v = 4$ cm/s, $E_{ps} = 4$ kV/cm; (c) $v = 8$ cm/s, $E_{ps} = 3,5$ kV/cm; (d) $v = 8$ cm/s, $E_{ps} = 4$ kV/cm.

Em todas as velocidades foi possível atingir resultados em que quase não havia a penetração de partículas, a intensidade do campo elétrico necessário para tal efeito variou de acordo com a velocidade de escoamento. Quanto maior a velocidade maior era o campo elétrico necessário para que não houvesse a penetração de partículas. Tal fato provavelmente ocorreu porque quanto maior a velocidade de escoamento, menor era o tempo que a partícula

permanecia no interior do precipitador e conseqüentemente menor o tempo disponível para haver o carregamento das partículas, seja o carregamento por campo ou por difusão.

A Figura 4.13 mostra as curvas de concentração de partículas antes e após o precipitador eletrostático para velocidades de 2 e 6 cm/s e valores de campo elétrico suficientes para remover praticamente todas as partículas do aerossol, neste caso, 4 e 4,5 kV/cm, respectivamente.

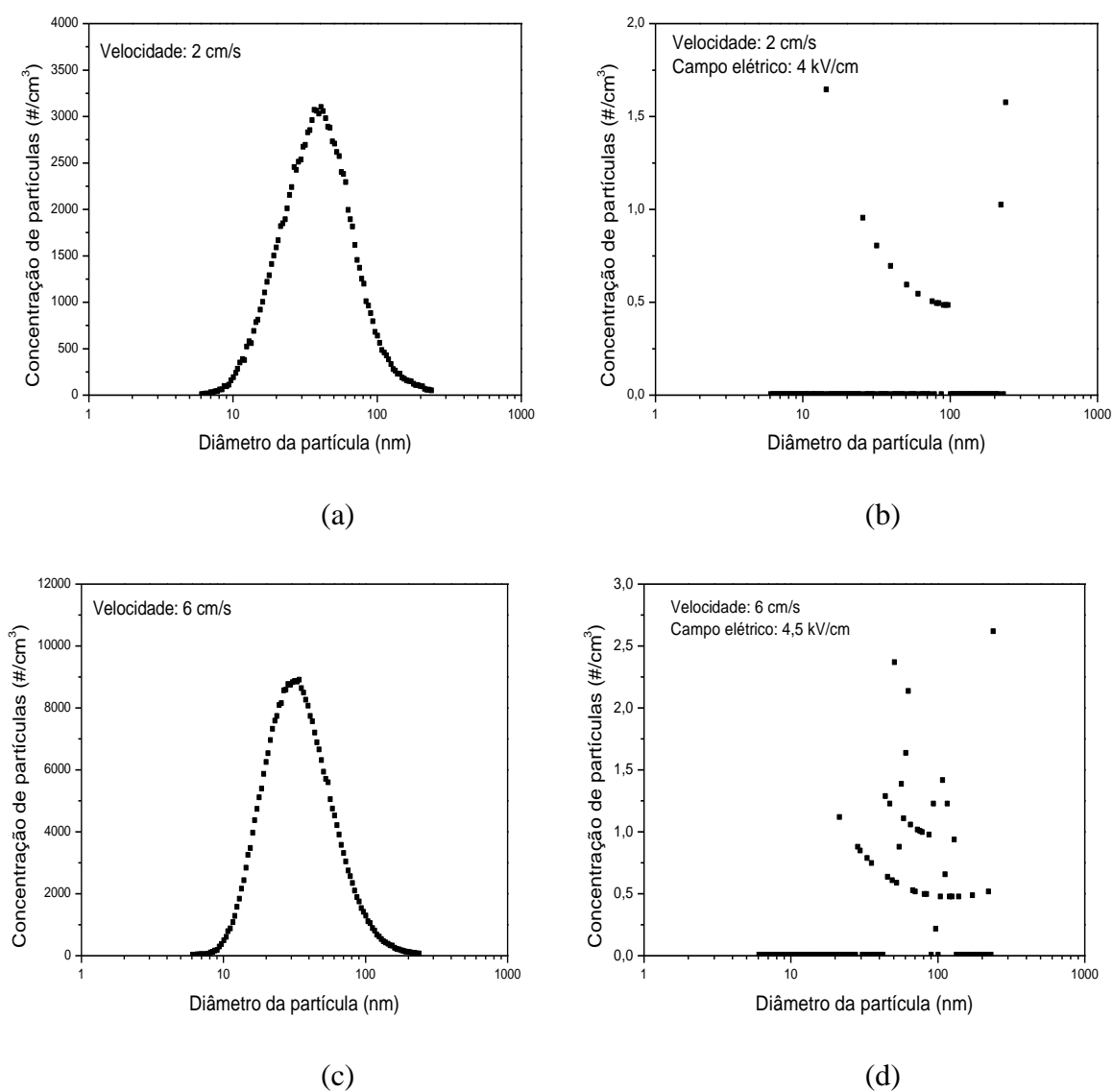


Figura 4.13 – Curvas de concentração de partículas: (a) antes do precipitador para $v = 2$ cm/s; (b) depois do precipitador para $v = 2$ cm/s e $E_{ps} = 4$ kV/cm; (c) antes do precipitador para $v = 6$ cm/s; (d) depois do precipitador para $v = 6$ cm/s e $E_{ps} = 4,5$ kV/cm.

Nota-se que ocorreu a penetração de partículas, contudo as medidas de concentração de partículas penetradas foram muito baixas. Houve a penetração de partículas para todas as velocidades estudadas, talvez devido a um *bug* do equipamento. Entretanto, o precipitador eletrostático apresentou eficiências muito altas, de acordo com os valores de campo elétrico, para todas as velocidades estudadas como pode ser observado nas Figuras 4.14 a 4.16.

4.3 Eficiência do Precipitador

A eficiência fracionária do precipitador eletrostático, para as velocidades estudadas e o campo elétrico aplicado, pode ser observada nas Figuras 4.14 a 4.16.

Para se obter a eficiência fracionária para a concentração de cada diâmetro de partícula foi calculada a média aritmética a partir das três réplicas e aplicada na Equação 3.1.

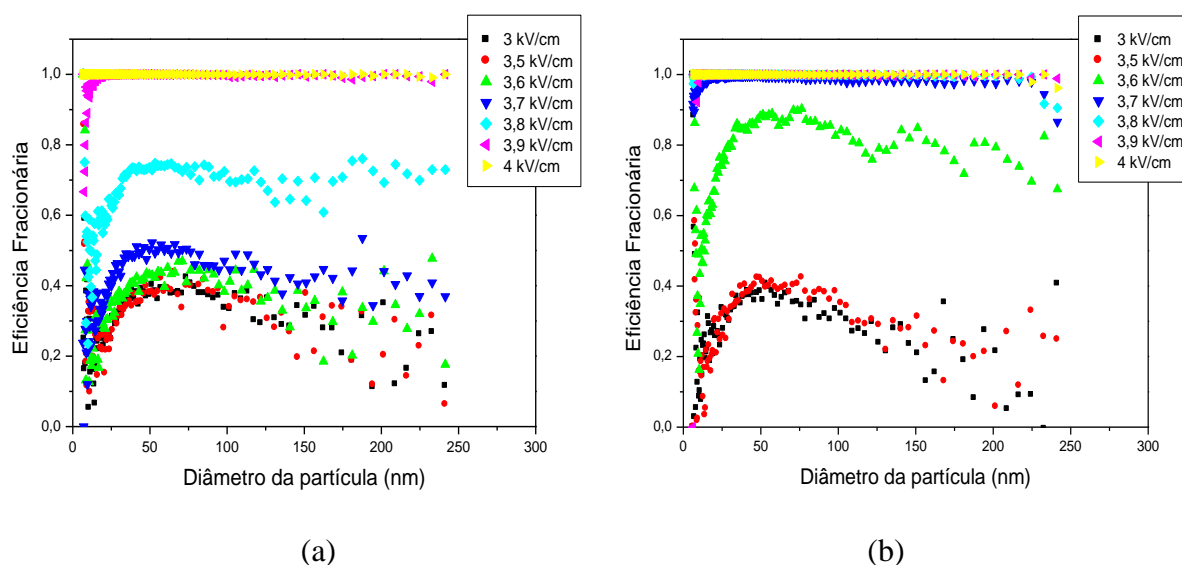


Figura 4.14 – Eficiência fracionária para as velocidades: (a) $v = 1$ cm/s e (b) $v = 2$ cm/s.

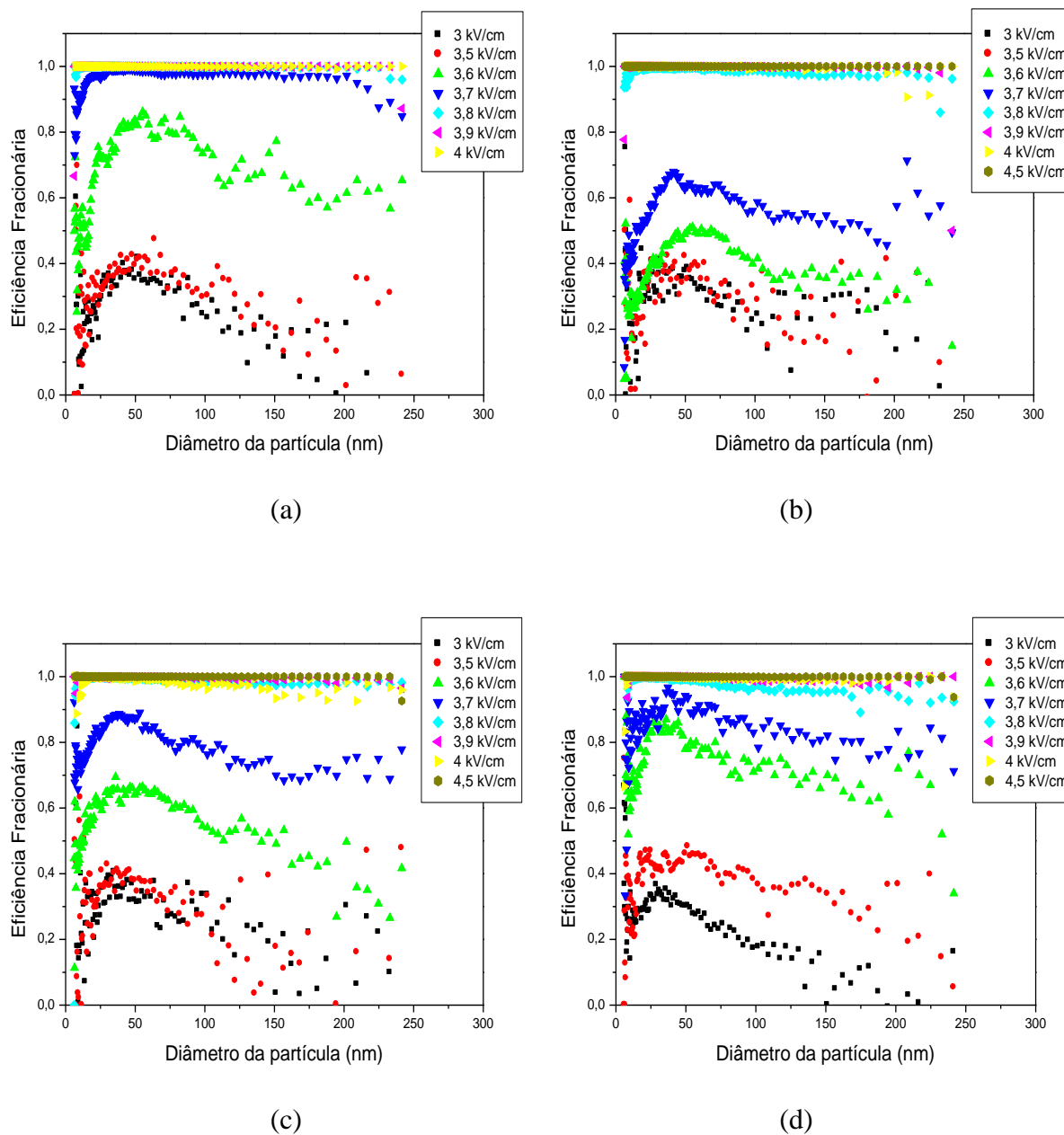


Figura 4.15 – Eficiência fracionária para as velocidades: (a) $v = 3 \text{ cm/s}$; (b) $v = 4 \text{ cm/s}$; (c) $v = 5 \text{ cm/s}$ e (d) $v = 6 \text{ cm/s}$.

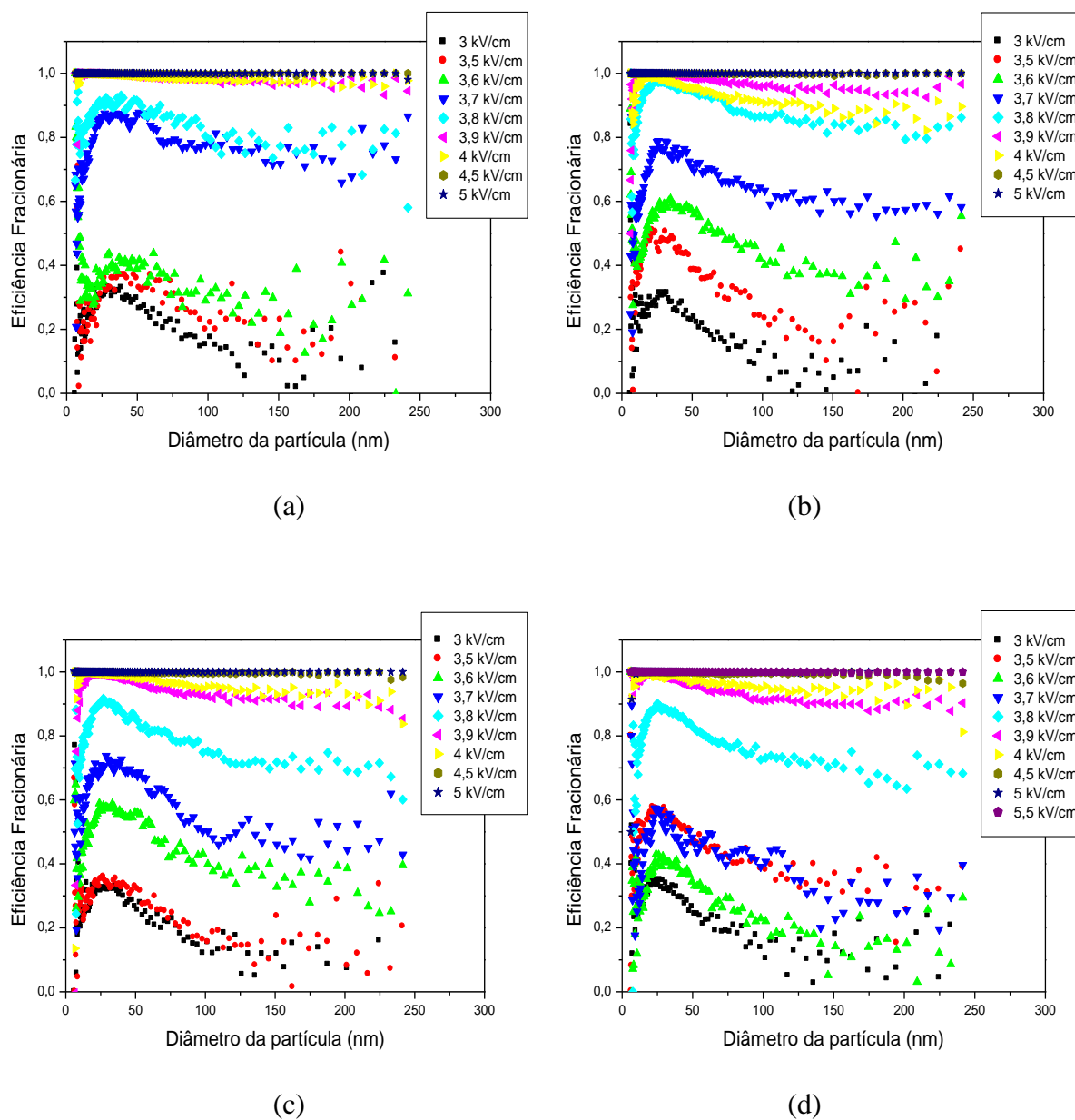


Figura 4.16 – Eficiência fracionária para as velocidades: (a) $v = 7$ cm/s; (b) $v = 8$ cm/s; (c) $v = 9$ cm/s e (d) $v = 10$ cm/s.

Nota-se um aumento da eficiência de remoção com o aumento do campo elétrico para todas as velocidades. Para determinados valores de campo elétrico foi possível obter eficiências acima de 99% para todos os diâmetros de partículas. Para manter a mesma eficiência de remoção de partículas com o aumento da velocidade de escoamento foi

necessário a aplicação de uma tensão mais elevada, que gera um maior campo elétrico dentro do precipitador eletrostático.

