

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

**DESEMPENHO DE MEIOS FILTRANTES NA REMOÇÃO DE
PARTÍCULAS NANOMÉTRICAS DE AEROSSÓIS**

Natália dos Reis Feitosa

São Carlos
Março/2009

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

**DESEMPENHO DE MEIOS FILTRANTES NA REMOÇÃO DE
PARTÍCULAS NANOMÉTRICAS DE AEROSSÓIS**

Natália dos Reis Feitosa

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

Orientador: Prof. Dr. José Renato Coury

São Carlos
Março/2009

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

F311dm

Feitosa, Natália dos Reis.

Desempenho de meios filtrantes na remoção de partículas nanométricas de aerossóis / Natália dos Reis Feitosa. -- São Carlos : UFSCar, 2009.

136 f.

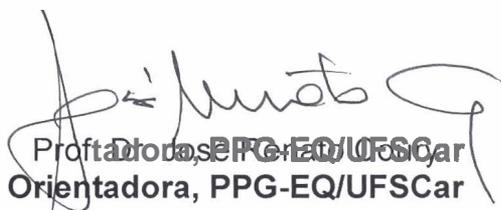
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Filtração. 2. Partículas nanométricas. 3. Filtros fibrosos. 4. Filtração por membranas. 5. Eficiência de coleta. 6. Mobilidade elétrica. I. Título.

CDD: 660.284245 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **NATÁLIA DOS REIS FEITOSA** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 12 DE MARÇO DE 2009.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dra. PPG-EQ/UFSCar
Orientadora, PPG-EQ/UFSCar



Dr.ª. Maria Carolina Ribeiro Falaguasta
AirServices/SP



Dr. Fábio de Oliveira Arouca
DEQ/UFSCar

A minha mãe, Genir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder a vida e nela estar sempre presente acompanhando e iluminando meus passos.

A minha mãe, Genir, e minhas irmãs, Juliana e Camila, pessoas essenciais para mim, por todo amor, amizade, apoio, conselho, confiança e incentivo em todas as etapas e momentos que vivi. Aproveito para agradecer meus familiares, tios e primos, em especial minha vó, Assumpta, e meus tios Maria Eunice e Oger que me apoiaram para eu chegar até aqui.

Ao Denis pelo seu carinho, amizade, paciência, ajuda, incentivo e compreensão que, com certeza, foram fundamentais para o cumprimento desta etapa. Obrigada por tudo, sua importância na minha vida é única.

Ao professor Dr. José Renato Coury pela oportunidade, orientação, confiança e apoio oferecidos ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Ao Dr. Fábio Arouca pela orientação, dedicação, ensino, amizade, ajuda e paciência (mas muita paciência mesmo!) que foram extremamente admiráveis e importantes para a concretização desta etapa.

A professora Dra. Mônica Aguiar, a Dra. Juliana Maria da Silva e a Dra. Maria Carolina Falaguasta pela contribuição dada para a realização do trabalho.

A Aruana, amiga especial, presente em minha vida praticamente em tempo “integral”, desde o primeiro ano de faculdade, sempre me dando apoio e proporcionando momentos de descontração.

A Camila Meira que, além da amizade, também participou de momentos do desenvolvimento do trabalho, oferecendo apoio e incentivo.

As minhas queridas amigas de São Carlos, Aruana, Bruna, Ediane e Renata, que proporcionaram a mim momentos de alegria e de muita refeição. Obrigada pelo companheirismo e incentivo.

Aos amigos e colegas de São Carlos: Eduardo Tanabe (Japa), Márcio, Sandra, Lili, Giann, Robson, Laura, Néstor, Ivana, Letícia, Érika, Jaque, Vivi, Fabrício (Ramirez), Clarice, Priscilinha e Anamaria.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa Controle Ambiental I.

Aos amigos de Presidente Prudente que sinto tanta falta: Cintya, Ivie e a 1ª turma da Engenharia Ambiental da Unesp.

Aos funcionários do DEQ: Oscar Silva, pela disposição e ajuda para a manutenção da unidade experimental e Dorival, pelos desenhos elaborados.

Ao CNPq e FAPESP pelo auxílio financeiro oferecido e ao Departamento de Engenharia Química da UFSCar pela disponibilidade, apoio e instalações.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	vi
NOMENCLATURA	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
1 - INTRODUÇÃO	1
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 - Aerossol e material particulado	4
2.2 – Partículas nanométricas.....	5
2.2.1 – <i>Definição e aplicações</i>	5
2.2.2 - <i>Efeitos à saúde humana.....</i>	7
2.3 – Filtração.....	9
2.4 – Meios filtrantes	10
2.4.1 – <i>Membranas filtrantes.....</i>	10
2.4.2 – <i>Filtros fibrosos</i>	11
2.4.2.1 – <i>Eficiência de coleta dos filtros fibrosos</i>	13
2.5 - Mecanismos de Coleta.....	16
2.5.1 - <i>Mecanismo difusional</i>	17
2.5.2 – <i>Mecanismo inercial</i>	20
2.5.3 – <i>Mecanismo de interceptação direta</i>	21
2.5.4 – <i>Mecanismo gravitacional</i>	22
2.5.5 – <i>Mecanismo eletroforético</i>	22
2.5.6 – <i>Coleta simultânea por diversos mecanismos</i>	24
2.6 – Queda de pressão no filtro	25
2.7 – Filtração de nanopartículas	26
3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	29

3.1 – Equipamentos e módulos constituintes da unidade experimental	31
3.1.1 - Compressor de ar.....	31
3.1.2 - Filtros de purificação de ar	31
3.1.3 - Geradores de partículas.....	32
3.1.3.1 – Gerador de partículas nanométricas – DEQ-UFSCar	32
3.1.3.2 – Gerador Atomizador da TSI, modelo 3079	35
3.1.4 – Secador de difusão	37
3.1.5 – Fontes neutralizadoras.....	38
3.1.6 – Dispositivo de filtração	38
3.1.7 - Amostragem de partículas.....	39
3.1.8 – Medidor de vazão	41
3.1.9 - Medidor de temperatura	42
3.1.10 - Medidor de queda de pressão	42
3.1.11 – Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (Scanning Mobility Particle Sizer - SMPS).....	42
3.1.12 – Aerossol gerado.....	45
3.1.13 – Meios filtrantes.....	45
3.1.13.1 – Filtro de poliéster	46
3.1.13.2 – Filtro de celulose HEPA.....	46
3.1.13.3 – Filtro de microfibras de quartzo	47
3.1.13.4 – Membranas filtrantes.....	48
3.2 - Procedimentos experimentais	50
3.2.1 – Testes Preliminares - Otimização das condições de operação da unidade experimental.	52
3.2.1.1 – Avaliação do Gerador de Nanopartículas projetado no DEQ-UFSCar.....	52
3.2.1.2 – Avaliação das condições de amostragem do aerossol	53
3.2.1.3 – Avaliação do Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica - SMPS....	57
3.2.2 – Testes relacionados ao desempenho dos meios filtrantes	60
3.2.2.1 – Determinação da eficiência dos meios filtrantes	61
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 – Testes preliminares.....	63
4.1.1 - Avaliação do gerador de partículas nanométricas projetado no DEQ- UFSCar.....	63

4.1.2 – Avaliação das condições de amostragem do aerossol.	68
4.1.3 – Avaliação do desempenho do Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (SMPS).....	75
4.2 – Testes relacionados ao desempenho dos meios filtrantes.....	82
4.2.1 – Eficiência experimental do filtro de poliéster	84
4.2.2 – Eficiência experimental para o filtro HEPA	89
4.2.3 – Eficiência experimental para o filtro de microfibras de quartzo	93
4.2.3 – Eficiência experimental para as membranas	97
4.3 – Queda de pressão nos meios filtrantes.....	100
4.4 – Comparação da eficiência experimental do filtro de poliéster com os modelos da literatura	103
5- CONCLUSÕES	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
APÊNDICE A	112
APÊNDICE B.....	117
APÊNDICE C	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema do sistema respiratório (HINDS, 1999).	8
Figura 2.2 - Mecanismos físicos de coleta (SPURNY, 1998).	16
Figura 2.3 - Atuação dos mecanismos de coleta e as eficiências correspondentes (HINDS, 1999).	24
Figura 3.1 – Vista em perspectiva da unidade experimental.....	30
Figura 3.2 – Foto dos filtros de purificação de ar.....	32
Figura 3.3 – (1) Esquema do gerador de partículas e (2) Detalhes do frasco de armazenamento da solução.	33
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.....	34
Figura 3.5 – Gerador atomizador de aerossóis, modelo 3079 da TSI.	36
Figura 3.6 – Sistema de geração de partículas: (1) atomizador com saída para o aerossol e (2) porta-solução de vidro.	36
Figura 3.7 – Esquema do gerador atomizador, modelo 3079 da TSI. (Manual de serviço e operação do Gerador Atomizador, modelo 3079 da TSI).	37
Figura 3.8 – Secador de difusão.	37
Figura 3.9 – Dispositivo de filtração.	39
Figura 3.10 – Esquema da sonda de amostragem.....	40
Figura 3.11 – Esquema da linha de filtração: (1) Dispositivo de filtração; (2) Conectores de medição de queda de pressão no filtro; (3) Sonda de amostragem; (4) Rotâmetro.....	40
Figura 3.12 – SMPS: (1) classificador eletrostático; (2) impactador inercial; (3) torre Nano-DMA; (4) contador de partículas.....	43
Figura 3.13 – Analisador de Mobilidade Diferencial: (1) Long-DMA e (2) Nano-DMA.	43
Figura 3.14 – Esquema de funcionamento do DMA.....	44
Figura 3.15 - Vista do filtro de poliéster obtida em MEV.....	46
Figura 3.16 – Vista do filtro HEPA obtida em MEV.....	47
Figura 3.17 – Vista do filtro de microfibras de quartzo obtida em MEV.....	48
Figura 3.18 – Membranas filtrantes: (a) Corte transversal da membrana; (b) Superfície da membrana. (Fonte: www.pam-membranas.com.br).....	48

Figura 3.19 – Esquema da linha de filtração com a utilização das membranas: (1) Módulo das membranas; (2) Sonda de amostragem; (3) Rotâmetro.	49
Figura 3.20 – Esquema do módulo das membranas.	50
Figura 3.21– Esquema da unidade experimental.	52
Figura 3.22 – Esquema da unidade experimental para a realização dos testes de avaliação das condições de amostragem do aerossol.	56
Figura 3.23 – Sonda de amostragem com bocais de diferentes tamanhos.	57
Figura 3.24 – Esquema da unidade experimental para a realização dos testes relacionados ao desempenho dos meios filtrantes.	61
Figura 4.1 - Distribuições de tamanhos de partículas para diferentes soluções aquosas de NaCl.	63
Figura 4.2 - Diâmetro da partícula como função da concentração do sal.	64
Figura 4.3 – Comportamento do desvio padrão geométrico como função da concentração do sal.	65
Figura 4.4 – Concentração total de partículas no aerossol, como função da concentração de sal na solução.	65
Figura 4.5 – Visualização de uma partícula em MET obtida a partir de uma solução de NaCl de concentração de 0,5 g/L.	66
Figura 4.6 - Distribuições de tamanhos de partículas de diferentes sólidos.	67
Figura 4.7 – Comparação das distribuições de tamanhos de partículas nanométricas em termos das porcentagens de concentrações para diversas condições de amostragem.	70
Figura 4.8 – Curvas de distribuições de tamanhos de partículas nanométricas de aerossóis: amostragens isocinética e não isocinética.	72
Figura 4.9 - Comparação das distribuições de tamanhos de partículas nanométricas em termos das porcentagens de concentrações para cada faixa de diâmetro: amostragens isocinética e não isocinética.	73
Figura 4.10 - Efeito da amostragem de partículas nanométricas de aerossóis coletadas por sondas com diferentes diâmetros (d_2): 0,65, 1,0 e 1,35 cm.	74
Figura 4.11: Distribuições de tamanho para testes com diferentes configurações do SMPS: impactador de 0,0710 cm, vazão do aerossol no SMPS de 0,3 L/min e <i>Scan up</i> de 120s.	77
Figura 4.12 - Distribuições de tamanho para testes com diferentes configurações do SMPS: impactador de 0,0710 cm e vazão do aerossol no SMPS de 0,3 L/min, sendo (a) <i>Scan up</i> de 210s e (b) <i>Scan up</i> de 300s.	78