Os campos elétricos necessários para o carregamento das partículas e máxima eficiência de remoção foram de 4 kV/cm para as velocidades de 1 a 3 cm/s, de 4,5 kV/cm para as velocidades de 4 a 6 cm/s e 5 kV/cm para as velocidades de 7 a 9 cm/s. Para a velocidade de 10 cm/s foi necessário um campo elétrico de 5,5 kV/cm. Para melhor visualização dos valores de eficiência para esses valores de campo elétrico são apresentadas no Apêndice B as curvas de eficiência já apresentadas nas Figuras 4.14 a 4.16 com a escala de eficiência variando de 0,99 a 1,0.

As curvas mostram uma remoção preferencial das partículas com diâmetros entre 30 e 75 nm, aproximadamente, para as velocidades de 1 a 5 cm/s. Para as velocidades de 6 a 10 cm/s a melhor eficiência de coleta é para partículas com diâmetros entre 20 e 40 nm, aproximadamente.

Com a redução do diâmetro, houve um aumento da eficiência de remoção até 30 nm para as velocidades de 1 a 5 cm/s e 20 nm para as velocidades de 6 a 10 cm/s, a partir do qual ocorre uma queda na eficiência do precipitador. O aumento da eficiência com a diminuição do tamanho das partículas pode ser explicado pelo mecanismo de carregamento das mesmas. Quanto menor o diâmetro da partícula, maior é a sua mobilidade elétrica, tornando sua coleta mais eficiente. Em contrapartida, quanto menor o diâmetro, menor a carga da partícula, de forma que pode ocorrer um ponto de inflexão na curva de eficiência, como observado nos trabalhos de Nóbrega (2002) e Mizuno (2000), onde o ponto de mínimo ocorreu para diâmetros entre 0,25 e 1 μm , como apresentado na Figura 2.7. Neste trabalho, não foi possível observar esse ponto de mínimo para a faixa de diâmetros estudada.

Falaguasta (2005) também observou em seu trabalho que a eficiência fracionária elevou-se com a redução do diâmetro das partículas, até aproximadamente 20 nm, após esse ponto houve uma queda da eficiência, que a autora atribuiu ao baixo carregamento das partículas.

Sillanpää et al. (2008) observaram em seu trabalho uma queda na eficiência para partículas com diâmetro de mobilidade menor que 30 nm, os autores atribuíram esse comportamento ao insuficiente ou incompleto carregamento das partículas para essa faixa de tamanho.

Segundo Intra (2009), a queda na eficiência de remoção das partículas com diâmetros abaixo de 20 nm ocorre porque a descarga corona tem pouca eficiência de carregamento para partículas com diâmetro menores que 20 nm devido à elevada concentração de íons necessários para um eficiente carregamento por difusão.

Embora tenha sido necessário um aumento do campo elétrico para se manter a mesma eficiência de remoção de partículas com o aumento da velocidade de escoamento, plotando as curvas de eficiência para cada campo elétrico variando as velocidades de escoamento não é possível observar uma influência da velocidade sobre a eficiência para os campos elétricos de 3 a 3,8 kV/cm.

A Figura 4.17 apresenta as curvas de eficiência fracionária para o campo elétrico de 3,6 kV/cm. As curvas para todos os campos elétrico estudados são apresentadas no Apêndice C.

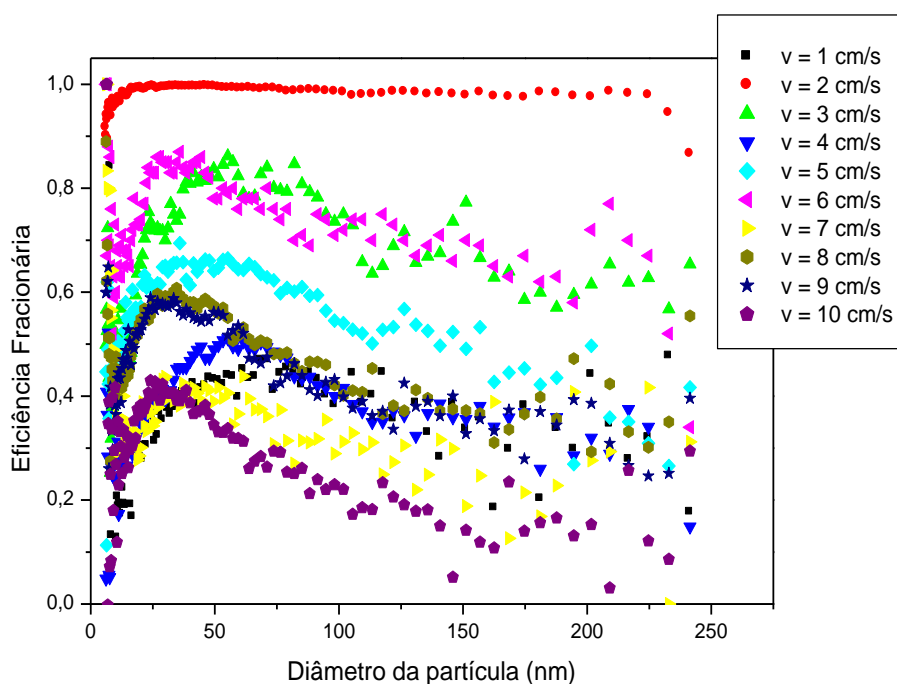


Figura 4.17 – Eficiência fracionária para o campo elétrico de 3,6 kV/cm.

Como pode ser observado na Figura 4.18, para os campos elétricos de 4,5 e 5 kV/cm as curvas apresentam a tendência esperada, ou seja, com o aumento da velocidade de escoamento houve uma queda na eficiência.

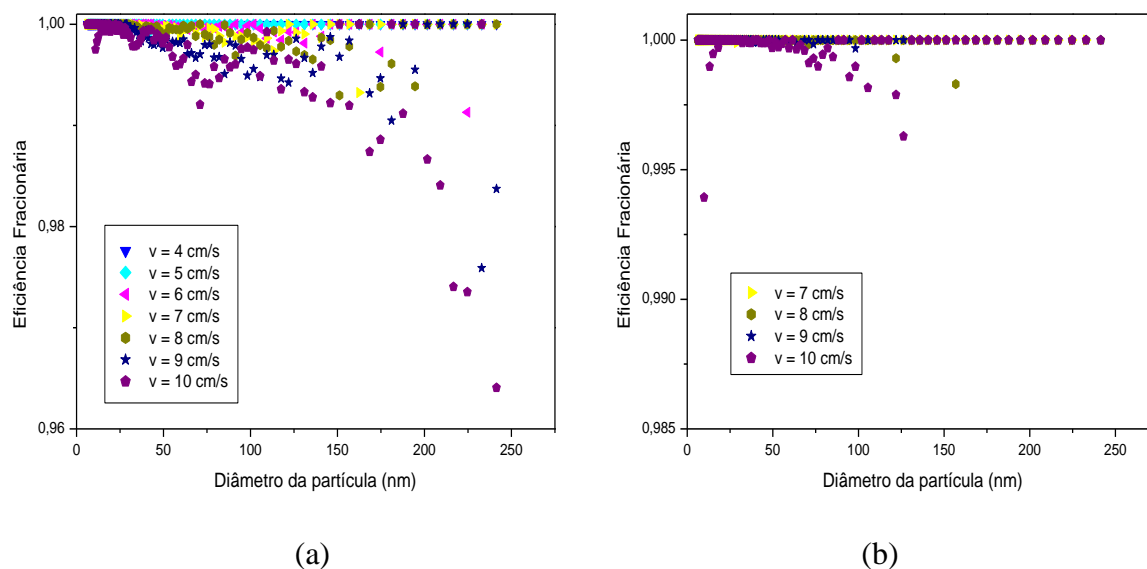


Figura 4.18 – Eficiência fracionária para o campo elétrico: (a) 4,5 kV/cm e (b) 5 kV/cm.

A influência da velocidade pode ser melhor visualizada na Figura 4.19, onde é plotada a eficiência em função da velocidade para determinados diâmetros.

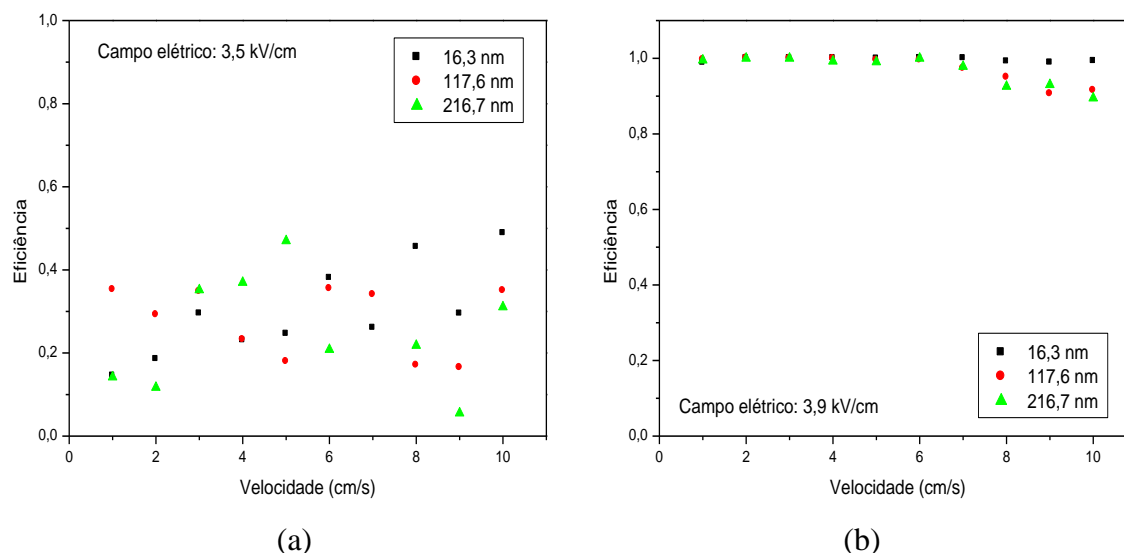


Figura 4.19 – Influência da velocidade sobre a eficiência: (a) $E_{ps} = 3,5$ kV/cm e (b) $E_{ps} = 3,9$ kV/cm

Para os campos elétricos de 3 a 3,8 kV/cm não é possível observar uma influência da velocidade na eficiência de coleta, isso provavelmente ocorre porque a força

elétrica agindo sobre as partículas é pequena e os efeitos se confundem, não há uma sensibilidade do mecanismo que age sobre a partícula, seja difusional, elétrico ou inercial.

Para campos elétricos acima de 3,8 kV/cm a força elétrica torna-se predominante e a eficiência tende a diminuir com o aumento da velocidade.

4.4 Comparação da Eficiência Experimental do Precipitador Eletrostático com os Modelos da Literatura

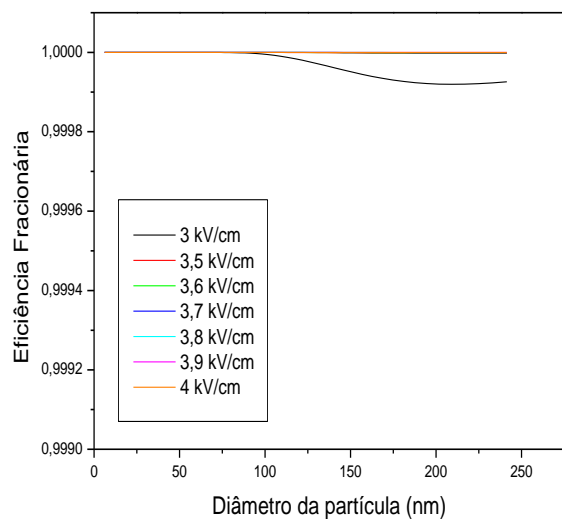
Os resultados da eficiência fracionária do precipitador eletrostático foram comparados com o modelo de Deutsch-Anderson, já apresentado no Capítulo 2 pela Equação 2.24, que é aqui apresentada novamente:

$$\eta_{dpi} = 1 - \exp\left(-\frac{w_{th} L_{ne}}{v s}\right) \quad (4.3)$$

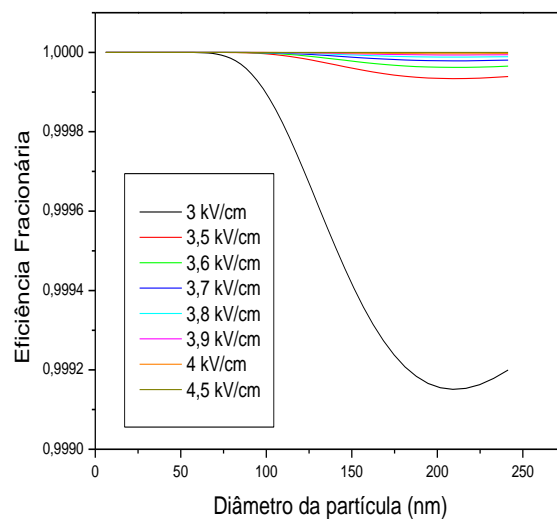
Para o cálculo velocidade teórica de migração (w_{th}) foi utilizada a Equação 2.23. A velocidade teórica de migração é função da carga adquirida pela partícula e do campo elétrico no precipitador eletrostático.

Para o cálculo da carga da partícula foi considerada a carga de saturação de partícula expressa pela Equação 2.21. Segundo Parker (2003), o tempo que a partícula adquire 90% de sua carga total de saturação é menor que 0,1 segundo e de 3 a 5 segundos a partícula alcança a carga de saturação. O campo elétrico foi calculado através da Equação 2.22.

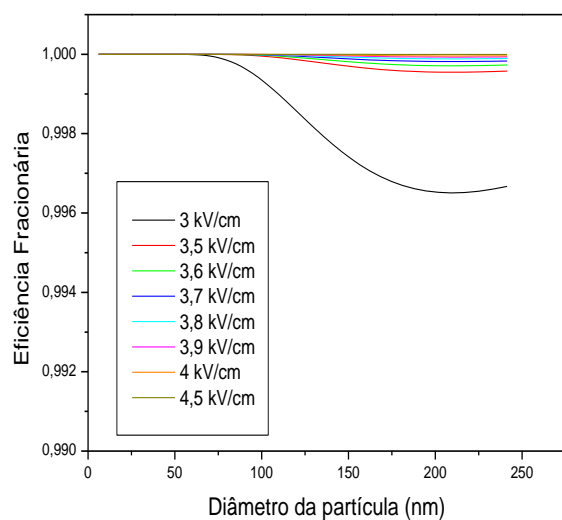
As Figuras 4.20 e 4.21 apresentam a eficiência teórica calculada para as velocidades de 3 a 10 cm/s.



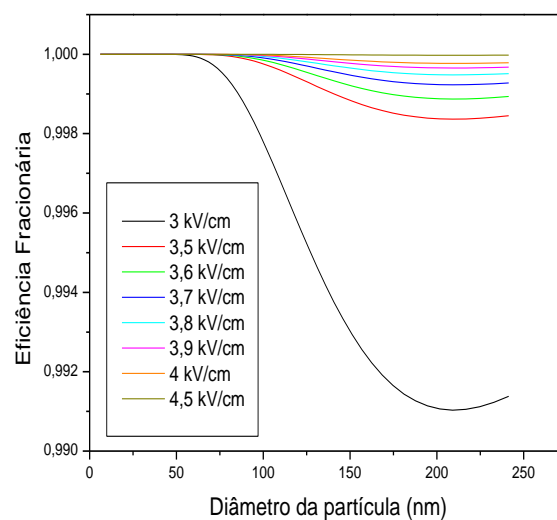
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.20 – Eficiência teórica pelo modelo de Deutsch-Anderson: (a) $v = 3$ cm/s; (b) $v = 4$ cm/s; (c) $v = 5$ cm/s e (d) $v = 6$ cm/s.

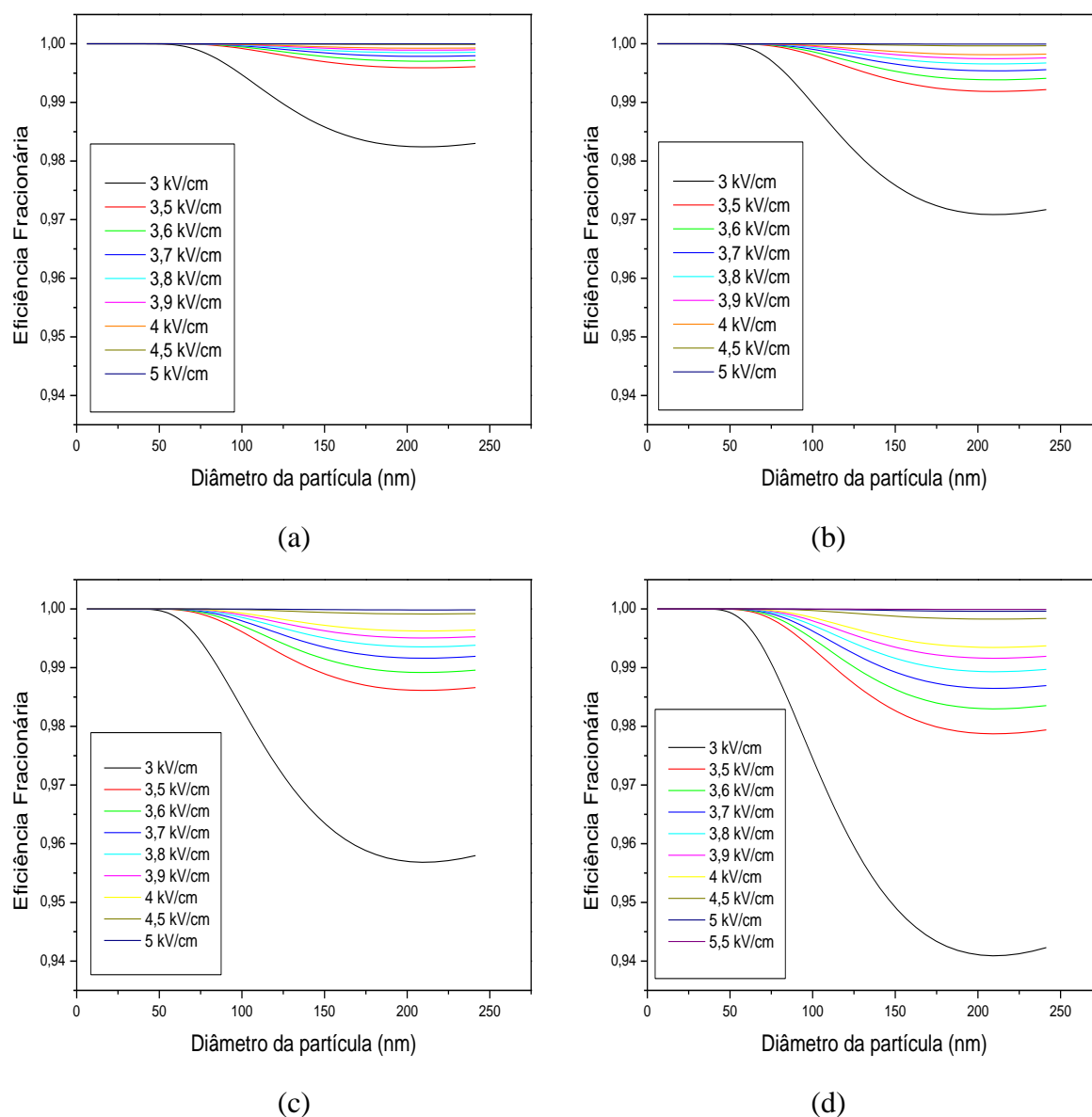


Figura 4.21 – Eficiência teórica pelo modelo de Deutsch-Anderson: (a) $v = 7$ cm/s; (b) $v = 8$ cm/s; (c) $v = 9$ cm/s e (d) $v = 10$ cm/s.

O modelo de Deutsch-Anderson pressupõe eficiências de 100% para todos os campos elétricos estudados nas velocidades de 1 e 2 cm/s. Para as velocidades de 3 e 4 cm/s as eficiências para todos os diâmetros de partículas estão acima de 99,9%. Para as demais velocidades e campo elétricos estudados o modelo prevê eficiências acima de 94%.

As curvas de eficiência teórica apresentam uma queda da eficiência com o aumento do diâmetro da partícula até 200 nm, aproximadamente, após o qual começa a ocorrer um aumento da eficiência, sugerindo um ponto de mínimo para esse diâmetro.

Como pode ser observado na Figura 4.22, a eficiência teórica tende a superestimar a eficiência experimental tanto para a faixa de partículas analisada, como para as velocidades de escoamento estudadas e valores de campo elétrico gerados no precipitador eletrostático.

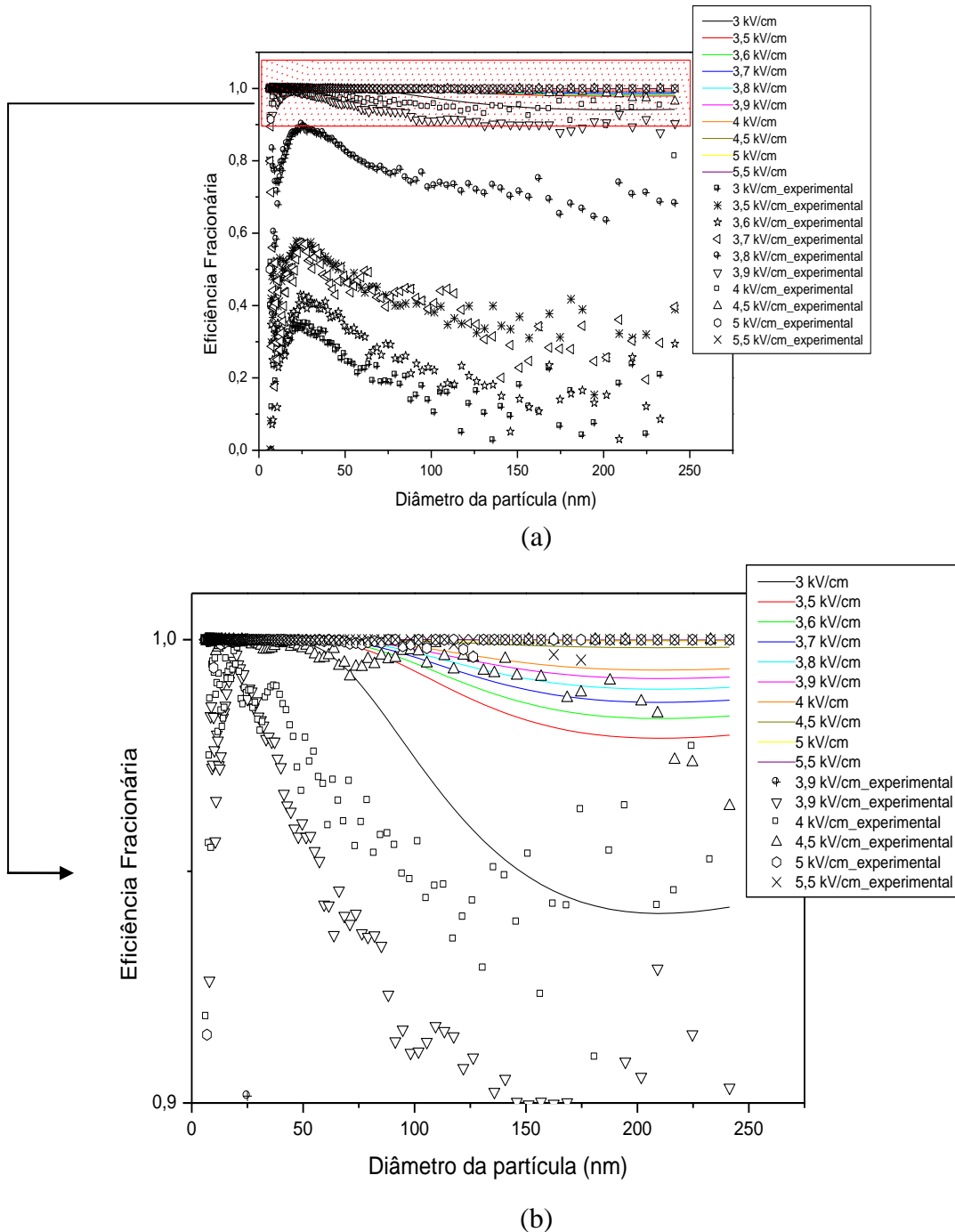


Figura 4.22 – (a) comparação entre a eficiência experimental e teórica pelo modelo de Deutsch-Anderson para velocidade de 10 cm/s e (b) zoom da área demarcada.

A diferença entre as curvas se deve as simplificações das equações utilizadas e também pelo fato de que a teoria de Deutsch assume 100% de turbulência no sistema, mas todos os testes, devido aos limites operacionais da unidade experimental, foram realizados com escoamento laminar, ou seja, número de Reynolds < 2100 , como apresentado na Tabela 4.1. A equação de Deutsch foi proposta para partículas micrométricas e não leva em consideração os efeitos na escala nanométrica.

O modelo não prevê uma queda na eficiência para partículas com diâmetros menores que 30 nm como observado nos testes experimentais. Para representar os dados experimentais satisfatoriamente, as equações precisam ser ajustadas através da introdução ou adequação de alguns parâmetros, levando em consideração os processos de transferência de massa e movimento das nanopartículas.

Devido a limitações experimentais este trabalho foi desenvolvido em uma faixa de escoamento do aerossol bem diferente das utilizadas em aplicações industriais, onde o regime de escoamento geralmente é turbulento. No entanto, este trabalho mostra que é possível obter ar puro, através do uso do precipitador eletrostático para pequenas vazões de aerossol, podendo ser utilizado em aplicações laboratoriais, onde muitos processos necessitam de escoamento laminar e baixas velocidades de escoamento. Uma interessante aplicação do precipitador eletrostático operando nas condições experimentais deste trabalho é em capelas de fluxo laminar, onde o escoamento é laminar para minimizar a ressuspensão de partículas e o número de partículas em seu interior tem que estar dentro dos limites estabelecidos por normas que variam de acordo com a classe do equipamento. Geralmente esses equipamentos são projetados e fabricados com filtros HEPA para purificação do ar, que necessitam de trocas periódicas e possuem um custo elevado.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o precipitador eletrostático do tipo placa-fio é um equipamento com capacidade para remover partículas nanométricas de um aerossol com elevados valores de eficiência de coleta. É possível obter-se eficiência acima de 99,9% para todas as velocidades estudadas (1 a 10 cm/s).

O campo elétrico necessário para eficiência de coleta acima de 99% mostrou-se dependente da velocidade de escoamento do aerossol. Quanto maior a velocidade de escoamento maior foi o campo elétrico a ser gerado.

Para baixos valores de campo elétrico o precipitador eletrostático apresentou uma remoção preferencial das partículas com diâmetros entre 20 e 75 nm. A maior eficiência para esta faixa de tamanho provavelmente foi decorrente do mecanismo de carregamento das partículas como discutido no capítulo anterior.

A eficiência de coleta do precipitador eletrostático aumentou com a redução do diâmetro das partículas até a faixa de 30 a 20 nm, isso ocorreu devido à maior mobilidade elétrica das partículas menores. Para diâmetros abaixo de 20 nm houve uma queda na eficiência de remoção, provavelmente causada pelo baixo carregamento das partículas.

A velocidade de escoamento não apresentou uma tendência para campo elétrico abaixo de 3,8 kV/cm. Para campos elétricos maiores a eficiência diminuiu com o aumento da velocidade de escoamento e para campo elétrico de 5 kV/cm a eficiência é máxima para todas as velocidades.

O modelo teórico de Deutsch não se ajustou bem aos dados experimentais, a eficiência teórica superestimou a eficiência experimental para a faixa de partículas analisada.

SUGESTÕES

Propõe-se como continuidade deste trabalho:

- Estudar diversos materiais para avaliar se apresentam o mesmo desempenho do material estudado;
- Avaliar dimensões ideais do precipitador eletrostático para aplicações em equipamentos que trabalhem com escoamento laminar;
- Alterar a unidade experimental de modo que seja possível a realização de testes com regime de escoamento turbulento;
- Medir a carga elétrica adquirida pelas nanopartículas durante o processo de carregamento no precipitador eletrostático;
- Estudar o mecanismo de carregamento para cada faixa de diâmetros de partículas;
- Verificar a influência da temperatura no carregamento e coleta das partículas;
- Avaliar outros modelos existentes na literatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA FAPESP, Avanços com supermaterial. Disponível em: <www.agencia.fapesp.br>. Acesso em: 30 jul. 2009.

AGÊNCIA FAPESP, Implantes do futuro. Disponível em: <www.agencia.fapesp.br>. Acesso em: 30 jul. 2009

AGÊNCIA FAPESP, Novo método para obter nanofibras. Disponível em: <www.agencia.fapesp.br>. Acesso em: 30 jul. 2009.

AITKEN, R. J.; CREELY, K. S.; TRAN, C.L. Nanoparticles: an occupational hygiene review. Research Report 274. Institute of Occupational Medicine, 2004.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N., Fenômenos de transporte, 2ªed, LTC Editora, Rio de Janeiro, 838 p, 2004.

CETESB. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. Qualidade do ar. Disponível em: <www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em 05 mai. 2009.

CHEN, D. R.; PUI, D. Y. H.; HUMMES, D.; FISSANT, H.; QUANT, F. R; SEM, G. J., Design and evaluation of a nanometer aerosol differential mobility analyzer (Nano-DMA). Journal Aerosol Science, v.29, nº5/6, p. 497-509, 1998.

COOPERMAN, G., A unified efficiency theory for electrostatic precipitators, Journal Atmospheric Environmental, v. 18, nº2, p. 277-285, 1984.

DAVIES, R., Particle science and technology - a view at the millennium, Powder Technology, v. 119, p. 45-57, 2001

DERBYSHIRE, E., Natural aerosolic mineral dusts and human health. In: Selinus, B., Alloway, B., Centeno, J.A., Finkelman, R.B., Ruge, R., Lindh, U., Smedley, P. (Eds.), Essentials of Medical Geology. Elsevier Academic Press, London, p. 459–480 (Chapter 18), 2005.

- DONALDSON, K.; LI, X. Y., MacNEE, W., Ultrafine (nanometre) particle mediated lung injury, *Journal Aerosol Science*, v. 29, n° 5/6, p. 553-560, 1998.
- DULLIEN, F. A. L., Introduction to industrial gas cleaning, Academic Press, Inc. San Diego, 285 p, 1989.
- FALAGUASTA, M. C. R., Estudo do desempenho de um precipitador eletrostático operando na captura de partículas submicrométricas e nanométricas, Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 305 p, 2005.
- FEITOSA, N. R., Desempenho de meios filtrantes na remoção de partículas nanométricas de aerossóis, Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 136 p, 2009.
- FLAGAN, R. C.; SEINFELD, J. H., Fundamentals of air pollution engineering, Prentice Hall, Englrwoods Cliffs, New Jersey, 1988.
- FUCHS, N. A., The mechanics of aerosol, Dover Publications Inc., Toronto, 408 p, 1964.
- HINDS, W. C. Aerosol Technology: properties, behavior and measurement of airborne particles. 2. ed., New York: John Willey & Sons, 483 p, 1999.
- HUANG, S-H.; CHEN, C-C., Filtration characteristics of a miniature electrostatic precipitator, *Aerosol Science and Technology*, v. 35, p. 792-804, 2001.
- HUANG, S-H.; CHEN, C-C., Ultrafine Aerosol Penetration through Electrostatic Precipitators, *Environmental Science and Technology*, v. 36, p. 4625-4632, 2002.
- INTERNATIONAL STANDARTS ORGANIZATION (ISO), Occupational ultrafine aerosol exposure characterization and assessment. Draft technical report number 6. Particle size selective sampling and analysis (workplace air quality). ISO/TC146/SC2WG1, 2004.
- INTRA, P.; Tippayawong, N., Progress in unipolar corona discharger designs for airborne particle charging: A literature review, *Journal of Electrostatics*, p. 1-11, 2009.

- JEDRUSIK, M.; SWIERCZOK, A.; MODZEL, P., Migration velocity and visualization of the trajectory of fly ash particles inside an electrostatic precipitator, *Journal of Electrostatic*, v. 44, p. 77-84, 1998.
- KANAZAWA, S.; OHKUBO, T.; NOMOTO, Y.; ADACHI, T., Submicron particle agglomeration and precipitation by using a bipolar charging method, *Journal of Electrostatic*, v. 29, p. 193-209, 1993.
- KIM, S. H.; PARK, H. S.; LEE, K. W., Theoretical model of electrostatic precipitator performance for collecting polydisperse particles, *Journal of Electrostatics*, v. 50, p. 177-190, 2001.
- KITTELSON, D. B., Engines and nanoparticles: a review, *Journal of Aerosol Science*, v. 29, n° 5/6, p. 575-588, 1998.
- LACKOWSKI, M., Unipolar charging of aerosol particles in alternating electric field, *Journal of Electrostatic*, v. 51, p. 225-231, 2001.
- LAITINEN, A.; HAUTANEN, J.; KESKINEN, J.; KAUPPINEN, E.; JOKINIEMI, J.; LEHTINEN, K., Bipolar charged aerosol agglomeration with alternating electric field in laminar gas flow, *Journal of Electrostatic*, v. 38, p. 303-315, 1996.
- LEONARD, G.; MITCHNER, M.; SELF, S. A., Particle transport in electrostatic precipitators, *Journal Atmospheric Environmental*, v. 14 p. 1289-1299, 1980
- LI, Z.; WANG, H., Drag force, diffusion coefficient, and electric mobility of small particles. I. Theory applicable to the free-molecule regime, *Physical Review E*, The American Physical Society, v. 68, p. 061206-1-11, 2003a.
- LI, Z.; WANG, H., Drag force, diffusion coefficient, and electric mobility of small particles. II. Application, *Physical Review E*, v. 68, p. 061207-1-13, 2003b.
- LIDE, D. R., *CRC Handbook of chemistry and physics*, CRC Press, 18 ed., New York, 1997.
- LIU, B. Y. H.; LEE, K. W., An aerosol generator of high stability, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, v. 36, p. 861-865, 1975.