Figura 4.13 - Distribuições de tamanho para testes com diferentes configurações do SMPS: impactador de 0,0457 cm e vazão do aerossol no SMPS de 0,3 L/min, sendo (a) <i>Scan up</i> de 120s e (b) <i>Scan up</i> de 210s.	79
Figura 4.14 - Distribuições de tamanho para testes com diferentes configurações do SMPS: impactador de 0,0457 cm ,vazão do aerossol no SMPS de 0,3 L/min e <i>Scan up</i> de 300s.	80
Figura 4.15 - Distribuições de tamanho para testes com diferentes configurações do SMPS: impactador de 0,0710 cm e vazão do aerossol no SMPS de 1,4 L/min, sendo (a) <i>Scan up</i> de 120s e (b) <i>Scan up</i> de 210s.	80
Figura 4.16 - Distribuições de tamanho para testes com diferentes configurações do SMPS: impactador de 0,0710 cm, vazão do aerossol no SMPS de 1,4 L/min e <i>Scan up</i> de 300s.	81
Figura 4.17 – Curvas de distribuição de partículas das três réplicas para a velocidade de 3 cm/s: (a) antes do filtro e (b) depois do filtro.	85
Figura 4.18 – Curvas de distribuição de partículas para a velocidade de 3 cm/s.	85
Figura 4.19 – Curvas de distribuição de partículas para a velocidade de 6 cm/s.	86
Figura 4.20 – Eficiência fracionária do filtro de poliéster até o diâmetro de 20,2 nm.	87
Figura 4.21 – Eficiência fracionária do filtro de poliéster.	88
Figura 4.22 – Curvas de distribuição de partículas para a velocidade de filtração de 5 cm/s: (a) antes do filtro HEPA e (b) depois do filtro HEPA.	90
Figura 4.23 – Eficiência fracionária do filtro HEPA, para as velocidades de filtração: (a) 1 cm/s; (b) 2 cm/s; (c) 3 cm/s e (d) 4 cm/s.	91
Figura 4.24 – Eficiência fracionária do filtro HEPA, para as velocidades de filtração: (a) 5 cm/s; (b) 6 cm/s; (c) 7 cm/s e (d) 8 cm/s.	92
Figura 4.25 – Eficiência fracionária do filtro HEPA, para as velocidades de filtração de 9 cm/s.	93
Figura 4.26 – Concentração de partículas para a velocidade de filtração de 9 cm/s: (a) antes do filtro de microfibras de quartzo e (b) depois do filtro de microfibras de quartzo.	94
Figura 4.27 – Eficiência fracionária do filtro de microfibras de quartzo, para as velocidades de filtração: (a) 1 cm/s e (b) 2 cm/s.	95
Figura 4.28 – Eficiência fracionária do filtro de microfibras de quartzo, para as velocidades: (a) 3 cm/s; (b) 4 cm/s; (c) 5 cm/s e (d) 6 cm/s.	96
Figura 4.29 – Eficiência fracionária do filtro de microfibras de quartzo, para as velocidades: (a) 7 cm/s e (b) 8 cm/s.	97
Figura 4.30 – Eficiência do filtro de microfibras de quartzo para a velocidade de 9 cm/s.	97

Figura 4.31 – Concentração de partículas no aerossol para a velocidade de filtração de 7 cm/s: (a) antes das membranas e (b) depois das membranas.	98
Figura 4.32 – Eficiência fracionária das membranas, para as velocidades: (a) 1 cm/s e (b) 2 cm/s.....	98
Figura 4.33 – Eficiência fracionária das membranas, para as velocidades: (a) 3 cm/s; (b) 4 cm/s; (c) 5 cm/s e (d) 6 cm/s.....	99
Figura 4.34 – Eficiência fracionária das membranas para as velocidades: (a) 7 cm/s e (b) 8 cm/s.....	100
Figura 4.35 – Queda de pressão do filtro de poliéster em função da velocidade de filtração.	101
Figura 4.36 – Queda de pressão nos meios filtrantes em função da velocidade de filtração: (a) filtro HEPA e (b) filtro de microfibras de quartzo.	101
Figura 4.37 – Queda de pressão das membranas em função da velocidade de filtração.....	102
Figura 4.38 – Comparação entre as eficiências experimental e teórica do filtro de poliéster.	104
Figura A.1 – Concentração de partículas para cada diâmetro, para a velocidade de 3 cm/s..	113
Figura A.2 – Concentração de partículas para cada diâmetro, para a velocidade de 9 cm/s..	114
Figura A.3 – Concentração de partículas para cada diâmetro, para a velocidade de 5 cm/s: (a) antes do filtro HEPA e (b) depois do filtro HEPA.	114
Figura A.4 – Eficiência fracionária do filtro de poliéster: (a) sem uso da fonte de Amerício e (b) com uso da fonte de Amerício.	115
Figura B.1 – Concentração de partículas para cada diâmetro após o filtro HEPA.....	119
Figura B.2 – Concentração de partículas para cada diâmetro após o filtro HEPA.....	120
Figura B.3 – Concentração de partículas para cada diâmetro após o filtro HEPA.....	121
Figura B.4 – Eficiência fracionária do filtro HEPA, para a velocidade de 7 cm/s.....	122
Figura C.1 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) 1 cm/s; (b) 2cm/s; (c) 3 cm/s e (d) 4cm/s.	124
Figura C.2 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) 5 cm/s; (b) 6cm/s; (c) 7 cm/s; (d) 8cm/s; (e) 9 cm/s e (f) 10 cm/s.	125
Figura C.3 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 1 cm/s; (c) e (d) 2 cm/s.	126
Figura C.4 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 3 cm/s; (c) e (d) 4 cm/s; (e) e (f) 5 cm/s.....	127
Figura C.5 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 6 cm/s; (c) e (d) 7 cm/s; (e) e (f) 8 cm/s.....	128

Figura C.6 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 9 cm/s.....	129
Figura C.7 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 1 cm/s; (b) e (c) 2 cm/s.	130
Figura C.8 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 3 cm/s; (c) e (d) 4 cm/s; (e) e (f) 5 cm/s.....	131
Figura C.9 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 6 cm/s; (c) e (d) 7 cm/s; (e) e (f) 8 cm/s.....	132
Figura C.10 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 9 cm/s.....	133
Figura C.11 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 1 cm/s; (b) e (c) 2 cm/s.	134
Figura C.12 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 3 cm/s; (c) e (d) 4 cm/s; (e) e (f) 5 cm/s.....	135
Figura C.13 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 6 cm/s; (c) e (d) 7 cm/s; (e) e (f) 8 cm/s.....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros utilizados na configuração do SMPS.....	59
Tabela 4.1 - Condições operacionais para os testes de variação da injeção do ar de diluição.....	69
Tabela 4.2 - Condições operacionais para os testes de amostragem do aerossol variando a vazão do aerossol no sistema (q_1).	71
Tabela 4.3 - Condições operacionais para os testes de variação do diâmetro do amostrador.	74

NOMENCLATURA

A - área do filtro	$[L^2]$
A_p - área projetada pelas fibras	$[L^2]$
C - concentração de partículas	$[M L^{-3}]$
C_0 - concentração de partículas na entrada do filtro	$[M L^{-3}]$
C_E - concentração de partículas na saída do filtro	$[M L^{-3}]$
D - coeficiente de difusividade	$[L^2 t^{-1}]$
D_f - diâmetro das fibras	$[L]$
d_p - diâmetro da partícula	$[L]$
dC - variação da concentração de partículas	$[-]$
dL - elemento diferencial da espessura do filtro	$[L]$
E - eficiência do filtro	$[-]$
F_s - fator de escorregamento de Cunningham	$[-]$
G - parâmetro que descreve o mecanismo gravitacional	$[-]$
K - coeficiente de permeabilidade do meio filtrante	$[L^2]$
K_B - constante de Boltzmann	$[M L^2 t^{-2} T^{-1}]$
K_M - parâmetro adimensional do mecanismo dipolo imagem	$[-]$
Kn - número de Knudsen da partícula	$[-]$
Kn_f - número de Knudsen da fibra	$[-]$
Ku - fator hidrodinâmico de Kuwabara	$[-]$
L - espessura do filtro	$[L]$
L_f - comprimento da fibra por unidade de volume	$[L]$
N_C - número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo	$[-]$
N_p - número de partículas depositadas por unidade de tempo	$[-]$
P - penetração	$[-]$
P - pressão absoluta	$[M L^{-1} t^{-2}]$
Pe - Número de Peclet	$[-]$
q - carga da partícula	$[C]$
R - parâmetro de interceptação direta	$[-]$
St - número de Stokes	$[-]$

T - temperatura absoluta	[T]
U_0 - velocidade do gás	[L t ⁻¹]
v - velocidade intersticial do gás	[L t ⁻¹]
v_t - velocidade terminal da partícula	[L t ⁻¹]
α_r - coeficiente de resistência viscosa	[-]
β - volume ocupado pelas fibras.	[L ³]
β_r - o coeficiente de resistência inercial	[-]
ΔP - queda de pressão máxima de operação	[M L ⁻¹ t ⁻²]
ε - porosidade do filtro	[-]
ε_0 - permissividade do vácuo	[t ² C ² M ⁻¹ L ⁻³]
ε_c - constante dielétrica da partícula	[-]
ε_f - constante dielétrica do fluido.	[-]
γ_c - coeficiente de polarização do coletor	[-]
η_d - eficiência de coleta difusional	[-]
η_e - eficiência de coleta eletroforética	[-]
η_g - eficiência de coleta gravitacional	[-]
η_i - eficiência de coleta inercial	[-]
η_{id} - eficiência de coleta por interceptação direta	[-]
η_t - soma das eficiências de cada mecanismo de coleta	[-]
μ - viscosidade do gás	[M L ⁻¹ t ⁻¹]
ρ_p - densidade da partícula	[M L ⁻³]
ρ_g - densidade do gás	[M L ⁻³]
λ - caminho livre médio do gás	[L]
#/cm ³ - número de partículas por unidade de volume	[-]

RESUMO

O interesse de estudos acerca do desenvolvimento de técnicas de remoção de materiais particulados na escala nanométrica foi impulsionado pela preocupação com a qualidade do ar e da saúde humana, somada às restrições do controle de particulados ultrafinos, cada vez mais intolerantes pelas leis ambientais. Adicionalmente, a crescente aplicação de partículas nanométricas em diversas áreas da ciência e tecnologia estimulou o aprofundamento de estudos sobre o assunto. Dentre os vários equipamentos capazes de operar com eficiência na remoção de partículas ultrafinas, destacam-se os filtros fibrosos. Tais filtros são, em princípio, capazes de atuar em escala submicrométrica, mas as informações referentes ao seu desempenho em escala nanométrica ainda são pouco conhecidas. No presente trabalho avaliou-se o desempenho de filtros de poliéster, de celulose HEPA, de microfibras de quartzo e, também, de membranas filtrantes cilíndricas, fornecidas pela empresa Pam-Membranas Seletivas Ltda. O sistema experimental disponível era capaz de simular uma contaminação de partículas nanométricas em uma corrente de ar ultrapuro, a fim de que, posteriormente, fosse possível investigar a eficiência dos meios filtrantes na operação de remoção das mesmas. O aerossol de teste era constituído por nanopartículas polidispersas de NaCl, produzidas na faixa de diâmetros de 6,15 a 245,1 nm. O desempenho do filtro foi avaliado através da análise da eficiência de remoção das partículas nanométricas, pela contagem das partículas antes e após a passagem pelo meio filtrante, utilizando a técnica de mobilidade elétrica. Tal procedimento foi realizado por meio de um equipamento da TSI, o Scannig Mobility Particle Sizer (SMPS), modelo 3936, que fornece o número de partículas por faixa de tamanho. Os resultados, em geral, mostraram que a eficiência dos meios filtrantes diminui com o aumento da velocidade de filtração e com aumento do diâmetro, na faixa em estudo, indicando o comportamento típico do mecanismo difusional. As membranas apresentaram um melhor desempenho na remoção das partículas, visto que, diferentemente dos demais meios filtrantes analisados, não se observou tendência para o aumento da penetração de partículas, com o aumento da velocidade de filtração ou diâmetros das partículas, sendo que, em relação à faixa de tamanho, a penetração ocorreu de forma aleatória.