- MILLER, J.; HOFERER, B., SCHWAB, A. J., The impact of corona electrode configuration on electrostatic precipitator performance, *Journal of Electrostatic*, v. 44, p. 67-75, 1998.
- MIZUNO, A., Electrostatic precipitators, *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*, v. 7, nº5, p. 615-624, 2000.
- MURR, L. E.; GARZA, K. M., Natural and anthropogenic environmental nanoparticles: Their microstructural characterization and respiratory health implications, *Atmospheric Environment*, p. 1-10, 2009.
- Nanox® Tecnologia S. A, disponível em: <www.nanox.com.br>. Acesso em 05 mai. 2009.
- NÓBREGA, S. W., Estudo do desempenho de um precipitador eletrostático do tipo placa-fio na remoção de um material particulado polidisperso, Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 166 p, 2002.
- OBARDÖRSTER, G., Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, v. 74, p. 1–8, 2001.
- OBARDÖRSTER, G., Significance of particle parameters in the evaluation of exposure-dose relationships of inhaled particles. *Inhalation Toxicol.* 8 (Suppl.), p. 73–90, 1996.
- OGLESBY, S. Jr.; NICHOLS, G. B., *Electrostatic Precipitation*, New York, Marcel Dekker INC., 367 p, 1978.
- PARKER, K. R., *Applied electrostatic precipitation*, Chapman & Hall, 521 p, 1997.
- PARKER, K. R., *Electrical operation of electrostatic precipitators*, Institution of Electrical Engineers, 270 p, 2003.
- PIMENTEL, D.; COOPERSTEIN, S.; RANDELL, H.; FILIBERTO, D.; SORRENTINO, S.; KAYE, B.; et al., Ecology of increasing diseases: population growth and environmental degradation. *Human Ecology*, v.35 (6), p. 653–668, 2007.

- PUI, D.Y.H; CHEN, D.R., Nanometer particles: a new frontier for multidisciplinary research. *Journal of Aerosol Science*, v.28, nº 4, p. 539 – 554, 1997.
- QUINA, F. H., Nanotecnologia e o meio ambiente: perspectivas e riscos. Carta ao editor: *Química Nova*, v.27,n.6, p.1028-1029, 2004.
- RHIELE, C., Basic and theoretical operation of ESPs, in: PARKER, K. R., *Applied Electrostatic Precipitation*, London, Chapman & Hall, 1997.
- SILLANPÄÄ, M.; GELLER, M. D.; PHULERIA, H. C.; SIOUTAS, C., High collection efficiency electrostatic precipitator for in vitro cellexposure to concentrated ambient particulate matter (PM), *Journal of Aerosol Science*, v. 39, p. 335-347, 2008.
- STEFFENS, J., Desempenho de filtros fibrosos operando na remoção de partículas nanométricas de aerossóis, Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 206 p, 2007.
- STRAUSS, W., *Industrial gas cleaning*, 2ª ed., Pergamon Press, 1975.
- TEPPER, G.; KESSICK, R., A study of ionization and collection efficiencies in electrospray-based electrostatic precipitators, *Journal of Aerosol Science*, v. 39, p. 609-617, 2008.
- TSI INCORPORATED. Disponível em: <www.tsi.com>. Acesso em: 30 jul. 2009.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S.EPA), *Air Quality Criteria for Particulate Matter*, v. 2, 2004.
- WATANABE, T.; TOCHIKUBO, F., KOIZUMI, Y.; TSUCHIDA, T; HAUTANEN, J. KAUPPINEN, E. I., Submicron particle agglomeration by an electrostatic agglomerator, *Journal of Electrostatic*, v. 34, p. 367-383, 1995.
- WHITE, H. J., *Industrial Electrostatic Precipitation*, Addison-Wesley, 1963.
- ZHIBIN, Z.; GUOQUAN, Z., New model of electrostatic precipitation efficiency accounting for turbulent mixing, *Journal Aerosol Science*, v. 23, nº 2, p. 115-121, 1992.

ZHIQIANG, Q.; SIEGMANN, K.; KELLER, A.; MATTER, U.; SCHERRER, L.; SIEGMANN, H. C., Nanoparticle air pollution in major cities and its origin, *Atmospheric Environment*, v. 34, p. 443-451, 2000.

ZHUANG, Y; KIM, Y. J.; LEE, T. G.; BISWAS, P., Experimental and theoretical studies of ultrafine particle behavior in electrostatic precipitators, *Journal of Electrostatics*, v. 48, p. 245-260, 2000.

ZURAIMI, M. S., THAM, K. W., Reducing particle exposures in a tropical office building using electrostatic precipitators, *Building and Environment*, 2009.

APÊNDICE A

Medidas de concentração de partículas antes e após a passagem do aerossol pelo precipitador eletrostático.

As Figuras A.1 a A.19 apresentam as curvas de distribuição de partículas para cada diâmetro antes e após a passagem do aerossol pelo precipitador eletrostático não apresentadas no Capítulo 4.

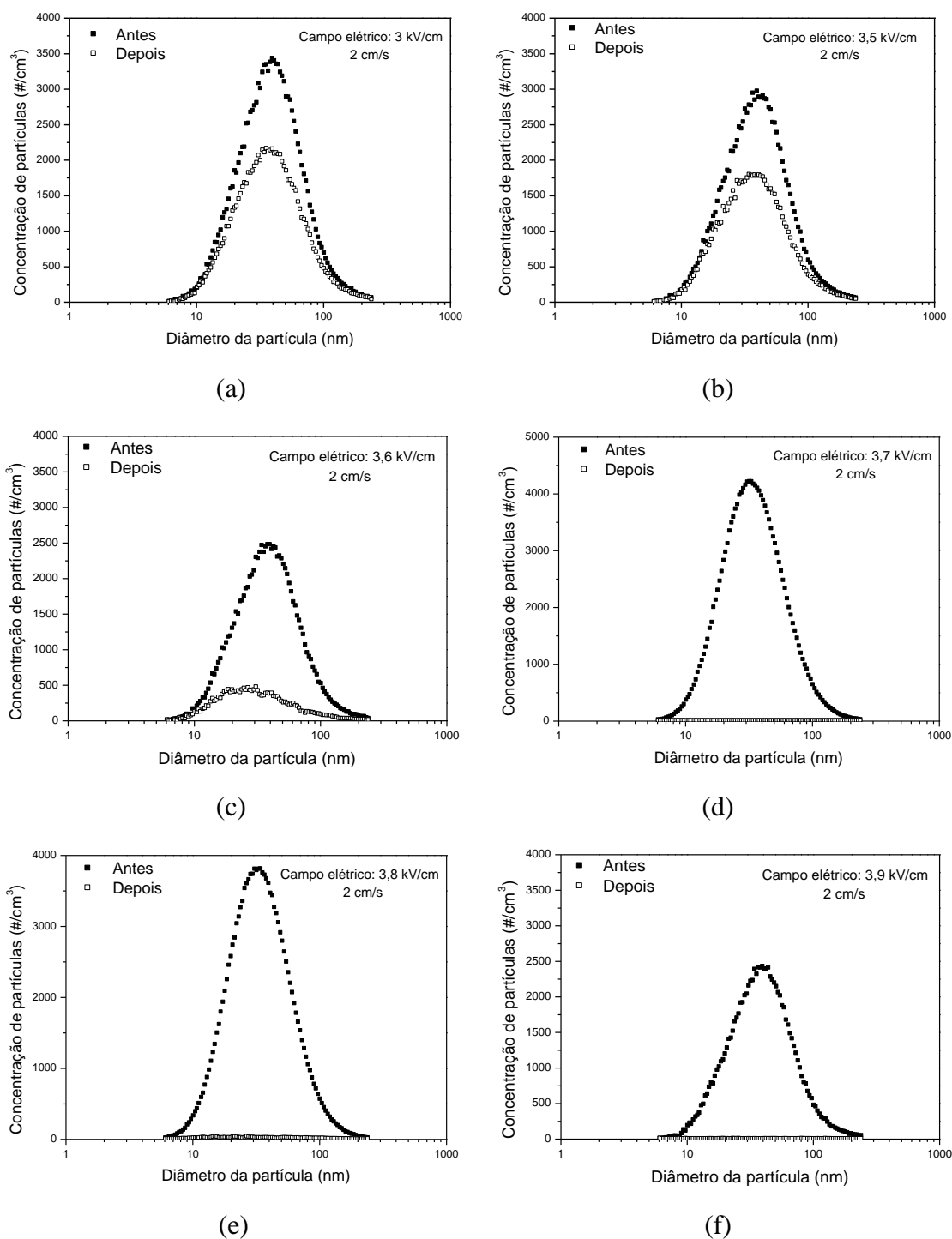


Figura A.1 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 2 cm/s: (a) 3 kV/cm; (b) 3,5 kV/cm; (c) 3,6 kV/cm; (d) 3,7 kV/cm; (e) 3,8 kV/cm e (f) 3,9 kV/cm.

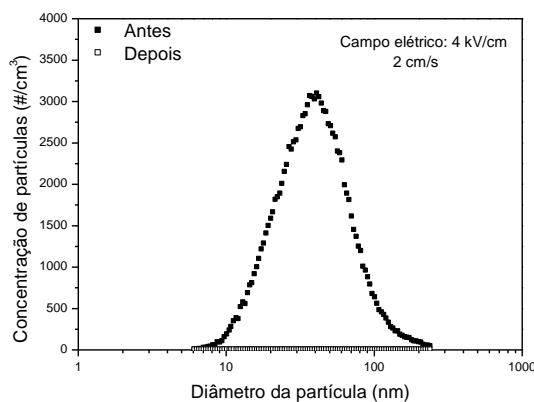
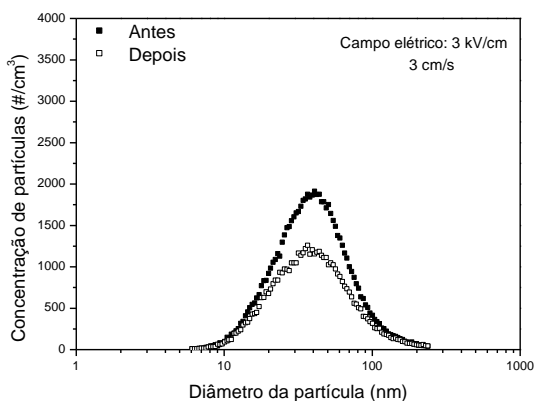
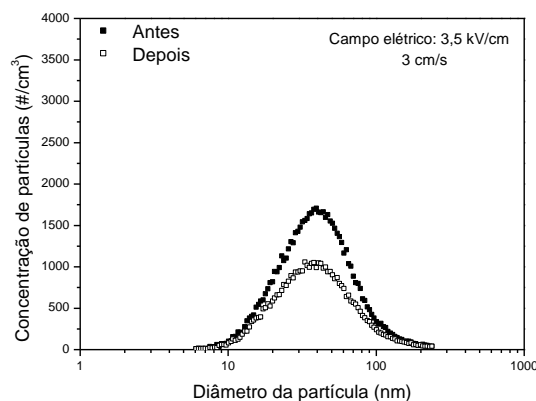


Figura A.2 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 2 cm/s e 4 kV/cm.

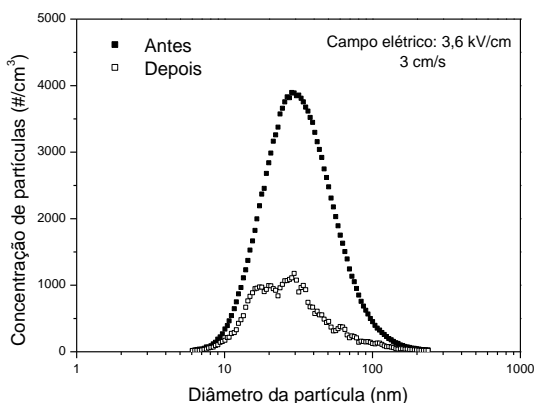
Velocidade de 3 cm/s.



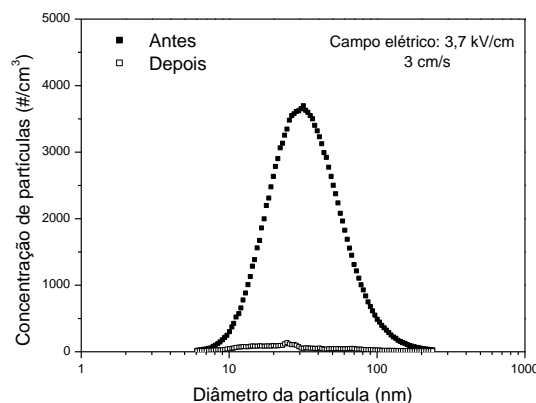
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura A.3 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 3 cm/s: (a) 3 kV/cm; (b) 3,5 kV/cm; (c) 3,6 kV/cm e (d) 3,7 kV/cm.

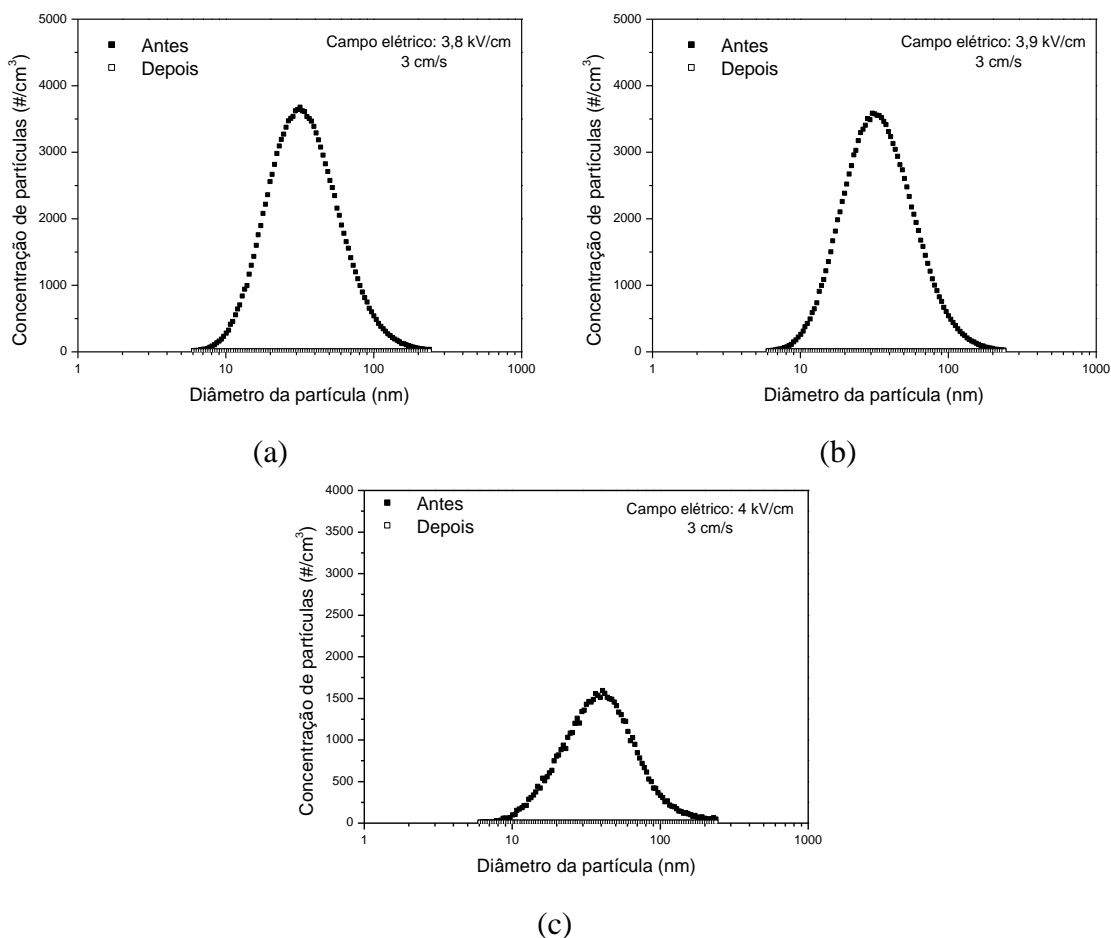


Figura A.4 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 3 cm/s: (a) 3,8 kV/cm; (b) 3,9 kV/cm e (c) 4 kV/cm.

Velocidade de 4 cm/s

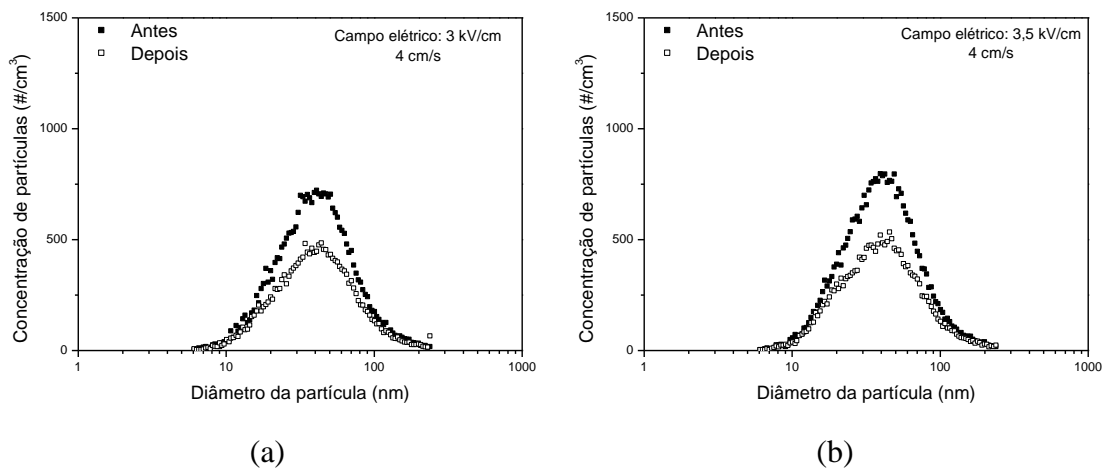
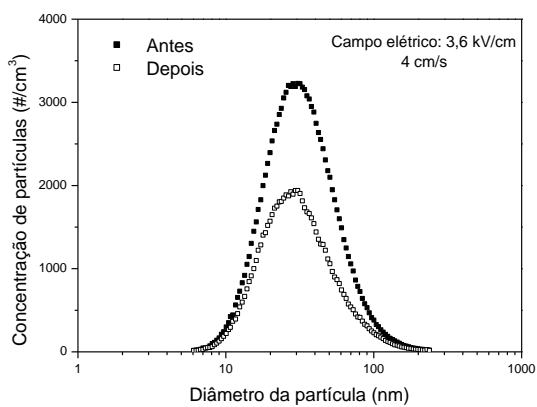
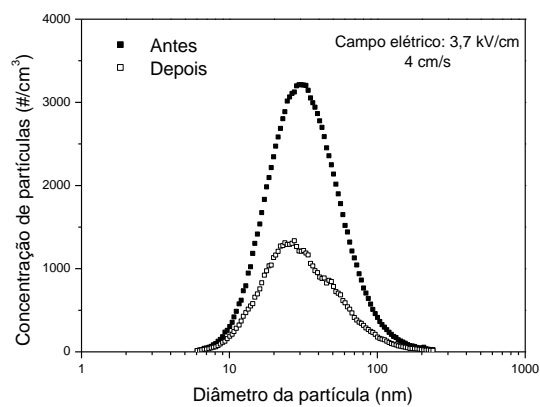


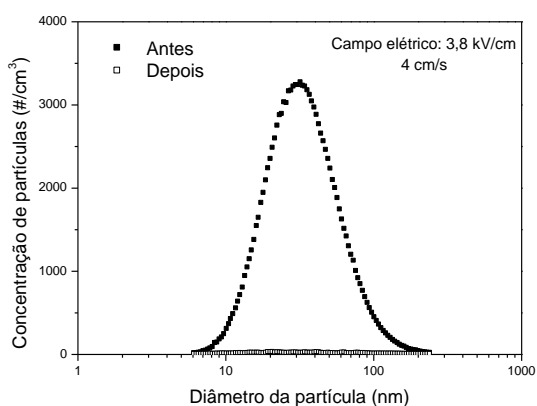
Figura A.5 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 4 cm/s: (a) 3 kV/cm e (b) 3,5 kV/cm.



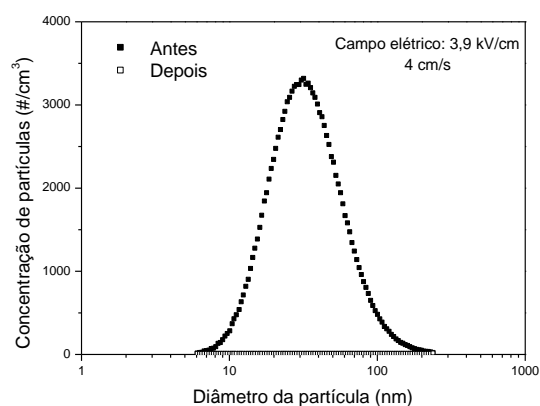
(a)



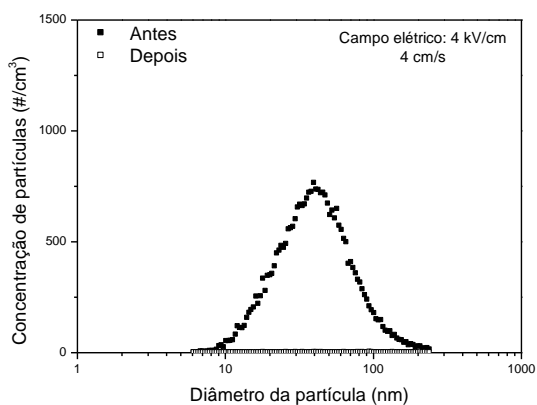
(b)



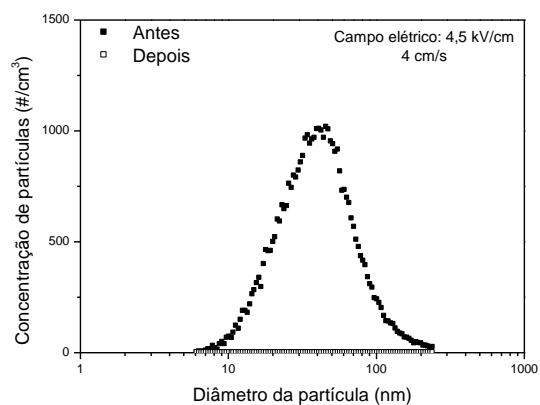
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura A.6 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 4 cm/s: (a) 3,6 kV/cm; (b) 3,7 kV/cm; (c) 3,8 kV/cm; (d) 3,9 kV/cm; (e) 4 kV/cm e (f) 4,5 kV/cm.

Velocidade de 5 cm/s.

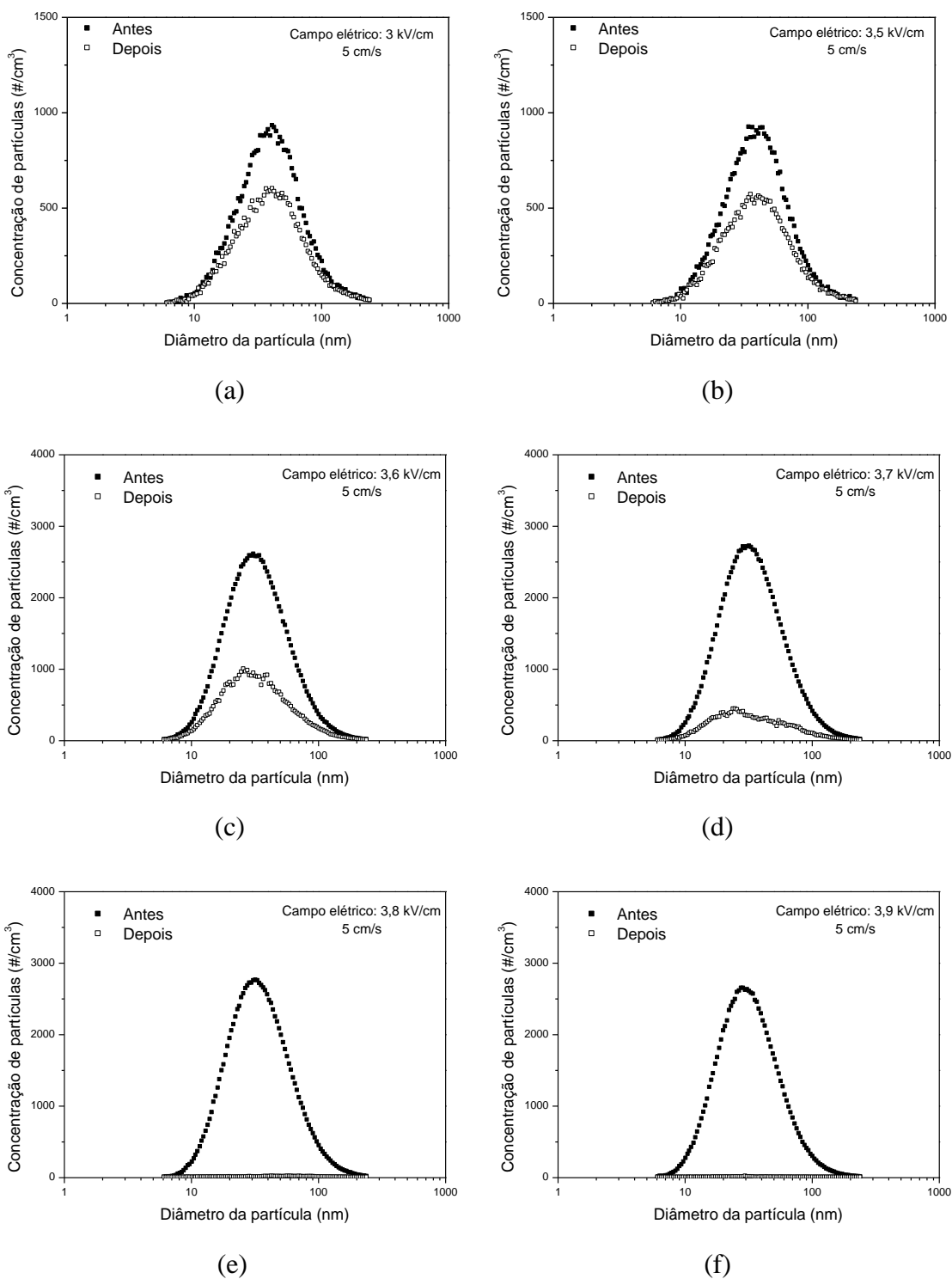
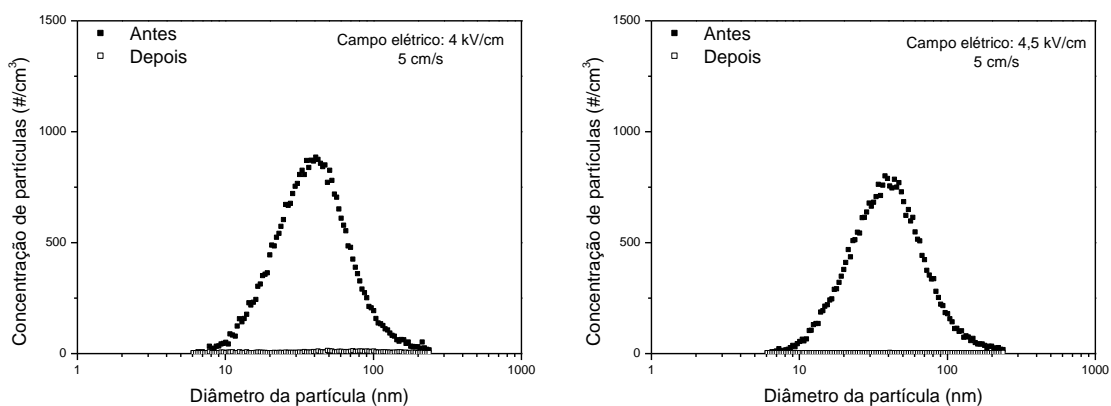


Figura A.7 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 5 cm/s: (a) 3 kV/cm; (b) 3,5 kV/cm; (c) 3,6 kV/cm; (d) 3,7 kV/cm; (e) 3,8 kV/cm e (f) 3,9 kV/cm.

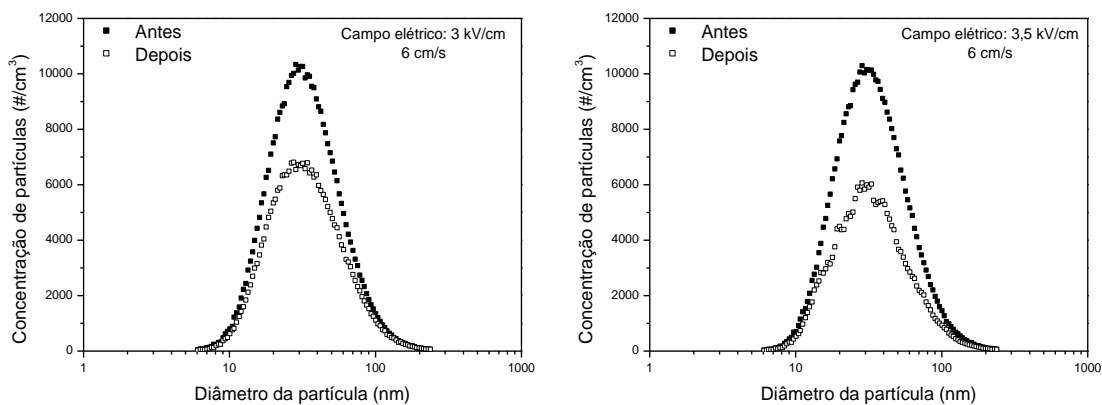


(a)

(b)

Figura A.8 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 5 cm/s: (a) 4 kV/cm e (b) 4,5 kV/cm.

Velocidade de 6 cm/s.



(a)

(b)

Figura A.9 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 6 cm/s: (a) 3 kV/cm e (b) 3,5 kV/cm.

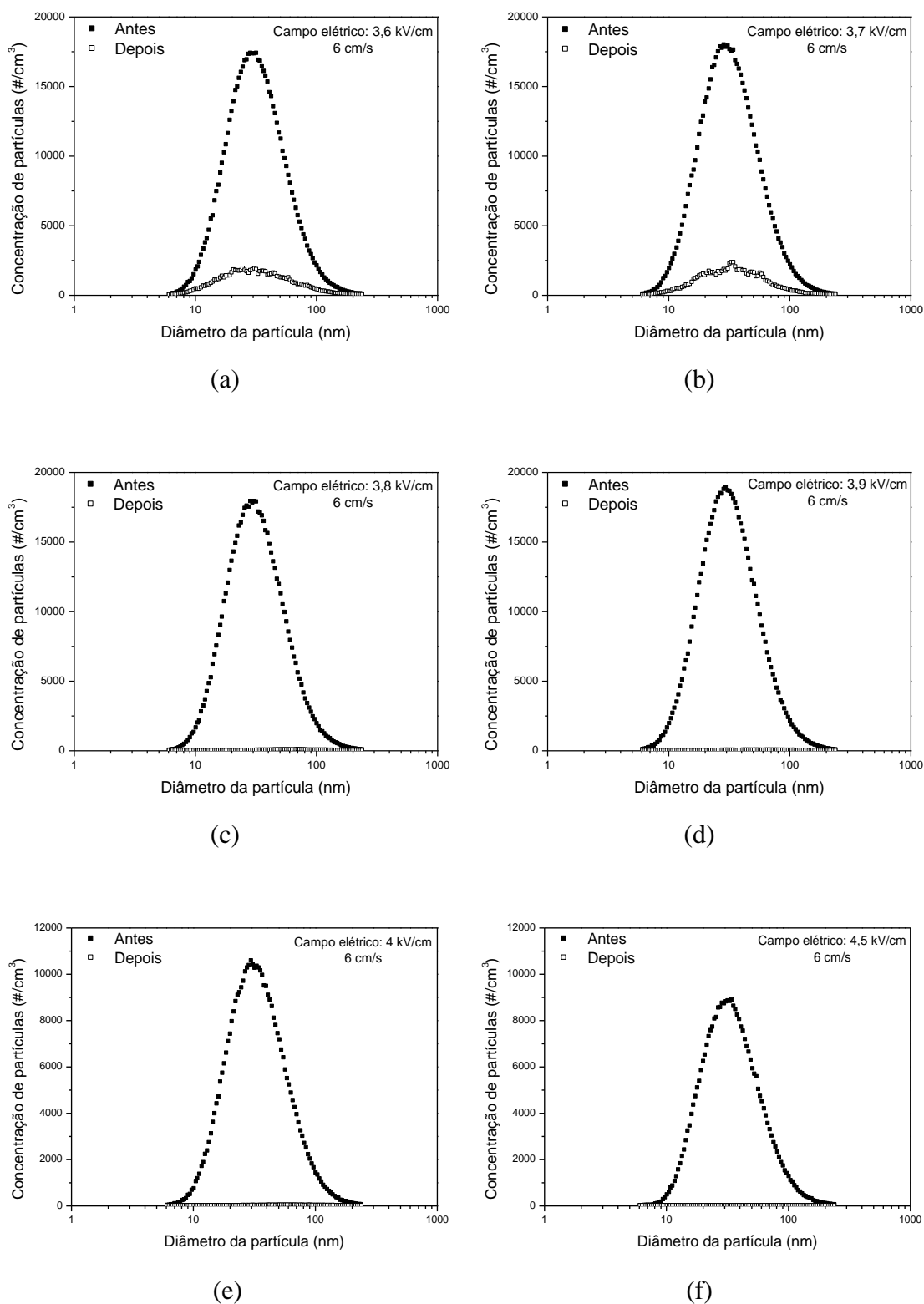


Figura A.10 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 6 cm/s: (a) 3,6 kV/cm; (b) 3,7 kV/cm; (c) 3,8 kV/cm; (d) 3,9 kV/cm; (e) 4 kV/cm e (f) 4,5 kV/cm.