Palavras-chave: Partículas nanométricas, filtros fibrosos, filtração por membranas, eficiência de coleta, mobilidade elétrica.

ABSTRACT

The interest of studies on the development of techniques for removal of particles in the nano-sized scale was promoted by concern about air quality and human health, in addition to restrictions on the control of ultrafine particles, which are more intransigent by environmental laws. Additionally, the increasing application of nanoparticles in various areas of science and technology has stimulated the development of studies on the subject. Amongst the several equipments capable to operate with efficiency on the particle removal, the fibrous filters are distinguished. Such filters are, in principle, capable to act in sub-micrometer scale, but there is little information about its performance in the nano-sized scale. In this work the performance of a polyester filter, of a HEPA cellulose filter, of a quartz microfiber filter and also of cylindrical filtering membrane, provided by Pam-Membranas Seletivas Ltda, were evaluated. The experimental system was able to simulate a contamination of nanometric particles in a stream of ultrapure air, with the aim of investigating the efficiency of filter media in the removal of nanoparticles. The test aerosol was constituted by NaCl polydisperse nanoparticles, ranging from 6.15 to 245.1 nm. The performance of the filter was evaluated through the analysis of the efficiency of removal of nanoparticles, for the counting of particles before and after to cross the filtering media, using the electric mobility technique. This procedure was performed using the TSI Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS), model 3936, which provides the particles concentration, in size range. The results, in general, have showed that the filter media loses efficiency with the increasing filtration velocity and increasing particle size, in the ranged studied, indicating the typical behavior of diffusional mechanism. The filtering membranes have showed better performance in the removal of particles unlike the others filters analysed there was no tendency to increase the penetration of particles with increasing the velocity of filtration or particle diameter.

Keywords: Nanometer particles, fibrous filters, membranes filtration, collection efficiency, electric mobility.

1 - INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial em meados do século XIX impulsionou o surgimento de tecnologias cada vez mais avançadas, o que trouxe como consequência a redução das taxas de mortalidade e o aumento da expectativa de vida da população em todo o mundo.

Esta evolução do modo de produção, estimulada pelo uso deliberado de recursos naturais e fontes de energia não renováveis, e aliadas às necessidades cada vez maiores da crescente população, não se preocupou com a qualidade ambiental. Assim, produção, consumo e crescimento econômico foram, até recentemente, justificativas para todo tipo de degradação ambiental que, por sua vez, ocasionou um comprometimento da qualidade de vida.

O problema da poluição diz respeito à qualidade de vida, sendo gerada por atividades e intervenções humanas no ambiente. Neste sentido, os poluentes são resíduos gerados por estas atividades que causam um impacto ambiental negativo, ou seja, uma alteração indesejável. Portanto, a poluição está ligada à concentração, ou quantidade, de resíduos presentes no ar, na água e no solo (BRAGA et al., 2005).

Em se tratando da poluição atmosférica, nota-se que seus efeitos são percebidos e discutidos em todo o mundo, uma vez que vêm comprometendo o clima terrestre e causando danos à saúde humana e à qualidade do meio ambiente.

A poluição atmosférica é causada por diversos fatores, tais como a queima de combustíveis (fósseis, vegetal e outros), poeiras de origem natural ou das atividades humanas e outros aerodispersóides de origem diversas. Estes fatores estão associados ao desenvolvimento urbano, industrial e à crescente utilização de veículos motorizados, o que se reflete, cada vez mais, em efeitos negativos no equilíbrio dos ecossistemas (ASSUMPÇÃO, 2006). Desta forma, são enviados para a atmosfera, entre outros, os óxidos de nitrogênio, de enxofre, de carbono e o material particulado.

O material particulado, devido ao seu pequeno tamanho, constitui-se em uma das formas mais danosas à saúde humana por ocasionar um aumento na incidência de doenças respiratórias e alterações na atividade pulmonar. De acordo com a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2008), considera-se como material particulado uma mistura complexa de partículas e gotas líquidas muito pequenas, de modo a permanecerem no ar. Podem apresentar, em sua composição, inúmeras substâncias químicas

como ácidos (nitratos e sulfatos), compostos orgânicos, silicones e óxidos metálicos. Cabe ressaltar que o tamanho das partículas está diretamente associado ao seu potencial em causar danos à saúde.

Diversas pesquisas na área da epidemiologia e toxicologia atribuem que, quanto menor a dimensão das partículas expostas no ar, maior é a ocorrência de doenças cardiorespiratórias (HUANG et al., 2004). Isto é explicado pelo fato de que partículas menores que 10 μm geralmente não são removidas pelo sistema respiratório superior e, por conseqüência, acabam atingindo os alvéolos pulmonares e a corrente sanguínea (www.epa.gov). Portanto, a emissão de materiais particulados merece muita atenção, principalmente aqueles que abrangem faixas nanométricas.

Diante disto, o controle do material particulado torna-se cada vez mais rigoroso, fato este que pode ser comprovado pelo emprego de novas regulamentações e leis, tal como a que prevê, nos Estados Unidos, o controle de partículas respiráveis de alto risco (MP 2,5), que diz respeito ao material particulado com diâmetro menor que 2,5 μm . Neste sentido, o aprimoramento de processos utilizados na remoção de particulados submicrométricos em correntes gasosas tem estado cada vez mais em pauta.

Assim, enquanto de um lado emerge a preocupação com o controle de particulados com dimensões pequenas, em outros casos, observa-se o avanço da aplicação tecnológica envolvendo as nanopartículas. Este interesse é advindo das propriedades ópticas, mecânicas, magnéticas e químicas que estas partículas podem apresentar (CHEN et al., 1998). O aproveitamento destas propriedades em aplicações tecnológicas forma a base da nanotecnologia de materiais.

A geração de estruturas nanométricas, tais como os pós-ultrafinos, muitas vezes se dá na forma de aerossóis e sua recuperação para o uso e aplicação de novos materiais deve ser realizada através de uma separação sólido-gás eficiente.

As mesmas características que tornam as nanopartículas interessantes do ponto de vista da aplicação tecnológica podem ser indesejáveis quando estas são liberadas no meio ambiente. De um modo geral, o fato é que se torna cada vez mais indispensável o desenvolvimento de técnicas que atuem na remoção destas partículas de efluentes gasosos.

Dentre os diversos equipamentos existentes, os filtros fibrosos destacam-se por apresentarem um bom desempenho na remoção de partículas numa longa faixa granulométrica, mas as informações referentes ao seu desempenho na faixa submicrométrica ainda são pouco conhecidas (STEFFENS, 2007).

Um melhor conhecimento sobre o comportamento e desempenho destes filtros na remoção de partículas nanométricas se faz necessário, uma vez que são poucos os estudos que avaliaram sua eficiência para a faixa granulométrica em questão. Portanto, o presente trabalho teve como propósito estudar o desempenho de três tipos de filtros fibrosos na remoção de nanopartículas polidispersas: filtro de fibras de poliéster, filtros de celulose HEPA (High Efficiency Particulate Air) e filtros de microfibras de quartzo; bem como o desempenho de membranas filtrantes cilíndricas, fornecidas pela empresa Pam-Membranas Seletivas Ltda.

O comportamento dos meios filtrantes foi investigado ao variar o valor de um dos parâmetros que interferem no processo de coleta de partículas: a velocidade de filtração. Assim, o desempenho destes meios filtrantes foi avaliado comparando-se as eficiências de coletas e quedas de pressão desenvolvidas pelos dispositivos.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Aerossol e material particulado

O termo aerossol refere-se a um conjunto de partículas sólidas ou líquidas suspensas em um meio gasoso. Sua origem pode ser proveniente de atividades industriais, de veículos automotores, da queima de biomassa ou de forma natural, tal como a ressuspensão de poeira do solo.

Os aerossóis podem apresentar diversas definições que são subdivididas de acordo com a forma física das partículas constituintes e sua própria origem (HINDS, 1999). Dentre as definições mais comumente utilizadas, destacam-se os bioaerossóis, pós, poeiras, como também o próprio *smog*, um dos termos amplamente utilizados por ocorrer em muitas cidades do mundo e se constituir em uma das formas de poluição atmosférica visíveis. No presente trabalho, a terminação geral adotada será aerossol.

O material particulado de um aerossol atmosférico é constituído por um conjunto de poluentes formado por poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera devido ao seu pequeno tamanho. O material particulado pode também se formar na atmosfera a partir de gases como dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs), que são emitidos principalmente em atividades de combustão, transformando-se em partículas como resultado de reações químicas no ar (CETESB, 2008).

Geralmente, o tamanho das partículas constituintes de um aerossol compreende a faixa de 0,001-100µm (WILLEKE; BARON, 1993). Estas partículas, geradas por diversas fontes, têm uma grande variedade no tamanho, forma, densidade e composição química. De acordo com Hinds (1999), o tamanho da partícula é um dos parâmetros mais importantes para caracterizar o comportamento dos aerossóis, sendo frequentemente expresso em termos de seu diâmetro aerodinâmico que, por sua vez, é definido como o diâmetro da esfera de densidade unitária que possui a mesma velocidade terminal da partícula estudada.

De acordo com a USEPA (2008), partículas com menores diâmetros aerodinâmicos são mais patogênicas. Neste sentido, a mesma agência desenvolveu padrões de concentrações máximas de poluentes no ar ambiente e, ainda, subdividiu as frações de material particulado em MP₁₀ (partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 10µm – partículas finas) e MP_{2,5} (partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5µm – partículas ultrafinas). As partículas ultrafinas, devido ao seu tamanho, podem atingir os alvéolos pulmonares, já que as finas ficam retidas na parte superior do sistema respiratório.

Por tal motivo, o tamanho das partículas está diretamente associado ao seu potencial em causar danos à saúde, sendo que quanto menores, maiores são os efeitos provocados. Assim, devido aos poucos estudos desenvolvidos, as partículas nanométricas têm se tornado alvo de inúmeras pesquisas.

2.2 – Partículas nanométricas

2.2.1 – Definição e aplicações

A escala nanométrica ainda não está claramente definida, provocando contradição entre vários trabalhos presentes na literatura.

Para o caso específico de partículas, segundo Aitken et al. (2004), são classificadas partículas nanométricas aquelas que possuem diâmetros menores que 0,1 µm (100 nm).

Contudo, a definição do tamanho das nanopartículas é diferente para alguns autores. Para Pui e Chen (1997), Hinds (1999) e Falaguasta (2005), tais partículas são aquelas que apresentam diâmetro menor que 50 nm, enquanto que a *International Organization for Standardization* (ISO) as define como aquelas abaixo de 40 nm. Já Steffens (2007) atribuiu o termo nanopartículas para aquelas com diâmetro inferior a 100 nm. No entanto, Englert (2004) denomina que partículas ultrafinas apresentam diâmetros menores que 100 nm.