Velocidade de 7 cm/s.

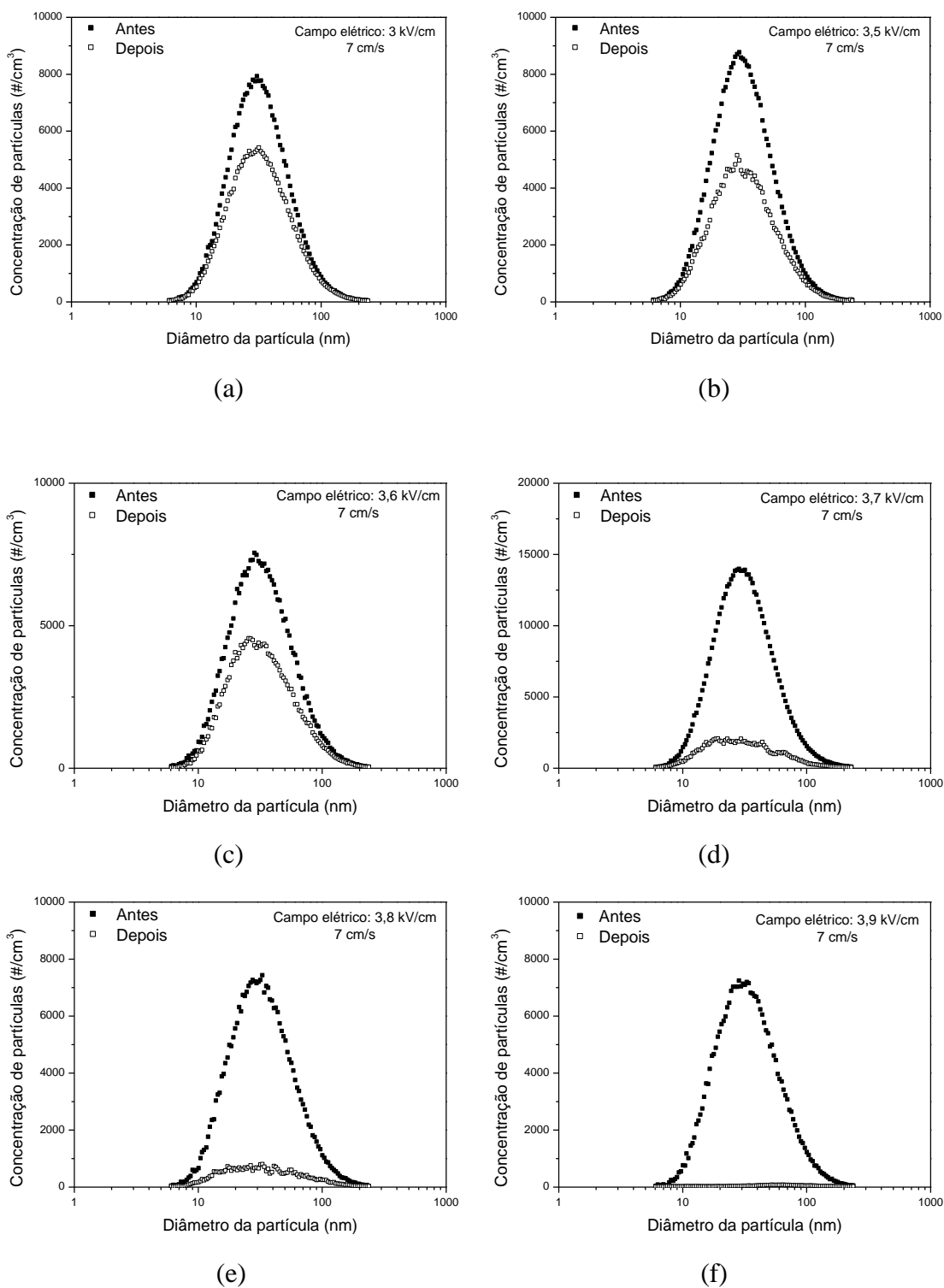


Figura A.11 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 7 cm/s: (a) 3 kV/cm; (b) 3,5 kV/cm; (c) 3,6 kV/m; (d) 3,7 kV/cm; (e) 3,8 kV/cm e (f) 3,9 kV/cm.

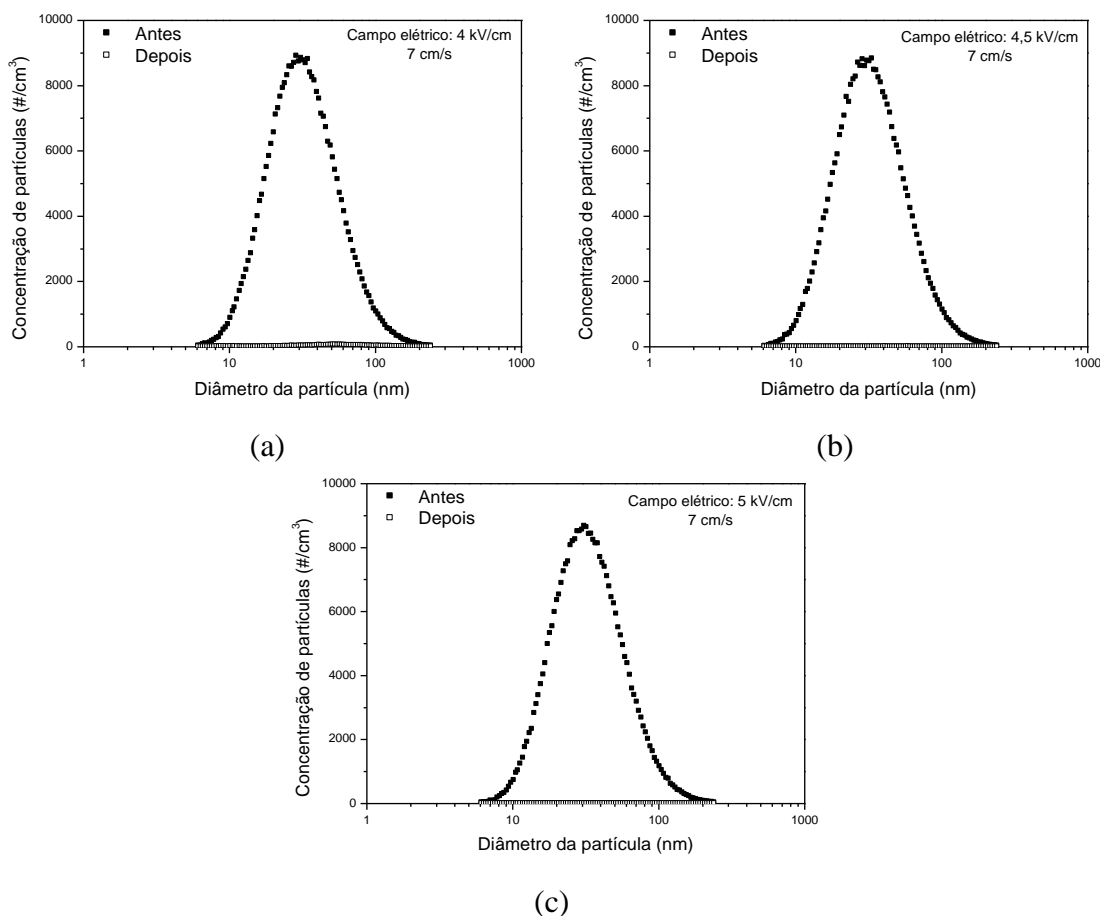


Figura A.12 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 7 cm/s: (a) 4 kV/cm; (b) 4,5 kV/cm e (c) 5 kV/cm.

Velocidade de 8 cm/s.

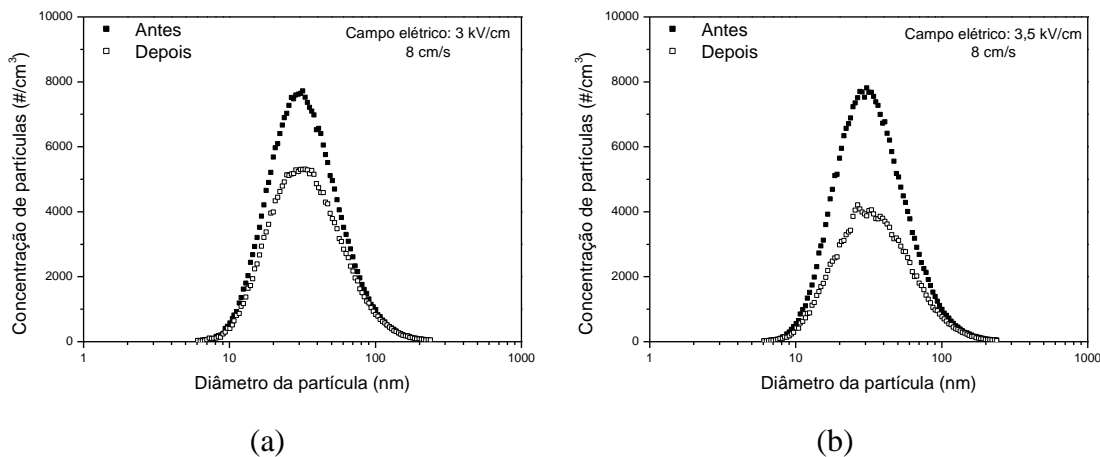


Figura A.13 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 8 cm/s: (a) 3 kV/cm e (b) 3,5 kV/cm.

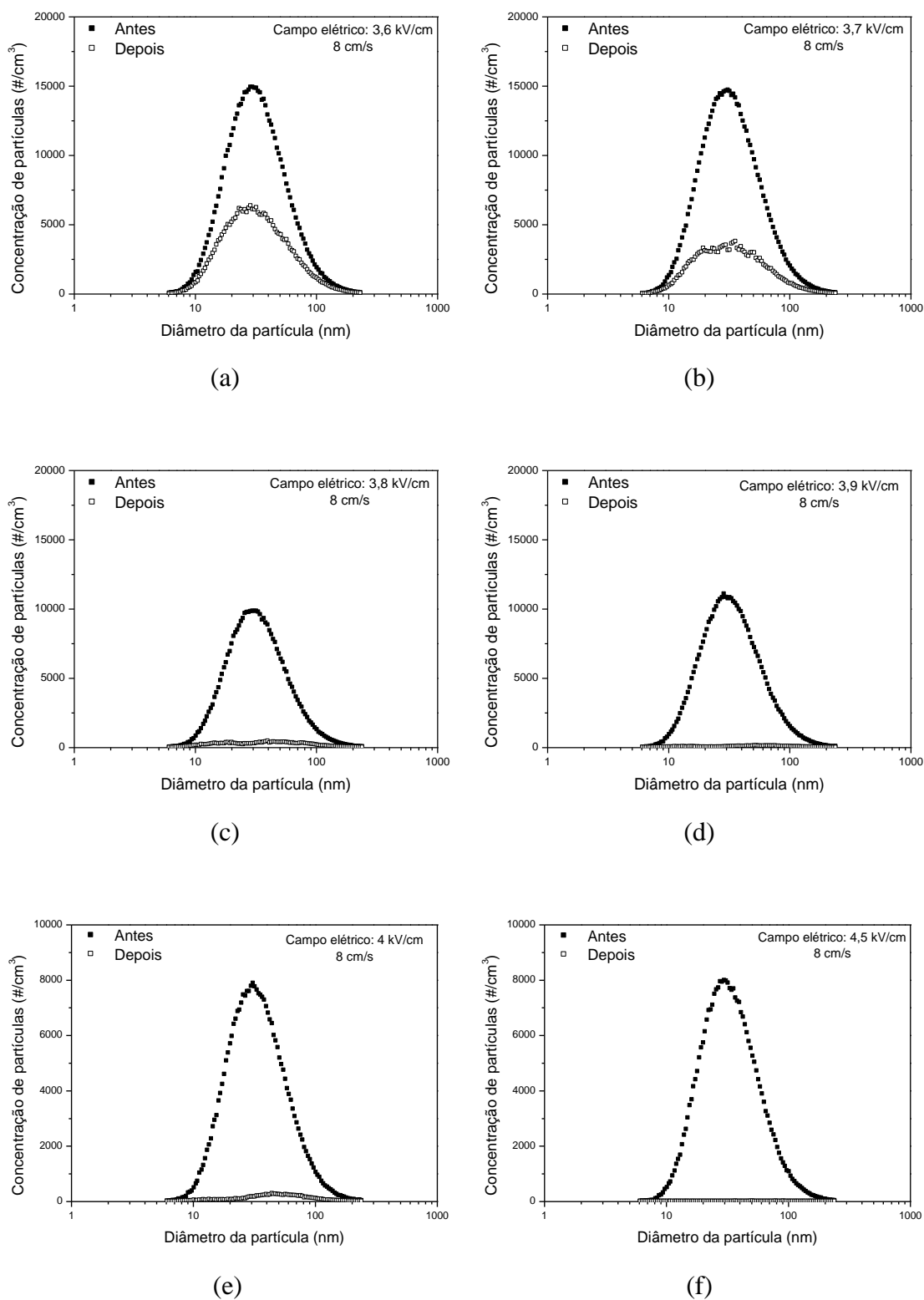


Figura A.14 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 8 cm/s: (a) 3,6 kV/cm, (b) 3,7 kV/cm, (c) 3,8 kV/cm, (d) 3,9 kV/cm, (e) 4 kV/cm e (f) 4,5 kV/cm.

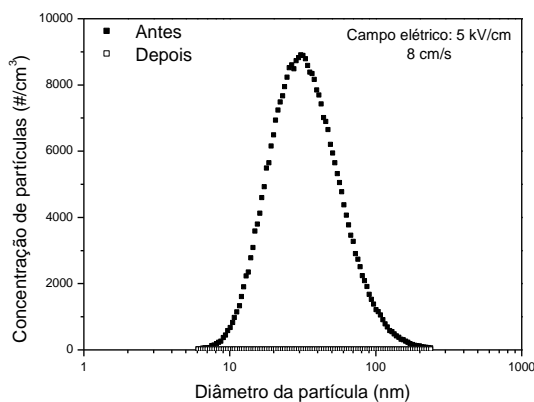
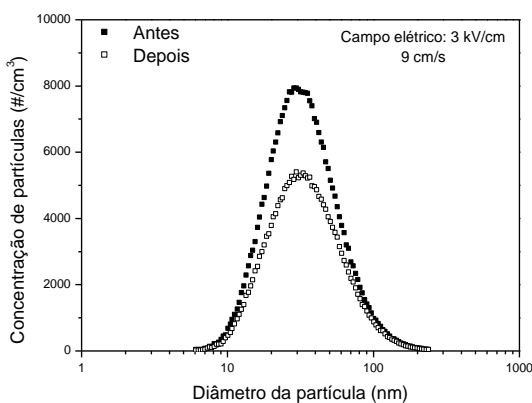
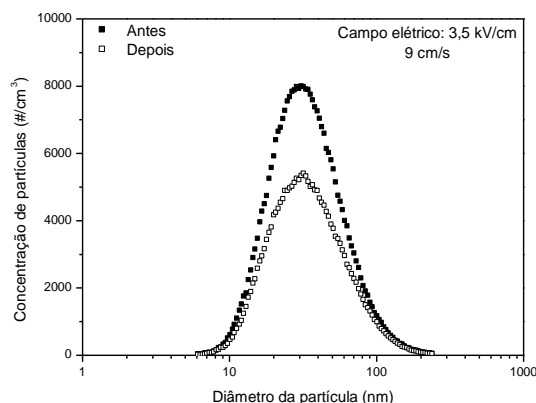


Figura A.15 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 8 cm/s e 5 kV/cm.

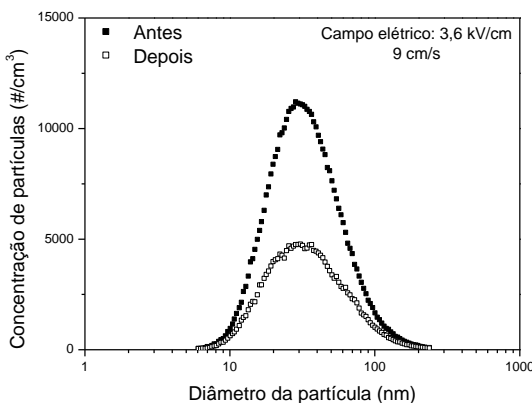
Velocidade de 9 cm/s.



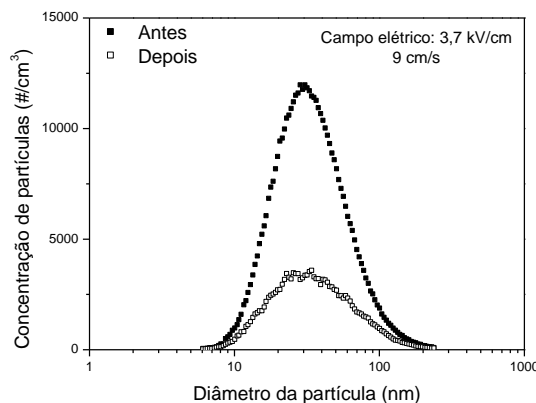
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura A.16 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 9 cm/s: (a) 3 kV/cm, (b) 3,5 kV/cm, (c) 3,6 kV/cm e (d) 3,7 kV/cm.

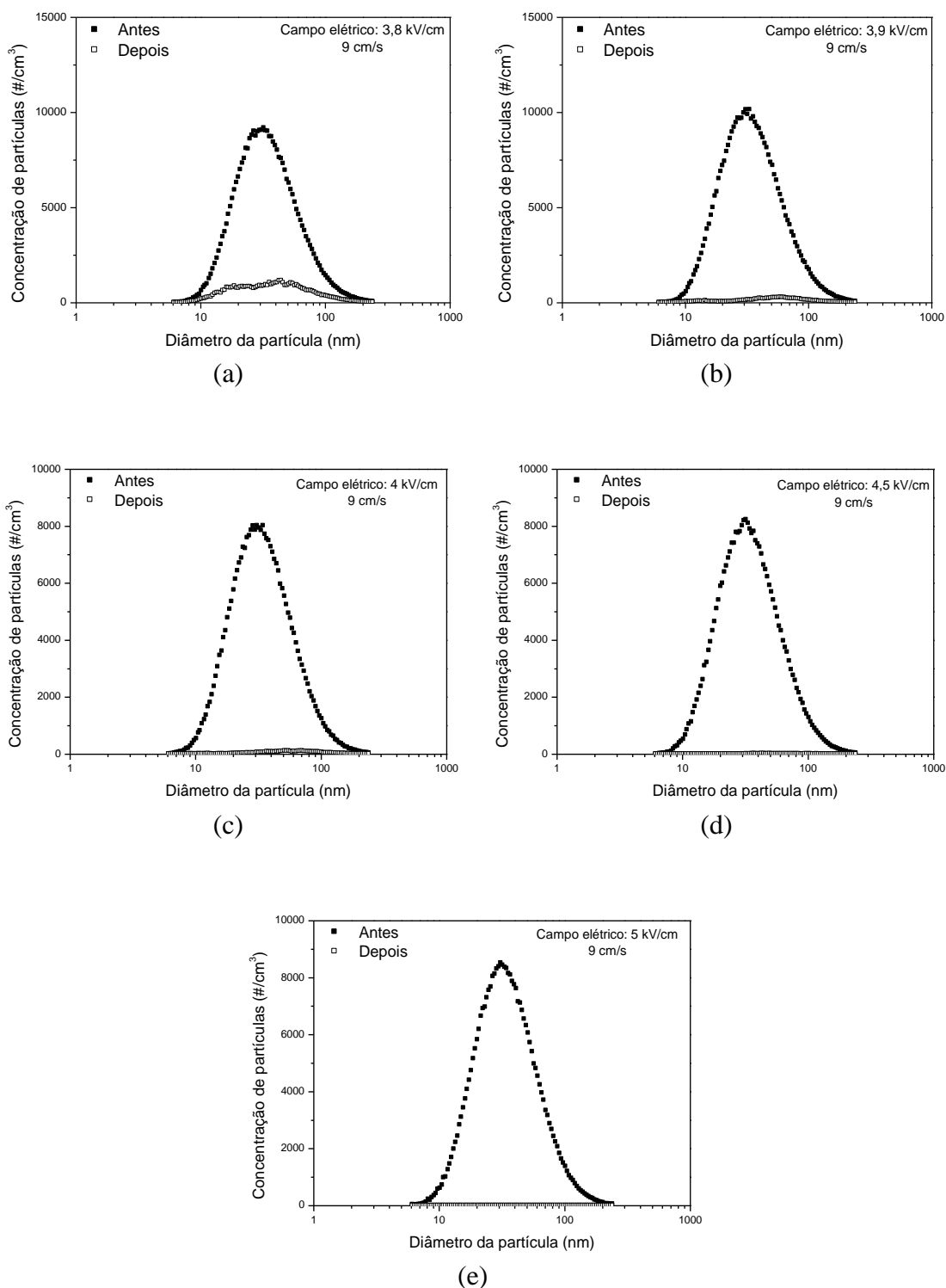


Figura A.17 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 9 cm/s: (a) 3,8 kV/cm; (b) 3,9 kV/cm; (c) 4 kV/cm; (d) 4,5 kV/cm e (e) 5 kV/cm.

Velocidade de 10 cm/s.

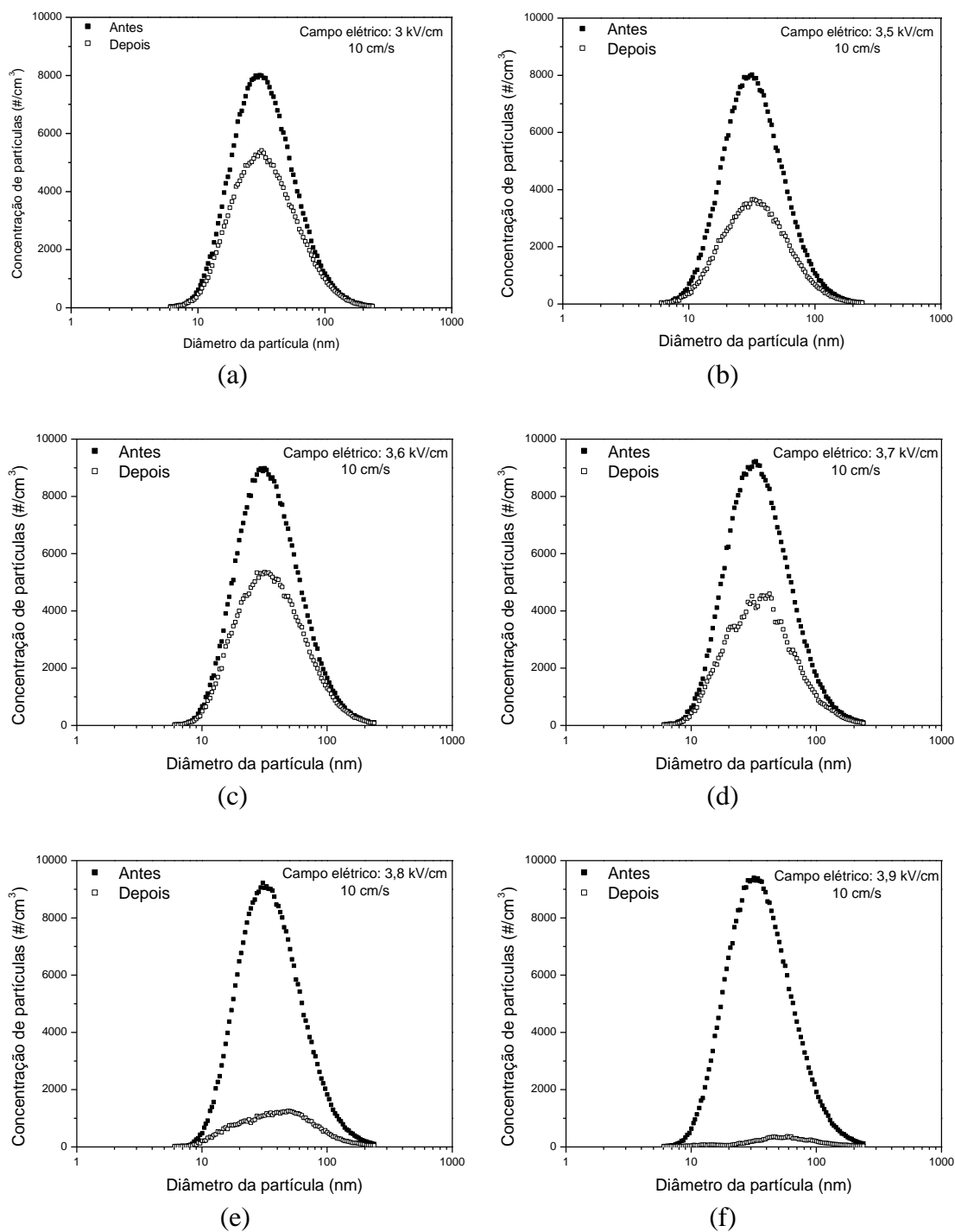


Figura A.18 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 10 cm/s: (a) 3 kV/cm, (b) 3,5 kV/cm, (c) 3,6 kV/cm, (d) 3,7 kV/cm, (e) 3,8 kV/cm e (f) 3,9 kV/cm.

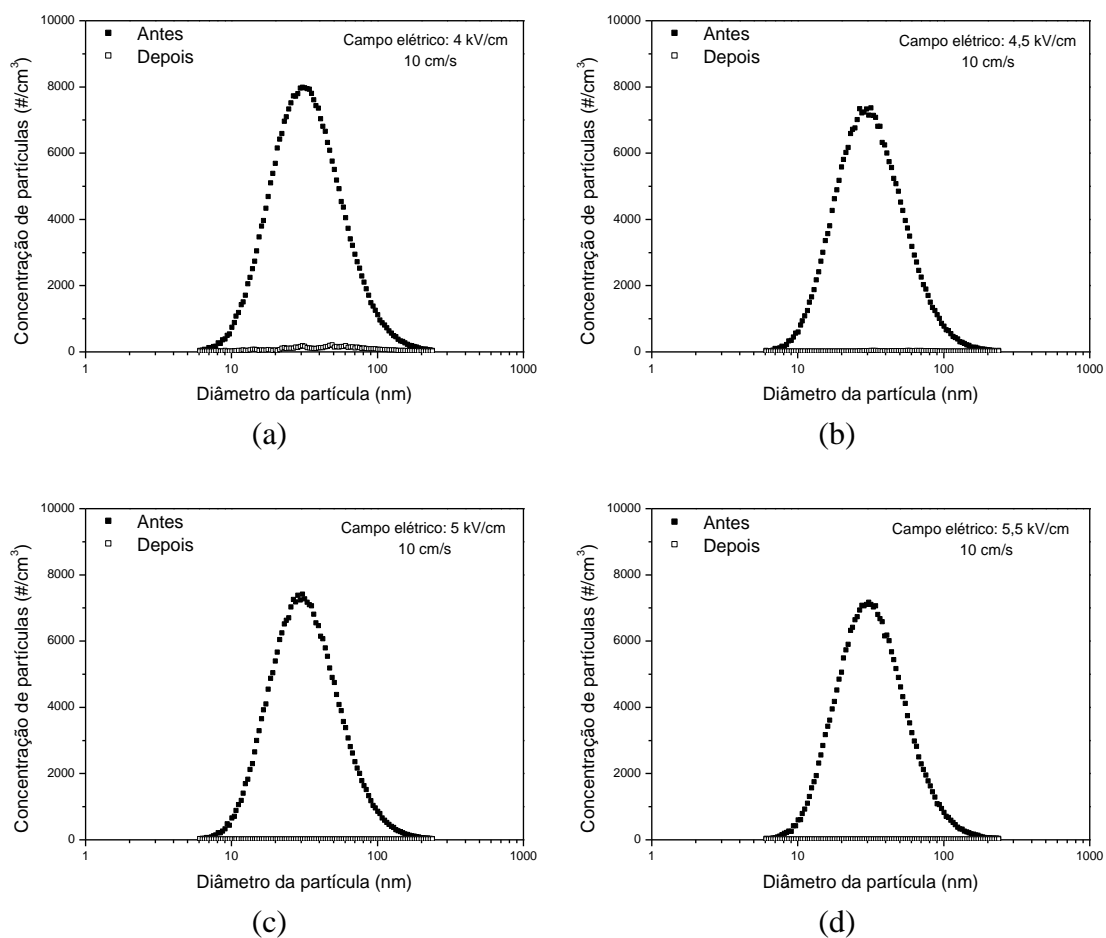


Figura A.19 - Concentração de partículas por diâmetro para a velocidade de 10 cm/s: (a) 4 kV/cm, (b) 4,5 kV/cm, (c) 5 kV/cm e (d) 5,5 kV/cm.

APÊNDICE B

Eficiências Fracionárias Acima de 99,9%

A Figura B.1 apresenta as curvas de eficiência fracionária para o campo elétrico de 4 kV/cm.

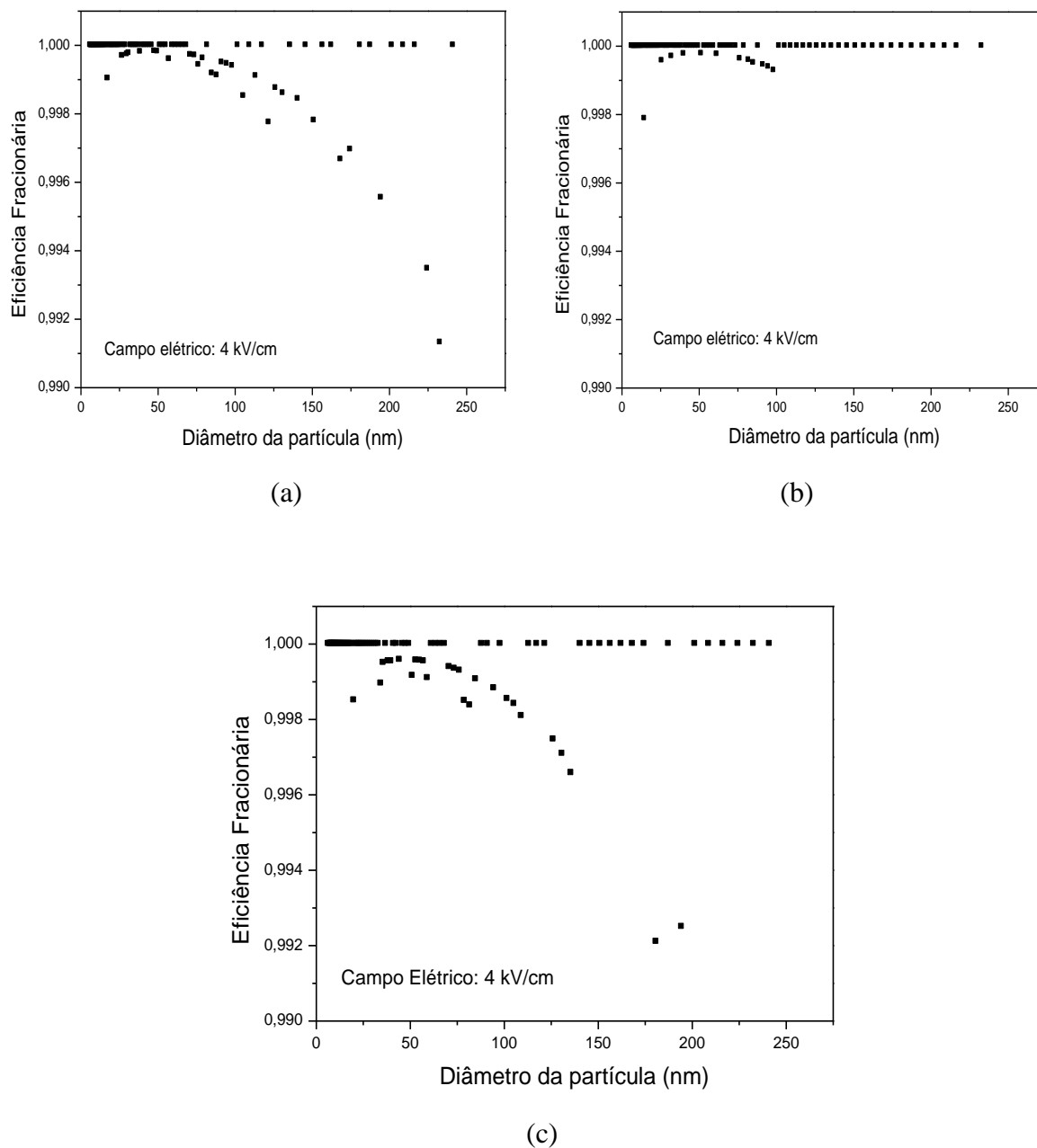
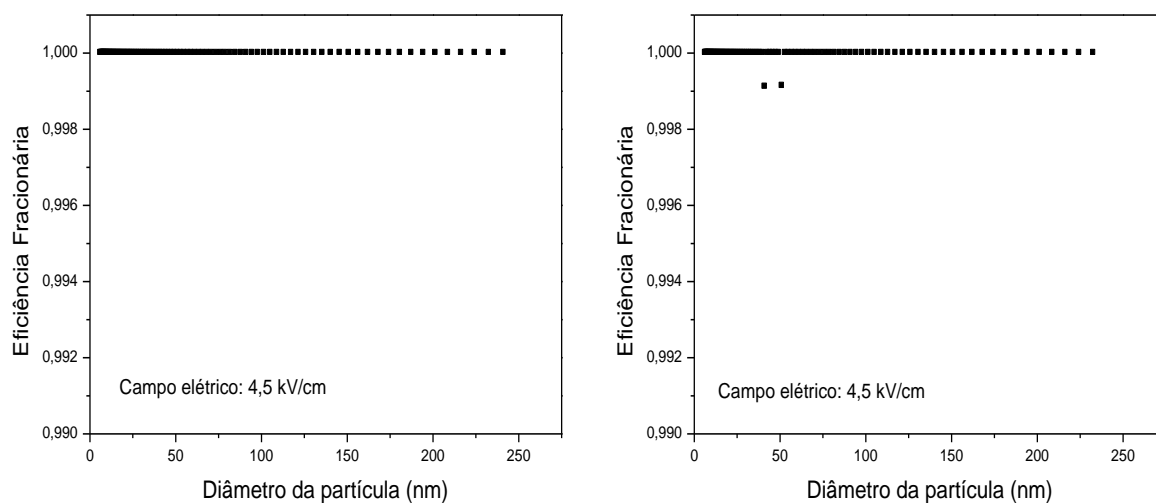