Partículas deste tamanho apresentam uma grande área superficial e, freqüentemente, exibem propriedades peculiares que podem ser aproveitadas em diversos

ramos da tecnologia. De acordo com Chen et al. (1998), 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. Desta forma, a meta da nanotecnologia é utilizar estas propriedades em aplicações tecnológicas, isto é, criar, manipular e explorar materiais compreendidos na escala nanométrica.

Conforme Rickerby e Morrison (2006), a nanotecnologia pode beneficiar o meio ambiente através do desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas ao monitoramento da poluição, bem como a sua própria remediação. Tais autores citam a aplicação de nanopartículas de dióxido de titânio (TiO_2) em tintas e revestimentos que, por exibirem propriedades fotocatalíticas, são capazes de criar um mecanismo de “auto-limpeza” nas superfícies de materiais, de forma a degradar os poluentes ali presentes.

Adicionalmente, pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) desenvolveram nanocatalisadores com a finalidade de diminuir a concentração de compostos aromáticos durante as fases de refino do petróleo. Estes nanocatalisadores são úteis em um processo de catálise que resulta em moléculas menos danosas ao meio ambiente, tais como o ciclo-hexano. Desta forma, a combustão de motores à gasolina torna-se mais completa e não deixa resíduos poluentes no ar, que podem ser cancerígenos e contribuir para a formação da chuva ácida (NANI, 2002).

Em se tratando da área da saúde, a nanotecnologia é utilizada para o tratamento, diagnóstico, monitoramento e controle de sistemas biológicos, recentemente denominada “Nanomedicina” (MOGHIMI et al., 2005 apud PIMENTEL et al., 2007). Tal área se destaca pelo desenvolvimento de encapsulamento de fármacos na escala nanométrica. Segundo Pimentel et al. (2007), nos últimos anos numerosos estudos demonstraram que a distribuição de um fármaco no organismo pode ser modificada pelo uso de nanossistemas tais como lipossomas, nanopartículas ou micropartículas. Ainda, esta aplicação pode proteger o princípio ativo da degradação e/ou inativação; melhorar a biodisponibilidade por aumento da penetração celular e proporcionar a liberação do fármaco no sítio de ação desejado, eliminando ou minimizando os efeitos colaterais da terapêutica convencional. Este mesmo autor, juntamente com seus colaboradores, estudou o desenvolvimento de técnicas de nanotecnologia farmacêutica no tratamento da malária, por meio de vacinas veiculadas em nanodispositivos que visaram aumentar a sua estabilidade e prolongar seu efeito de indução de imunogenicidade.

Os progressos da nanotecnologia se concentram em diversos setores, tais como na eletrônica, ótica, comunicações, materiais, biotecnologia, engenharia de produção e agronegócios.

De uma maneira geral, dentre os principais benefícios da nanotecnologia destacam-se o controle de características desejáveis, a otimização do uso de recursos, desenvolvimento de fármacos com menores efeitos colaterais e o aumento da capacidade de processamento de sistemas computacionais. Entretanto, qualquer área da tecnologia que faz uso intensivo de novos materiais traz também alguns riscos ao meio ambiente e à saúde humana.

2.2.2 - Efeitos à saúde humana

Segundo Lora (2002) uma pessoa ativa inala entre 10.000 e 20.000 litros de ar por dia, o que equivale a, aproximadamente, 7 a 14 litros por minuto. Esta quantidade aumenta até 30.000 litros por dia durante algum exercício físico. Os particulados e outros poluentes gasosos entram junto com o ar no organismo, podendo afetar os pulmões e outros órgãos do sistema respiratório.

Dados epidemiológicos relatam que altas concentrações de particulados provocam, além da redução da visibilidade, aumento da incidência de doenças respiratórias, bronquite crônica, constrição dos brônquios, diminuição da função pulmonar e até mesmo aumento da mortalidade.

Conforme Donaldson, Li e Macnee (1998), diversos estudos experimentais têm mostrado que a exposição às partículas ultrafinas, com diâmetro aproximado de 20 nm, pode causar danos patológicos aos pulmões. Tais autores enumeram algumas pesquisas que demonstraram que partículas com esta faixa de diâmetro, de certo material, são mais tóxicas aos pulmões quando comparadas com partículas finas (aproximadamente 250 nm) do mesmo material, tal como o óxido de titânio (TiO_2), óxido de alumina (Al_2O_3) e carbono preto.

Segundo Oberdorster (1996 apud DONALDSON, LI e MACNEE, 1998), partículas com diâmetro abaixo de 50 nm apresentam uma toxicidade excepcional, uma

vez que o grau de toxicidade é função da área superficial da partícula. Os efeitos à saúde que estas partículas podem causar dependem também da composição química das mesmas.

No que diz respeito às doenças cardiovasculares e respiratórias e até mesmo aos índices de mortalidade, pesquisas epidemiológicas e toxicológicas comprovaram que partículas finas, com diâmetro menor que 2,5 μm , são mais prejudiciais que partículas maiores, cujo diâmetro é maior que 10 μm (ENGLERT, 2004). Isto também foi comprovado por Oberdorster (1996 apud FALAGUASTA, 2005) ao mencionar que a absorção das partículas pela corrente sanguínea e sua deposição nos tecidos do coração podem causar arritmia e morte.

Enfim, a deposição dos particulados em diferentes partes do sistema respiratório (Figura 2.1) depende de suas dimensões. Logo, a deposição na região traqueo-bronquial e pulmonar é típica de partículas menores que 10 μm , sendo as de efeito mais adverso à saúde humana. Além disso, os particulados podem concentrar em sua superfície outras substâncias tóxicas como SO_2 , arsênio, selênio, metais pesados, etc. (LORA, 2002).

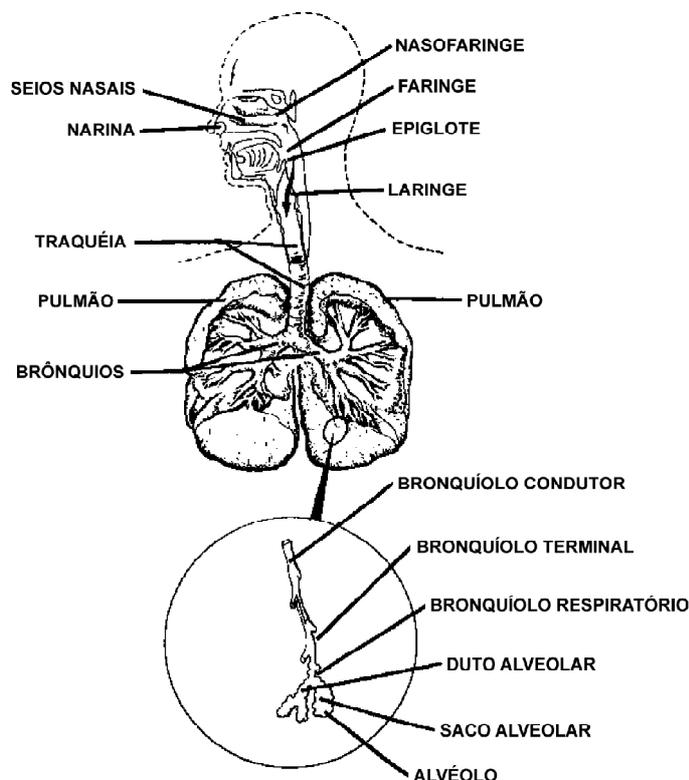


Figura 2.1 - Esquema do sistema respiratório (HINDS, 1999).

As partículas maiores, quando inaladas, são depositadas nas vias respiratórias superiores e expelidas para o sistema gastrointestinal pelas mucosas. Já as partículas mais

finas atingem as partes mais profundas do pulmão, de onde são removidas pela ação dos macrófagos que as fagocitam e, posteriormente, pela excreção das mesmas com o muco formado, de tal modo que o pulmão seja limpo. No entanto, estas partículas podem não ser removidas efetivamente quando entram em grandes concentrações, uma vez que ao entrarem em contato com o epitélio, são adsorvidas rapidamente em função de seu pequeno diâmetro (DONALDSON et al., 1998).

As partículas inaladas causam um processo inflamatório das células que pode levar a alterações fibrosas nos pulmões, causando seu enrijecimento e uma perda da capacidade respiratória. Este fator pode aumentar com a diminuição do tamanho das partículas, como estudado por Oberdorster (1990 apud STEFFENS, 2007), em cujo trabalho as partículas com diâmetro entre 20 e 30nm proporcionaram um aumento na produção de colágeno e tecido fibroso na região pulmonar.

Pui e Chen (1997) relataram que as partículas nanométricas podem ficar retidas no pulmão por um longo período ou, ainda, podem penetrar nos interstícios e na membrana celular fazendo com que materiais relativamente insolúveis atravessem o sistema respiratório.

Atualmente, diversos estudos sobre os efeitos da exposição às partículas nanométricas estão sendo desenvolvidos, como o de Linak et al. (2007), que ressalta os problemas respiratórios e os de inflamação dos pulmões causados por cinzas ultrafinas provenientes da combustão de carvão.

Por estes motivos apresentados e pela crescente aplicação de nanopartículas em diversas áreas aliada aos problemas de emissão de particulados, o desenvolvimento e o aprimoramento de tecnologias e/ou equipamentos que removam tais partículas do ar atmosférico têm tornado indispensáveis. Dentre as técnicas mais eficientemente empregadas, destaca-se a filtração.

2.3 – Filtração

A filtração é uma das técnicas mais utilizadas para capturar partículas de uma corrente gasosa, devido a sua alta eficiência, simplicidade de operação, flexibilidade e economia. Seu processo ocorre pela passagem do aerossol através do meio filtrante, de tal

forma que as partículas vão se depositando sobre a superfície do filtro. A coleta ocorre devido ao contato físico entre as partículas e o elemento coletor, sendo necessária a retenção da partícula no coletor, ou seja, a sua aderência (DONOVAN, 1985).

Dois parâmetros muito utilizados para determinar o desempenho da filtração são a eficiência de coleta e a queda de pressão. Normalmente, é esperada uma eficiência de coleta total de 99%, além de baixas quedas de pressão durante a operação. Tais parâmetros são limitados pela velocidade superficial do gás (DULLIEN, 1989).

A filtração pode ser classificada em duas categorias, dependendo da região do filtro em que ocorre a coleta. Primeiramente, as partículas que entram em contato com o meio filtrante vão sendo ali capturadas, conforme penetram na estrutura do filtro. Esta filtração interna, ou seja, a que ocorre dentro do meio filtrante é denominada *deep filtration*. Após um intervalo de tempo, é formada uma camada de partículas na superfície do filtro, conhecida como torta de filtração, que então passa ser a responsável pela captura das partículas. A este tipo de filtração denomina-se filtração superficial (*cake filtration*) (DULLIEN, 1989).

A eficiência de filtração depende na maioria das vezes da seleção do meio filtrante que requer uma consideração das vantagens e desvantagens de cada tipo de filtro. Portanto, a principal limitação para a escolha do filtro está relacionada com a natureza do seu material constituinte.

Na filtração de gases industriais existem basicamente três tipos de filtros, classificados como filtros de tecido, filtros fibrosos e filtros granulares (DULLIEN, 1989). É de interesse para a compreensão deste estudo, a descrição dos filtros fibrosos.

2.4 – Meios filtrantes

2.4.1 – Membranas filtrantes

As membranas são meios filtrantes que funcionam como barreiras seletivas que atuam como uma espécie de filtro e que apresentam poros de diversos tamanhos. Estes poros determinam as propriedades das membranas tornando-as úteis para diversas

aplicações (DIAS, 2006). As membranas são capazes de promover separações onde os filtros comuns não são eficientes e são utilizadas para remover componentes de correntes líquidas e de correntes gasosas, como no tratamento de águas industriais, efluentes, potabilização de água, purificação de ar, além de serem aplicadas em outros segmentos de indústrias, tais como biotecnologia, farmácia, indústria alimentícia e de bebidas, entre outros.