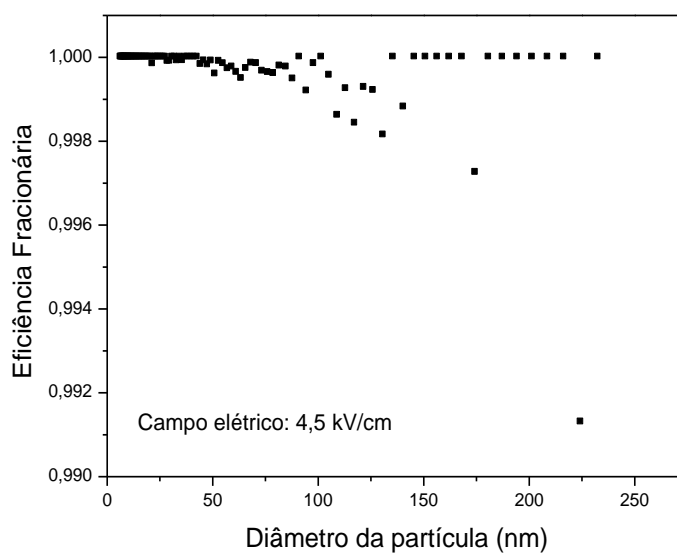
Figura B.1 – Eficiência fracionária para campo elétrico de 4 kV/cm: (a) $v = 1$ cm/s; (b) $v = 2$ cm/s e (c) $v = 3$ cm/s.

A Figura B.2 apresenta as curvas de eficiência fracionária para o campo elétrico de 4,5 kV/cm.



(a)

(b)



(c)

Figura B.2 – Eficiência fracionária para campo elétrico de 4,5 kV/cm: (a) $v = 4$ cm/s; (b) $v = 5$ cm/s e (c) $v = 6$ cm/s.

A Figura B.3 apresenta as curvas de eficiência fracionária para o campo elétrico de 5 kV/cm.

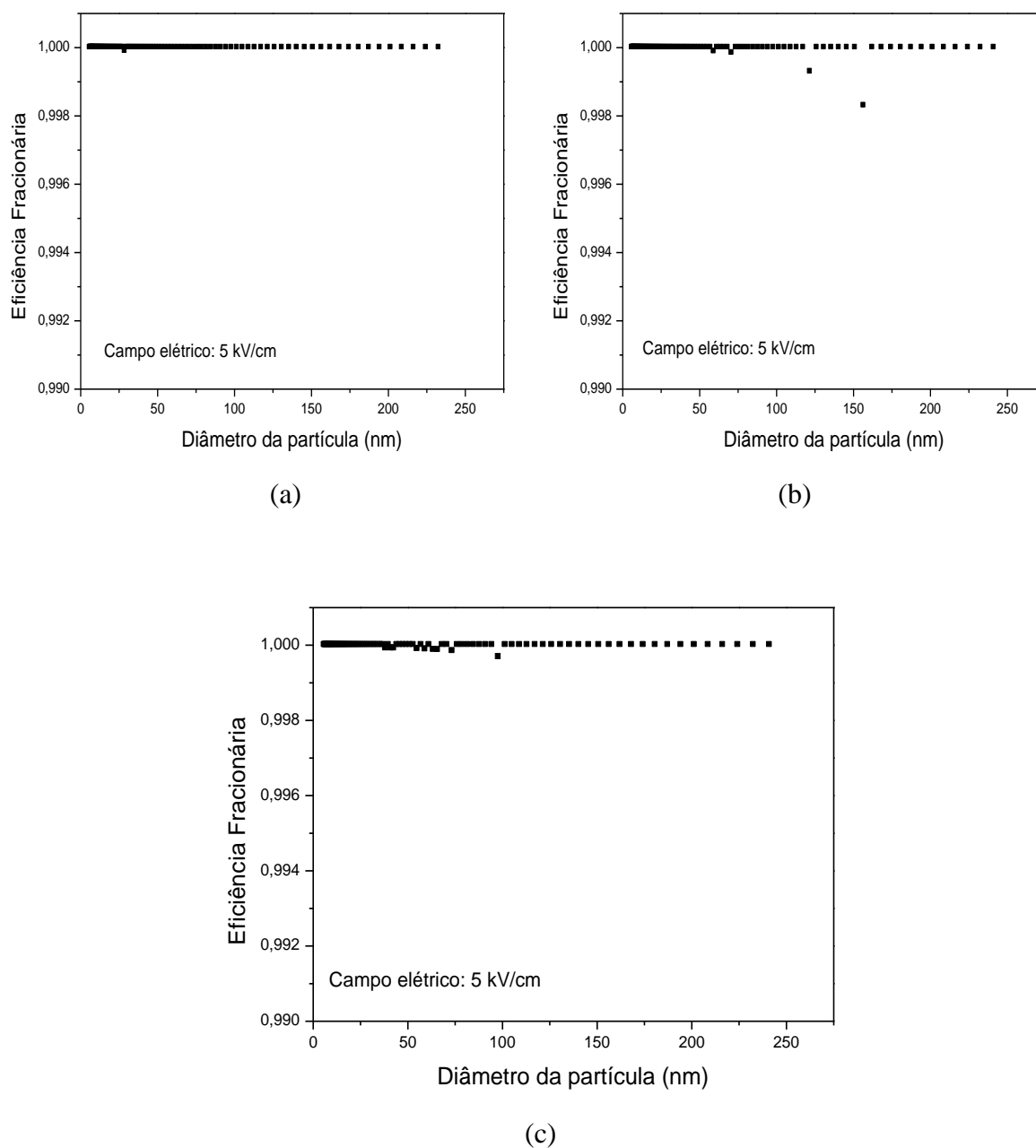
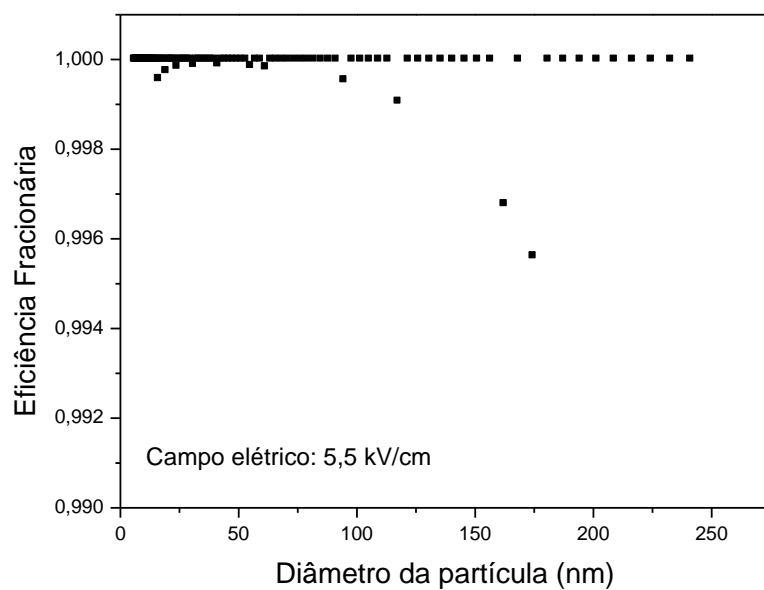


Figura B.3 – Eficiência fracionária para campo elétrico de 5 kV/cm: (a) $v = 7$ cm/s; (b) $v = 8$ cm/s e (c) $v = 9$ cm/s.

A Figura B.4 apresenta a curva de eficiência fracionária para o campo elétrico de 5,5 kV/cm.



(a)

Figura B.4 – Eficiência fracionária para campo elétrico de 5,5 kV/cm e $v = 10$ cm/s.

APÊNDICE C

Comportamento da Eficiência Fracionária em função da Velocidade de Escoamento

As Figuras C.1 e C.2 apresentam as curvas de eficiência fracionária, em função da velocidade de escoamento para os campos elétricos estudados, não apresentadas no Capítulo 4.

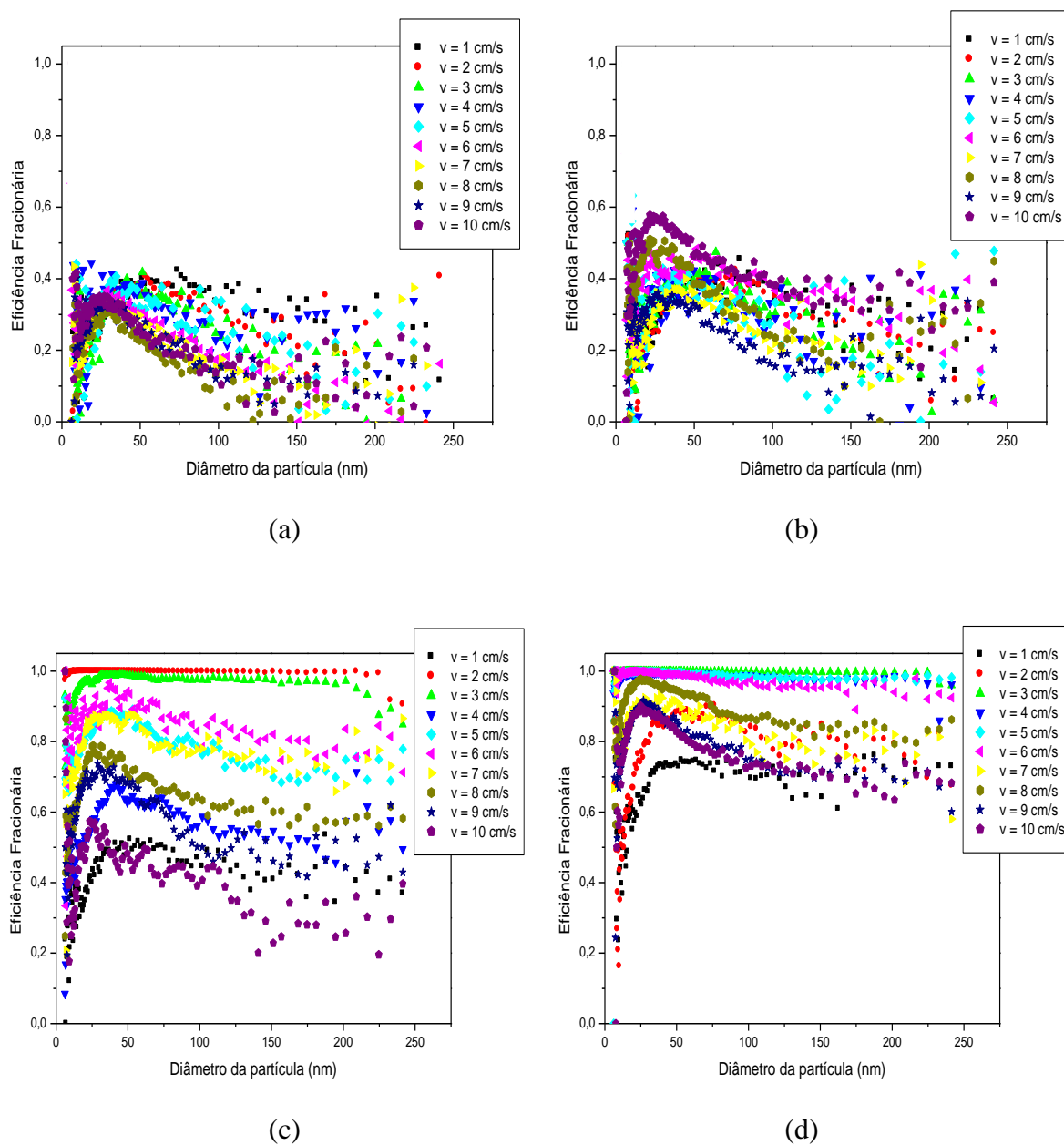


Figura C.1 – Eficiência fracionária para o campo elétrico: (a) 3 kV/cm; (b) 3,5 kV/cm; (c) 3,7 kV/cm e (d) 3,8 kV/cm.

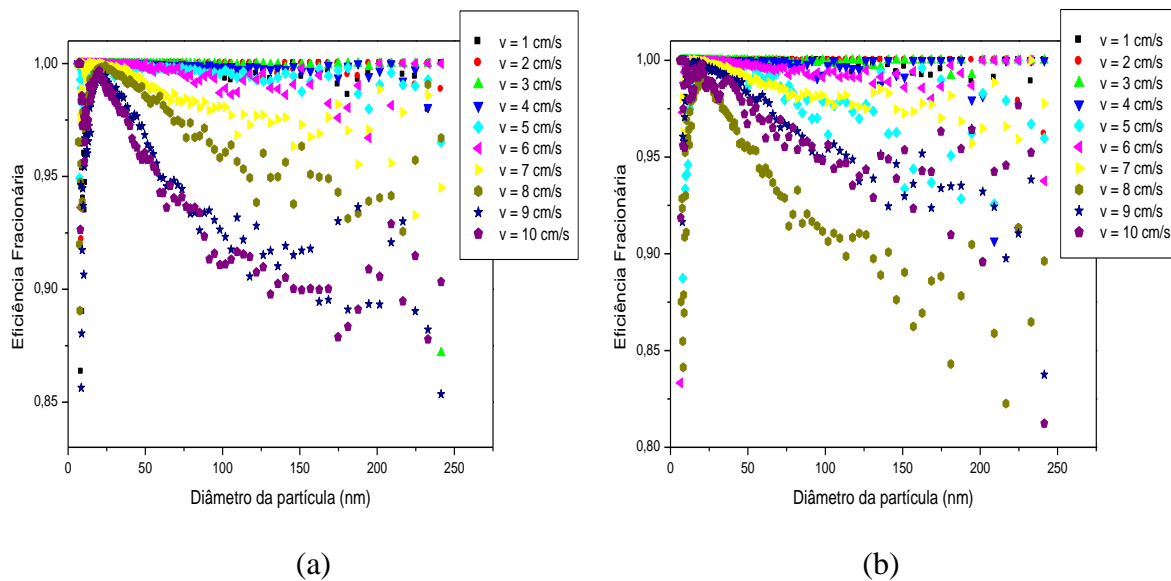


Figura C.2 – Eficiência fracionária para o campo elétrico: (a) 3,9 kV/cm e (b) 4 kV/cm.