Dentre os avanços da tecnologia de separação, o desenvolvimento de membranas, particularmente aquelas produzidas a partir de materiais poliméricos, tem ocupado uma atenção especial em pesquisas. Os principais tipos de membrana são: membranas de microfiltração, membranas de ultrafiltração, membrana de osmose reversa, membranas de diálise, membrana de eletrodiálise, membrana de pervaporação e membrana de separação de gás (DICKENSON, 1992). Estes tipos de membranas são classificados conforme sua porosidade que, por sua vez, define a capacidade de separação dos sólidos a serem retidos.

De acordo com Dickenson (1992), membranas de microfiltração são capazes de separar micropartículas com tamanhos entre 0,03 e 10 μm , enquanto as membranas de ultrafiltração separam partículas com diâmetros de aproximadamente 0,005 a 0,01 μm . Estas membranas possuem usos típicos que envolvem a separação de vírus, bactérias e sólidos suspensos finos e ultrafinos (WAKEMAN e TARLETON, 1999).

As membranas utilizadas neste estudo foram produzidas pela empresa nacional Pam-Membranas Seletivas que produz membranas de microfiltração na forma de tubos capilares (fibras ocas), cujas paredes apresentam microporos com diâmetro médio de aproximadamente 0,2 μm (www.pam-membranas.com.br). Tais membranas são comumente utilizadas em tratamento de efluentes, purificação de água, esterilização de meios, clarificação de bebidas, purificação de ar, entre outros.

2.4.2 – Filtros fibrosos

Filtros fibrosos consistem em um emaranhado de fibras individuais e possuem espessura, aproximadamente, entre 0,15 e 0,5 mm e uma porosidade relativamente alta que abrange uma faixa de 0,6 a 0,999 (LEE e RAMAMURTHI apud WILLEKE e BARON,

1993). Um filtro poroso é imprescindível para permitir uma satisfatória vazão de ar e uma queda de pressão compatível com o processo.

Normalmente, estes filtros apresentam uma heterogeneidade nos diâmetros das fibras, cuja faixa compreendida está entre 0,1 e 100 μm . Porém, é possível encontrar tipos de filtros com tamanho de fibras uniforme. Os filtros fibrosos podem ser feitos de celulose, vidro, quartzo e de fibras plásticas (LEE e RAMAMURTHI apud WILLEKE e BARON, 1993).

Estes filtros são utilizados para diversas aplicações e têm como objetivo remover partículas das correntes de gás com baixa queda de pressão. A remoção de partículas finas nestes filtros ocorre principalmente pelos mecanismos de difusão Browniana, efeitos inerciais e de interceptação (DULLIEN, 1989).

A principal limitação para a escolha do filtro está relacionada com o material constituinte. Portanto, é necessário selecionar um material que apresente baixo custo e que tenha uma vida longa sob as condições predominantes de um dado problema.

Desta forma, os filtros de fibras de celulose são muito empregados para limpeza de ar, sendo os mais representativos nesta categoria. Além de serem econômicos e possuírem diversos tamanhos, estes filtros apresentam baixa queda de pressão e uma boa resistência mecânica. Já os filtros de fibras de vidro apresentam uma queda de pressão maior que o de fibras de celulose e atingem uma eficiência de filtração maior que 99% para partículas maiores que 0,3 μm . Assim como os filtros de fibras de vidro, os de fibras de quartzo são aplicados para limpeza de gás de grande volume. Estes filtros podem ser operados a elevadas temperaturas (LEE e RAMAMURTHI apud WILLEKE e BARON, 1993).

Atualmente, encontram-se muitos estudos que utilizam filtros fibrosos para a remoção de pequenas partículas da corrente gasosa. Ahn et al. (2006) investigaram a eficiência de filtros compostos por nanofibras de Nylon na remoção de partículas de 0,3 μm e notaram que tais filtros apresentaram eficiências elevadas (99,96 a 99,993 %), embora a queda de pressão tenha se apresentado maior em relação ao filtro de celulose HEPA comercializado. Pesquisas desenvolvidas por Balazy, Podgórski e Gradón (2004) avaliaram a eficiência de filtração dos filtros fibrosos na remoção de partículas nanométricas e verificaram que tais filtros funcionam adequadamente para a remoção de partículas submicrométricas de aerossóis. Kim et al. (2006) avaliaram a eficiência de filtros de fibras de vidro na remoção de partículas menores que 100 nm e concluíram que, para

partículas de diâmetros abaixo de 2 nm, a penetração das partículas aumenta com a redução do tamanho das mesmas.

A eficiência de coleta dos filtros depende não só da estrutura do filtro (porosidade e diâmetro de fibras), como também das condições de operação (velocidade superficial do gás) e das características do gás a ser limpo (densidade, tamanho de partícula).

2.4.2.1 – Eficiência de coleta dos filtros fibrosos

Considere um filtro cuja espessura seja dL e a área da seção A seja perpendicular à direção da corrente de gás. A espessura deve ser maior que o diâmetro da fibra, porém fina o suficiente para se aproximar de uma simples camada de fibra no plano da seção (DULLIEN, 1989).

Sabendo que L_f é definido como:

$$L_f = \frac{\text{comprimento da fibra}}{\text{unidade de volume}} \quad (2.1)$$

Logo, o comprimento da fibra nesta seção é $L_f A dL$.

A área projetada pelas fibras desordenadas, de diâmetro D_f no plano da seção é dada pela Equação (2.2):

$$A_p = D_f L_f A dL \quad (2.2)$$

Usando a definição da eficiência total de coleta η_T (que inclui todos os mecanismos de coleta) para uma única fibra, tem-se:

$$\eta_T = \frac{\text{número de partículas depositadas por unidade de tempo}}{\text{número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo}} = \frac{N_P}{N_C} \quad (2.3)$$

O número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo, N_C , pode ser representado pela seguinte expressão:

$$N_C = C v D_f L_f A dL \quad (2.4)$$

na qual C é o número de partículas por unidade de volume do gás e v é a velocidade intersticial do gás.

A velocidade intersticial é determinada pela razão entre a velocidade superficial do gás (U_0) e a porosidade do filtro (ε):

$$v = \frac{U_0}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

O número de partículas depositadas nesta seção por unidade de tempo, N_P , pode ser expresso, independente da Equação (2.3), por um balanço de massa dado por (DULLIEN, 1989):

$$N_P = -dC U_0 A \quad (2.6)$$

no qual $-dC$ representa a variação das concentrações do gás que entram e deixam a seção e $U_0 A$, a vazão volumétrica do gás.

Substituindo as Equações (2.6) e (2.4) na Equação (2.3), obtém-se a Equação (2.7):

$$\frac{-dC}{C} = \frac{\eta_T D_f L_f}{\varepsilon} dL \quad (2.7)$$

Ao integrar a Equação (2.7), utilizando os limites $L = 0$ para $C = C_0$ e $L = L$ para $C = C_E$, tem-se:

$$\ln \frac{C_E}{C_0} = -\frac{\eta_T D_f L_f L}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

no qual C_0 e C_E são as concentrações das partículas na entrada e na saída do filtro, respectivamente.

A porosidade pode ser obtida pela relação entre o volume ocupado pelas fibras, β , e o volume total da seção. Esta relação pode ser descrita como:

$$\varepsilon = 1 - \beta \quad (2.9)$$

O volume ocupado pelas fibras β é determinado pela seguinte equação:

$$\beta = \frac{\pi D_f^2 L_f}{4} \quad (2.10)$$

Substituindo as equações (2.9) e (2.10) em (2.8), obtém-se:

$$\frac{C_E}{C_0} = \exp \left[- \frac{4 L (1 - \varepsilon) \eta_T}{\pi \varepsilon D_f} \right] = P \quad (2.11)$$

na qual P é a penetração e representa a fração numérica de partículas que não são coletadas pela seção, embora tenha passado pelo filtro.

De acordo com a Equação (2.11), a concentração de partículas na corrente gasosa que atravessa a seção filtrante decai exponencialmente com o aumento da espessura do filtro (L) e da eficiência total de coleta de cada fibra (η_T), e com o decréscimo do diâmetro da fibra (D_f), desde que a porosidade do filtro (ε) se mantenha constante.

A eficiência do filtro é definida como sendo a fração de partículas que é coletada pelo meio filtrante. Neste sentido, é notória a relação entre a eficiência de coleta (E) e a penetração (P). Portanto:

$$E = 1 - P = 1 - \exp \left[- \frac{4 L (1 - \varepsilon) \eta_t}{\pi \varepsilon D_f} \right] \quad (2.12)$$

Como dito anteriormente, a eficiência total de coleta de cada fibra inclui vários mecanismos de coleta que devem ser claramente definidos para melhor compreender o sistema: aerossol a ser filtrado, meio filtrante e condições de escoamento. Estes mecanismos serão apresentados a seguir.

2.5 - Mecanismos de Coleta

Quando um gás contendo material particulado penetra sobre um meio filtrante composto por fibras, as partículas se depositam sobre as fibras do tecido. A coleta destas partículas se dá pela combinação de vários mecanismos, sendo os mais importantes: difusional, inercial, interceptação direta, gravitacional e eletroforético, ilustrados na Figura 2.2.

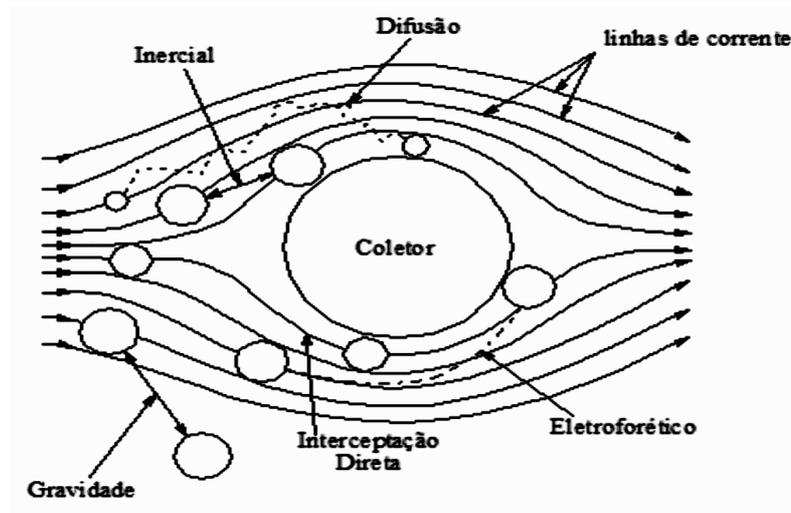


Figura 2.2 - Mecanismos físicos de coleta (SPURNY, 1998).

Entretanto e antes de minudenciar a descrição de cada mecanismo, é importante ressaltar que 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), representado pela Equação (2.13), que é um número adimensional, equivalente a razão entre o caminho livre médio das moléculas no gás (λ) e o diâmetro das partículas (d_p) (HINDS, 1999).

$$Kn = \frac{2 \lambda}{d_p} \quad (2.13)$$

O caminho livre médio das moléculas no gás (λ) é definido como sendo 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 (2.14):

$$\lambda = 2,15 \cdot 10^{-4} \mu P T^{0,5} \quad (2.14)$$

onde P é a pressão em bar, μ a viscosidade do ar em Kg/m.s e T a temperatura absoluta em Kelvin.

O comportamento da partícula em relação ao gás é caracterizado através do número de Knudsen, uma vez que o tamanho da partícula influencia o comportamento do aerossol e as leis que determinam as propriedades do mesmo (HINDS, 1999). Assim sendo, em se tratando de partículas com diâmetros reduzidos, de tal maneira que apresentem tamanhos da mesma ordem de grandeza do caminho livre médio das moléculas ($Kn \gg 1$), tais partículas não avistam o meio gasoso como uma massa contínua, mas como um aglomerado de partículas. Por outro lado, se a partícula for maior que o caminho livre médio ($Kn \ll 1$), a mesma enxergará o gás como um meio contínuo.

No caso da hipótese de escoamento contínuo, a correção do efeito de interações a nível molecular, quando as partículas que escoam no fluido são pequenas, pode ser feita pelo fator de escorregamento de Cunningham (F_s) (CLIFT et al., 1978 apud STEFFENS, 2007):

$$F_s = 1 + Kn \left[1,246 + 0,42 \exp\left(\frac{-0,87}{Kn}\right) \right] \quad (2.15)$$

O fator de escorregamento de Cunningham leva em conta a não-continuidade do meio para partículas que apresentam tamanho próximo ao caminho livre médio (λ). Assim, a partir destes conceitos definidos para compreender a interação entre o gás e as partículas constituintes, torna-se mais simples apresentar a descrição de cada mecanismo de coleta que são representações idealizadas dos fenômenos físicos que promovem o contato partícula-fibra.

2.5.1 - Mecanismo difusional

O mecanismo difusional resulta do movimento aleatório (Browniano) a que pequenas partículas estão sujeitas em um gás, conhecido como difusão browniana

(COURY, 1983). Este mecanismo ocorre, predominantemente, em partículas submicrômicas e em baixas velocidades de filtração.

As partículas pequenas não seguem perfeitamente as linhas de corrente de ar devido aos seus deslocamentos pelas constantes colisões das moléculas do ar. Por isso, tais partículas se difundem em várias direções, aumentando muito a probabilidade de se chocarem com as fibras e ali permanecerem. Ao reduzir a velocidade do gás, a eficiência tende a aumentar, pois o tempo de permanência no meio filtrante é maior.

A teoria da fibra individual, segundo os modelos de Happel e Kuwabara (1959, apud SPURNY, 1998), descreve que a fibra individual não negligencia o efeito das fibras adjacentes, sendo amplamente utilizada devido a sua simplicidade. Ainda, de acordo com Kirsch & Fuchs (1967 apud SPURNY, 1998), o modelo de Kuwabara é mais representativo para o fluxo ao redor de fibras no caso de baixos valores de Reynolds.

Lee e Liu (1982 apud LIU E RUBOW, 1990) desenvolveram um modelo para a eficiência individual da fibra por difusão Browniana, apresentado pela seguinte equação:

$$\eta_d = 2,6 \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} \quad (2.16)$$

O coeficiente hidrodinâmico de Kuwabara (Ku) e o número de Peclet (Pe) são dados por:

$$Ku = \frac{-\ln(1 - \varepsilon)}{2} - \frac{3}{4} + (1 - \varepsilon) - \frac{(1 - \varepsilon)^2}{4} \quad (2.17)$$

$$Pe = \frac{U_0 D_f}{D} \quad (2.18)$$

no qual D é o coeficiente de difusividade.

O coeficiente de difusividade D , associado ao movimento Browniano, pode ser estimado a partir da equação de Stokes-Einstein. Para partícula de diâmetro esférico d_p , o coeficiente é representado pela seguinte equação:

$$D = \frac{K_B T F_s}{3 \pi \mu d_p} \quad (2.19)$$

na qual K_B é a constante de Boltzman, T a temperatura absoluta, F_s o fator de escorregamento de Cunningham e μ a viscosidade do gás.

O mecanismo difusional é significativo somente para partículas muito pequenas. Geralmente a deposição Browniana de partículas em um meio fibroso pode ser considerada como um processo de transferência de massa. Para condições de baixos números de Reynolds e $d_p < 1\mu\text{m}$ existe uma boa aderência entre partícula e coletor (STENHOUSE, 1975 apud STEFFENS, 2007), e o processo pode ser considerado análogo à difusão molecular de um gás para um sólido. Portanto, é possível aplicar as correlações de transferência de massa convencionais, utilizando-se D em vez da difusividade molecular.

Esta correlação desenvolvida por Lee e Liu, apresentada na Equação (2.16), é aplicável para um regime de fluxo contínuo, sendo caracterizado por baixos valores de números de Knudsen relativo à fibra coletora. Neste sentido, os efeitos de escorregamento tornam-se importantes na descrição do fluxo ao redor da fibra que são maiores para fibras finas (LIU e RUBOW, 1990).

Desta forma, Liu e Rubow (1990) sugeriu que o efeito de escorregamento do gás poderia ser levado em conta na equação de Liu e Lee (Equação 2.16), através de um termo de correção (C_d), como se segue na Equação (2.21):

$$\eta_d = 2,6 \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} C_d \quad (2.20)$$

em que C_d é expresso como:

$$C_d = 1 + 0,388 Kn_f \left(\frac{\varepsilon Pe}{Ku} \right)^{1/3} \quad (2.21)$$

Pode-se definir, também, o número de Knudsen em relação ao diâmetro da fibra (D_f), calculado segundo a Equação (2.22):

$$Kn_f = \frac{2 \lambda}{D_f} \quad (2.22)$$

Entretanto, Payet et al. (1992) notaram que o valor de η_d da Equação (2.20) pode exceder a unidade para baixos valores de Peclet, ou seja, para partículas pequenas e para baixas velocidades de filtração. Desta forma, tais autores modificaram esta equação para se

obter $\eta_d < 1$ para partículas muito finas. Esta modificação está apresentada na Equação (2.23):

$$\eta_d = 2,6 \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} C_d C_d'' \quad (2.23)$$

na qual o termo C_d'' é dado pela seguinte expressão:

$$C_d'' = \frac{1}{1 + 1,6 \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} C_d} \quad (2.24)$$

2.5.2 – Mecanismo inercial

Este mecanismo é resultante da inércia das partículas que estão presentes em uma corrente gasosa. As linhas de corrente de gás se curvam ao passar em torno de um coletor e a capacidade da partícula acompanhar estas linhas decresce com o aumento de sua massa, devido à inércia. Este mecanismo é predominante para altas velocidades de gás (COURY, 1983; HINDS, 1999).

Se a curvatura das correntes de gás for suficientemente alta e a massa da partícula também, existirá uma grande probabilidade da partícula chocar-se com o coletor e, em seguida, retornar à corrente gasosa por choque elástico. Esta é, provavelmente, uma das razões que explicam os dados discrepantes encontrados na literatura para a eficiência de coleta inercial.

Segundo Willeke & Baron (1993), o número de Stokes é o parâmetro básico para descrever o mecanismo inercial para coleta de partículas em filtros. Se o número de Stokes for alto, a probabilidade de coleta pelo mecanismo inercial aumenta, enquanto um pequeno número de Stokes indica uma baixa probabilidade de coleta por este mecanismo. Este parâmetro, determinado pela Equação (2.25), envolve o diâmetro da partícula do aerossol, densidade da partícula, a velocidade e a viscosidade do gás:

$$St = \frac{F_s d_p^2 \rho_p U_0}{18 \mu D_f} \quad (2.25)$$

no qual ρ_p e d_p são, respectivamente, a densidade e o diâmetro da partícula.

Friendlander e Pasceri (apud SPURNY, 1998) propuseram um cálculo que determina a eficiência de filtração das partículas pelo mecanismo inercial. Esta expressão é representada pela seguinte equação:

$$\eta_i = \frac{St^3}{St^3 + 0,77 St^2 + 0,22} \quad (2.26)$$

Tal expressão, Equação (2.26), é amplamente utilizada para calcular a contribuição pelo mecanismo inercial.

2.5.3 – Mecanismo de interceptação direta

A interceptação direta é resultante do tamanho relativo entre a partícula e o coletor. Este mecanismo é significativo para partículas de diâmetro grande com d_p de ordem de grandeza pouco abaixo do diâmetro do coletor (D_f) (COURY, 1983). Uma partícula que segue as linhas de corrente do gás pode ser capturada quando seu centro passa pela superfície do coletor a uma distância menor ou igual ao seu raio. A coleta por tal mecanismo depende das propriedades de transporte no fluido e da razão entre diâmetro da partícula e diâmetro do coletor ($R = d_p/D_f$). Portanto, o mecanismo de interceptação direta é função desta razão, R .

Ainda, segundo Liu e Rubow (1990), o efeito de escorregamento do gás deve ser levado em conta na descrição do fluxo ao redor da fibra em casos que o diâmetro da fibra é da mesma ordem de grandeza que o caminho livre médio das moléculas do gás. Em relação a tal efeito, estes mesmos autores propuseram a adição de um fator de correção na equação de eficiência de coleta do mecanismo de interceptação direta proposta por Lee e Liu (1982). A expressão proposta por Lee e Liu (1982) juntamente com o fator de correção (C_r) sugerido por Liu & Rubow (1990) está representada na Equação (2.27).

$$\eta_{id} = 0,6 \frac{\varepsilon}{Ku} \left(\frac{R^2}{1+R} \right) C_r \quad (2.27)$$

onde:

$$C_r = 1 + \frac{1,996 Kn_f}{R} \quad (2.28)$$

2.5.4 – Mecanismo gravitacional

O mecanismo gravitacional, devido ao efeito da gravidade sobre a partícula, atua na coleta da mesma por causar um desvio na sua trajetória normal. É predominante para baixas velocidades do gás e grandes partículas ($St > 10$). A eficiência de coleta depende da direção do fluxo e do sentido da corrente gasosa, uma vez que em um fluxo de cima pra baixo existe tendência das partículas se aproximarem do coletor (COURY, 1983).

A eficiência de coleta descrita por tal mecanismo pode ser estimada pela Equação (2.29) (TIEN, 2007):

$$\eta_g = \frac{(1 - \varepsilon)^{2/3} v_t}{U_0} \quad (2.29)$$

na qual v_t é a velocidade terminal da partícula, sendo determinada pela Equação (2.30):

$$v_t = \frac{d_p^2 g \rho_p}{18 \mu} \quad (2.30)$$

em que, ρ_p é a densidade da partícula e g é a gravidade.

2.5.5 – Mecanismo eletroforético

Forças eletrostáticas podem contribuir para o aumento da eficiência na coleta de partículas durante a filtração. A presença destas forças num filtro pode ser devido à

presença de cargas eletrostáticas nas partículas e/ou no coletor, ou ainda, pode ser induzida por um campo elétrico externo.

A atração entre partícula e coletor ocorre através de vários mecanismos, identificados por Ranz e Wong (1952 apud COURY 1983):

- atração entre partícula carregada e o coletor com carga oposta (força Coulômbica);
- atração entre partícula carregada e seu dipolo-imagem no coletor;
- atração entre partícula carregada e seu dipolo-imagem na partícula;
- repulsão de uma partícula carregada por partícula vizinha com carga similar;
- atração entre partícula carregada e o coletor aterrado, com carga oposta induzida por partículas vizinhas.

De acordo com Coury (1983), a eficiência de coleta pelo mecanismo eletroforético a partir da partícula carregada com carga q é dada por:

$$\eta_e = 8,242 K_M^{0,494} \quad (2.31)$$

Este cálculo é válido para $St < 10^{-3}$ e $10^{-4} < K_M < 10^{-6}$, sendo que a expressão de K_M tem a seguinte forma:

$$K_M = \frac{\gamma_c F_s q^2}{3 \pi^2 \varepsilon_0 d_p D_f^2 \mu U_0} \quad (2.32)$$

na qual ε_0 a permissividade do vácuo = $8,855 \cdot 10^{-12}$ A.s/V.m, q a carga da partícula e γ_c é o coeficiente de polarização do coletor, dado por:

$$\gamma_c = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_f}{\varepsilon_c + 2 \varepsilon_f} \quad (2.33)$$

Dado que ε_c é constante dielétrica da partícula e ε_f a constante dielétrica do fluido.

2.5.6 – Coleta simultânea por diversos mecanismos

Geralmente, admite-se eficiência total de coleta de um coletor como a soma das eficiências individuais. Isto não é inteiramente correto, uma vez que há influência de um mecanismo sobre o outro (COURY, 1983). A Figura 2.3 apresenta a eficiência de coleta de uma fibra individual para cada mecanismo. O filtro possui uma espessura de 1 mm, porosidade de 0,95, diâmetro do coletor igual a 2,0 μm e velocidade de 0,1 m/s.

De acordo com a Figura 2.3, pode-se observar que o mecanismo difusional é mais atuante em partículas menores que 0,2 μm , enquanto os mecanismos inercial e o de interceptação direta são mais atuantes para partículas maiores que 1,0 μm .

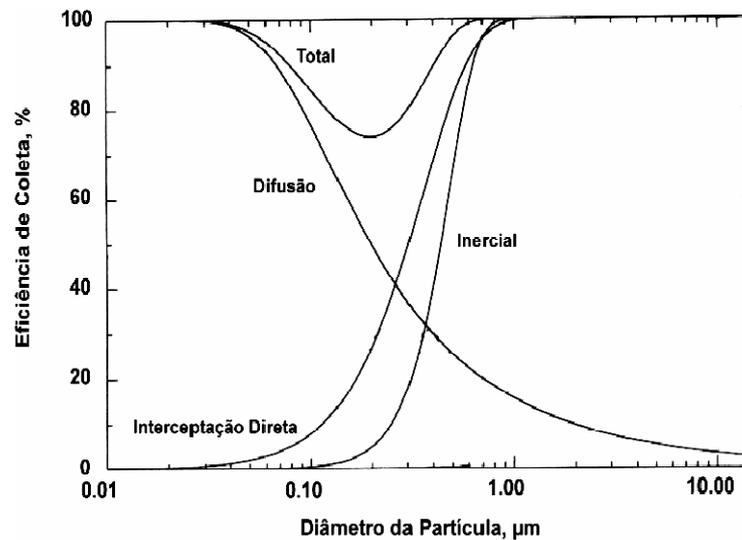


Figura 2.3 - Atuação dos mecanismos de coleta e as eficiências correspondentes (HINDS, 1999).

Embora a Figura 2.3 não apresente a atuação dos mecanismos eletroforéticos e gravitacionais, a eficiência total de coleta das partículas para um coletor é determinada pela soma de todos os mecanismos. Desta forma, obtém-se:

$$\eta_t = \eta_d + \eta_i + \eta_{id} + \eta_g + \eta_e \quad (2.34)$$

2.6 – Queda de pressão no filtro

A queda de pressão total no filtro é a diferença entre a pressão de entrada e a de saída do filtro, sendo medida através da passagem da corrente gasosa no meio filtrante. De acordo com o ponto de vista econômico, os filtros devem ser operados com baixas quedas de pressão, uma vez que altas quedas de pressão requerem equipamentos mais potentes e caros, com alto consumo de energia.

O escoamento através de meios porosos consolidados é semelhante ao escoamento através de leitos sólidos granulares (PERRY e GREEN, 1984 apud RODRIGUES, 2004). Conseqüentemente, o comportamento geral da queda de pressão (ΔP) em função da velocidade superficial de escoamento do gás (U_0) é similar à função correspondente nos sólidos granulares, isto é, a transição do escoamento laminar para turbulento é gradual (AGUIAR, 1995), sendo definida para um fluido compressível como:

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha_r \mu U_0 + \beta_r \rho_g U_0^2 \quad (2.35)$$

no qual L é a espessura do filtro, μ é a viscosidade do fluido, α_r o coeficiente de resistência viscosa, β_r o coeficiente de resistência inercial, U_0 a velocidade superficial do gás e ρ_g a densidade do gás. O primeiro termo da equação representa os efeitos viscosos, enquanto o segundo termo refere-se à componente inercial.

Para baixos valores de Reynolds, ou seja, para casos de escoamento puramente viscoso, em que o segundo termo da Equação 2.35 é desprezível, a queda de pressão em meios porosos é determinada pela equação ou lei de Darcy:

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha_r \mu U_0 \quad (2.36)$$

Adicionalmente, a lei de Darcy pode ser encontrada pela seguinte expressão (DULLIEN, 1989):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu U_0}{K} \quad (2.37)$$

na qual K é o coeficiente de permeabilidade do meio filtrante, conhecido como coeficiente de permeabilidade de Darcy.

2.7 – Filtração de nanopartículas

Há muitos trabalhos experimentais referentes ao comportamento de partículas micrométricas e aos métodos utilizados para removê-las da corrente de gás. Atualmente, o interesse pelas partículas que abrange a escala nanométrica tem aumentado, assim como os estudos sobre a aplicação de filtros fibrosos na remoção de tais partículas. A seguir, serão descritos resumidamente alguns trabalhos experimentais que envolvem a filtração de nanopartículas e a utilização destes tipos de filtros.

De acordo com os experimentos realizados por Balazy, Podgórski e Gradón (2004) que abordaram a filtração de nanopartículas, entre 10 e 500 nm em filtros fibrosos, a eficiência de remoção destas partículas foi muito alta, sendo diminuída ao passo que se aumentava o tamanho das partículas. Isto foi explicado devido aos efeitos do mecanismo difusional que se torna fraco, dependendo da velocidade, para partículas cujos diâmetros estão acima de 200 nm. Ainda, foi verificado que para partículas em torno de 20 nm a eficiência foi máxima.

Pui e Kim (2005) avaliaram a penetração de nanopartículas, na faixa de 3 a 20 nm, em vários meios filtrantes. O sistema gerava nanopartículas de prata monodispersas e neutras e a eficiência dos filtros, em geral, diminuiu com o aumento do diâmetro das partículas.

Kim et al. (2006) verificaram a eficiência de filtração de nanopartículas de NaCl de 1 a 100 nm em filtros de fibra de vidro. Os parâmetros umidade relativa, carga da partícula e o tamanho da mesma foram avaliados e relacionados com os resultados da eficiência dos filtros. Desta forma, os autores concluíram que a umidade relativa não afetou a eficiência de coleta, entretanto a eficiência aumentou quando as partículas coletadas estavam carregadas eletricamente. Ainda, para partículas de diâmetro abaixo de 2 nm, a penetração das partículas aumentava com a redução do tamanho das mesmas.

Yun et al. (2007) estudaram o desempenho de filtros de fibra de poliácridonitrila (PAN) na remoção de partículas nanométricas com diâmetros inferiores a 80 nm. As fibras,

cujos diâmetros variavam entre 270 a 400 nm, foram preparadas por deposição eletrostática (*electrospinning*) e apresentaram maior uniformidade quando comparadas com as fibras dos filtros comerciais. Verificou-se que a eficiência de coleta era função da espessura do filtro, sendo que quanto maior a espessura, menor era a penetração. As penetrações de partículas com carga, sem carga e com cargas neutras nos filtros fibrosos *electrospun* foram as mesmas, implicando que nestes filtros praticamente não houve influência do mecanismo eletrostático na coleta de nanopartículas.

Huang et al. (2007) apresentaram os resultados experimentais da penetração de partículas de diâmetro compreendidos na faixa de 4,5 nm e 10 μ m em filtros fibrosos. Foi observado que a penetração de partículas na faixa de 10 nm a 5 μ m aumentou com a redução das cargas elétricas no filtro. Adicionalmente, quase todas as partículas com diâmetros abaixo de 10 nm e acima de 5 μ m foram coletadas, sendo que os valores de penetração nestas faixas não foram alterados com a quantidade de carga elétrica no filtro. Neste sentido, os autores concluíram que o mecanismo difusional foi o mais importante para a coleta de partículas menores que 10 nm, sendo que os mecanismos inercial e de interceptação foram dominantes para coletar partículas micrométricas.

Steffens e Coury (2007a, 2007b) avaliaram a eficiência de dois tipos de filtros fibrosos operando na remoção de partículas nanométricas, cujos diâmetros estavam compreendidos na faixa de 8,4 a 94,8 nm. Os filtros avaliados eram de fibras de celulose (HEPA) e de poliéster. A velocidade era fixada em diversos valores compreendidos na faixa de 3 cm/s a 25 cm/s e os resultados mostraram que a eficiência de ambos os filtros diminuía com o aumento do tamanho das partículas e da velocidade, sendo que o filtro HEPA apresentou uma maior eficiência na coleta de partículas nesta faixa. Adicionalmente, tais autores utilizaram as equações de Payet et al. (1992) e de Liu e Rubow (1990) para o cálculo da eficiência difusional e interceptação direta. No caso do filtro de poliéster, estas equações não conseguiram representar satisfatoriamente os dados experimentais, sendo que o mecanismo difusional predominou em tal predição teórica, enquanto o mecanismo de interceptação direta apresentou-se desprezível na eficiência total. No entanto, foi proposto inserir o diâmetro efetivo da partícula ao redor da fibra no cálculo do mecanismo de interceptação direta. Assim, ao utilizar a equação de Liu e Rubow (1990), obteve-se como resultado um melhor ajuste da predição teórica aos dados, tornando-se o parâmetro de interceptação direta atuante na eficiência de coleta total. Em relação ao filtro HEPA, a equação de Liu e Rubow (1990) representou bem os dados,

quando se considerou o leito de fibras como sendo composto de vários leitos em série; porém, a equação de Payet et al. (1992) não foi satisfatória.

Outras linhas de pesquisas, tal como o trabalho desenvolvido por Boskovic et al. (2008), investigaram a eficiência de coleta de partículas nanométricas (50 a 300 nm) ao variar a velocidade superficial do gás e particularizar a influência da forma destas partículas na remoção das mesmas utilizando filtros fibrosos. Assim, foram avaliadas partículas esféricas de látex de poliestireno (PSL), partículas cúbicas de óxido de magnésio (MgO) e partículas de cloreto de sódio (NaCl), cuja forma é intermediária (cúbicas com as pontas arredondadas). De uma forma geral, notou-se que, principalmente para a velocidade de 5 cm/s, as partículas esféricas são coletadas mais eficientemente que as partículas não-esféricas e que a remoção de partículas de NaCl foi maior que a remoção de partículas de MgO (cúbicas). Ao aumentar a velocidade para 10 cm/s, a diferença entre as eficiências de coleta de partículas de NaCl e de MgO foi quase insignificante. Para a velocidade de 20 cm/s, a diferença na eficiência da filtração foi mais evidente para partículas relativamente grandes, acima de 150 nm, aproximadamente.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Com a finalidade de avaliar o desempenho de meios filtrantes quanto à remoção de nanopartículas de aerossóis, foi projetada e construída uma unidade experimental que simulava a contaminação de partículas nanométricas e polidispersas de cloreto de sódio (NaCl) em uma corrente de ar puro. A finalidade deste processo era, em uma etapa subsequente, remover tais partículas do aerossol fazendo uso de membranas filtrantes cilíndricas e de filtros fibrosos, tais como o de fibras de poliéster, o de fibras de celulose HEPA e o de microfibras de quartzo.

As primeiras atividades para a realização destes experimentos corresponderam à montagem da unidade experimental que consistiu no planejamento e estruturação do aparato ao integrar os módulos e equipamentos necessários para a condução dos testes experimentais.

A Figura 3.1 apresenta uma representação gráfica da unidade experimental vista em perspectiva, construída para a realização de tais testes. Nas seções seguintes estão descritos detalhadamente os módulos e os equipamentos que compõem a unidade experimental.

Legenda:

- 1 - Filtros de purificação de ar
- 2 - Gerador de nanopartículas
- 3 - Secador de difusão
- 4 - Fonte de Kriptônio
- 5 - Dispositivo de filtração
- 6 - Rotâmetro
- 7 - Fonte de amerício
- 8 - Espectrômetro SMPS

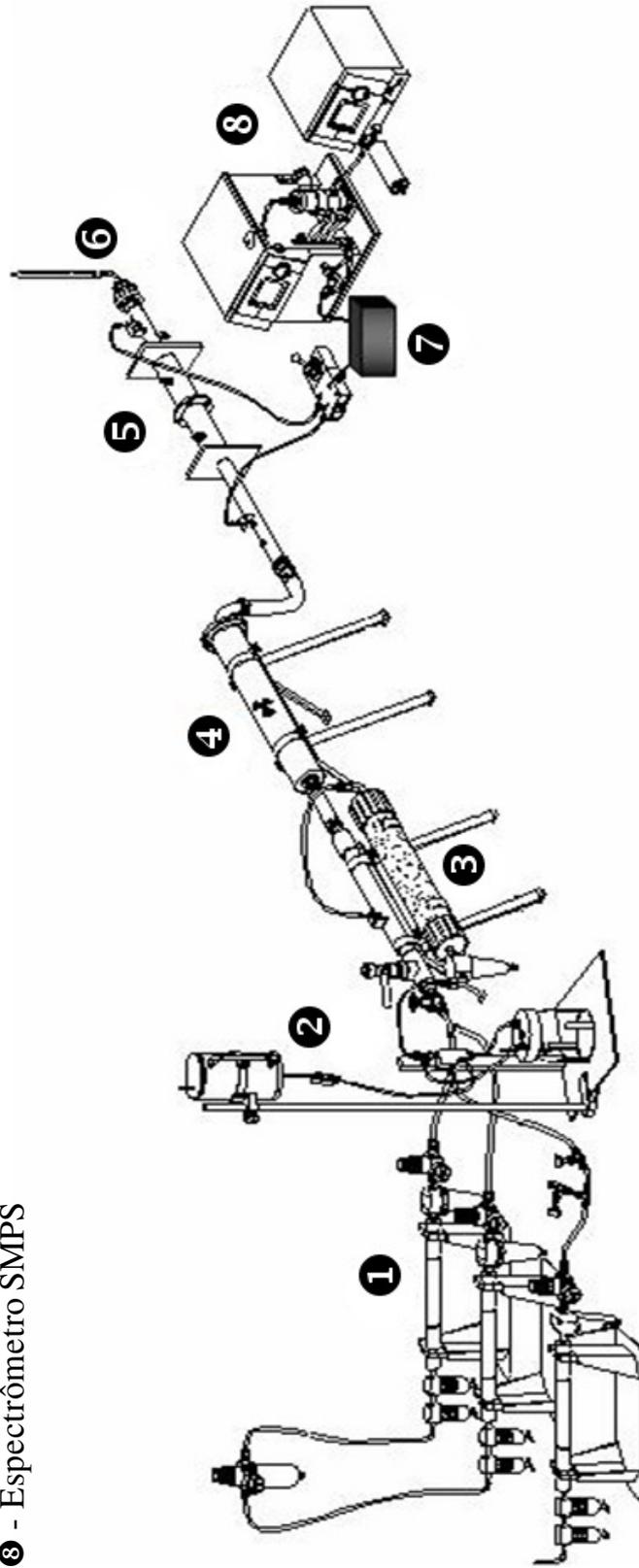


Figura 3.1 – Vista em perspectiva da unidade experimental

3.1 – Equipamentos e módulos constituintes da unidade experimental

3.1.1 - Compressor de ar

O compressor de ar, localizado na parte externa do laboratório, forneceu ar comprimido para a diluição das partículas nanométricas. O compressor de pistão da marca Schulz, modelo MSV12/175 e com capacidade de 120 psi, era isento de óleo de modo a evitar a contaminação da corrente gasosa. Para o trabalho em questão, a pressão estabelecida para o funcionamento do compressor foi de 110 psi.

O ar era conduzido por uma mangueira de PVC com trama de fio de poliéster, passando por uma coluna dessecante preenchida com sílica-gel e um filtro coalescente e, se transportava, até um regulador de pressão combinado a uma válvula de ar, situado no local em que o aparato experimental foi construído.

3.1.2 - Filtros de purificação de ar

A fim de evitar a contaminação da corrente de ar, utilizaram-se três dispositivos de purificação de ar, da marca TSI *Incorporated (Trust, Science, Innovation)*, para obtenção de ar ultrapuro, cujo modelo é 3074B.

Cada dispositivo de purificação de ar era formado por um conjunto de três filtros e um sistema de membranas. Em um primeiro passo, a corrente gasosa passava por um pré-filtro e, seqüencialmente, por um filtro coalescente, apropriados para a remoção de partículas, água e gotas de óleo. Posteriormente, a umidade ainda existente no ar era removida por uma série de membranas e, finalmente, a presença de um filtro composto por carvão ativado garantia a extração de eventuais gotas de óleo e partículas.

Estes filtros, visualizados na Figura 3.2, se destacam por apresentar eficiências elevadas na purificação de ar.



Figura 3.2 – Foto dos filtros de purificação de ar.

3.1.3 - Geradores de partículas

Foram utilizados dois tipos de geradores de partículas nanométricas e polidispersas. O primeiro se refere a um sistema de geração de nanopartículas, do tipo gerador atomizador, projetado e construído nas dependências do DEQ/UFSCar que, por sua vez, era composto por um reservatório de armazenamento da solução, um bico atomizador e um recipiente necessário para coletar o excesso da solução não vaporizada. O segundo gerador, de alta estabilidade, é fabricado e comercializado pela TSI, modelo 3079.

Os princípios de operação de ambos geradores são descritos detalhadamente nas seções seguintes.

3.1.3.1 – Gerador de partículas nanométricas – DEQ-UFSCar

O sistema de geração de nanopartículas era constituído basicamente por três módulos interligados: (a) sistema de alimentação gravitacional sob vazão constante, (b) atomizador e (c) dispositivo de drenagem de líquido em excesso. O aparato funcionava em regime batelada, entretanto a re-alimentação e a retirada de líquido em excesso

podiam ser implementadas sem interrupção na geração ou perturbações na estabilidade do processo. O dispositivo de armazenamento da solução era constituído por um frasco de Mariotte de 20 cm de diâmetro interno, cuja configuração permitia que o escoamento ocorresse sob condições de vazão constante. Isto foi possível devido à introdução de um tubo de pequeno diâmetro interno no interior do frasco de armazenamento da solução. O tubo perfurava a tampa rosqueada do frasco e era introduzido até próximo a sua base.

Desta forma, à medida que o líquido escoava por gravidade, em baixas vazões, bolhas de ar eram introduzidas gradativamente no interior do sistema através do tubo, permitindo que a pressão constante garantisse o controle fino da vazão. A Figura 3.3 representa um esquema do dispositivo de geração de partículas, bem como os detalhes do frasco de Mariotte.

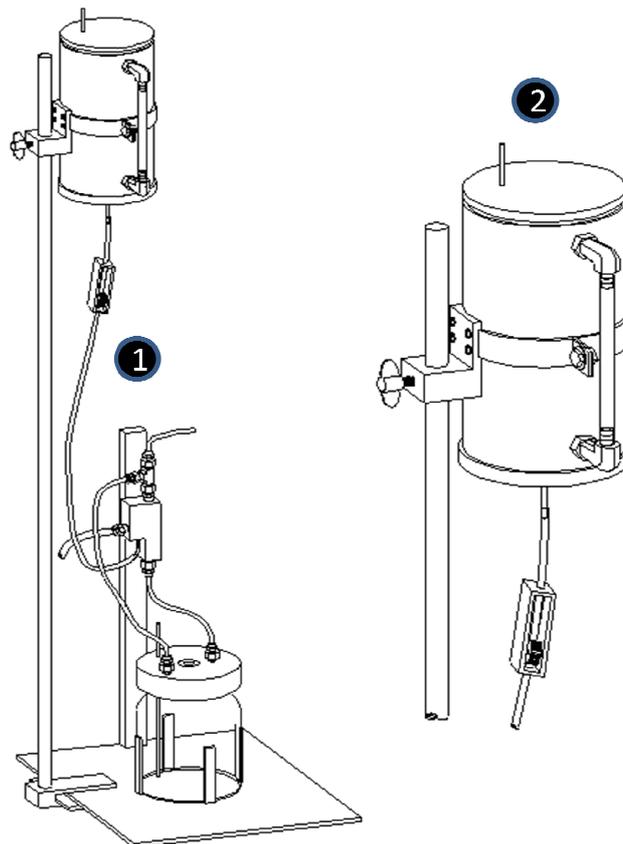


Figura 3.3 – (1) Esquema do gerador de partículas e (2) Detalhes do frasco de armazenamento da solução.

A alimentação gravitacional se deu pela disposição do frasco de armazenamento da solução em um nível vertical mais elevado em relação ao bico atomizador. Assim, o frasco foi acoplado ao sistema através de uma haste de 1 m de

comprimento que permitia seu deslocamento em diversas posições verticais, aumentando ou diminuindo a pressão do líquido no bico atomizador, conforme a necessidade.

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. A quantidade de líquido em seu interior era monitorada por uma escala graduada afixada junto a um vaso comunicante constituído, por sua vez, por uma mangueira transparente e dois conectores voltados para o interior do frasco. Um tubo metálico de 2 mm de diâmetro interno foi embutido cerca de 2 cm acima do centro da base do frasco a fim de assegurar a retirada da solução no interior do frasco. Uma mangueira de silicone de diâmetro interno de 2 mm e comprimento de 0,5 m foi conectada a este tubo com a finalidade de conduzir a solução até a entrada do bico atomizador (Figura 3.4).

O controle da vazão do sistema era estabelecido pelo uso de uma válvula do tipo pinça-rolete, constituída por uma roldana móvel que regulava o escoamento da solução, de forma a comedir rapidamente os estágios de abertura (durante a atomização) e fechamento (sem atomização).

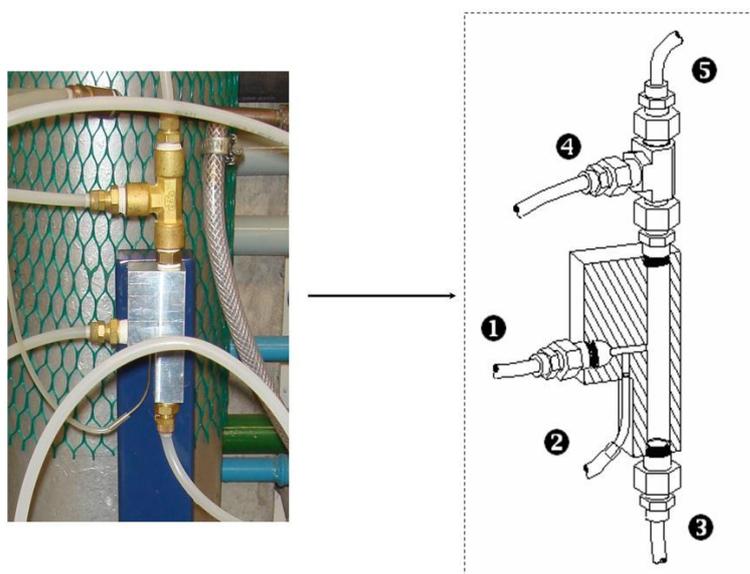


Figura 3.4 – Bico atomizador: (1) Entrada de ar comprimido, (2) Alimentação da solução, (3) Drenagem de líquido em excesso, (4) Ponto de igual pressão do frasco de líquido drenado e (5) Canal condutor do aerossol.

O bico atomizador, construído de acordo com as dimensões sugeridas pelo trabalho de Liu e Lee (1975), possuía um comprimento de 3 in (7,62 cm), sendo que

suas vias de entrada da solução e de aceleração do ar comprimido mediam cerca de 1/16in de diâmetro (0,0625cm). 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 0,5 in 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 solução que não evaporava escoava por gravidade através de uma mangueira de diâmetro interno de 0,5 cm para um recipiente fechado, no qual era armazenado. Tal mangueira era acoplada a um conector metálico na tampa do recipiente.

Este recipiente, com capacidade de armazenamento de 3 L, era constituído por um frasco de vidro com tampa de PVC vedada através do uso de *o'ring*. Um segundo conector acoplado a 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 iguallassem e, assim, o aerossol seguisse pelo canal preferencial, conduzindo as nanopartículas em suspensão. Um tubo metálico de diâmetro interno de 2 mm perfurava a tampa do recipiente até o interior do frasco de vidro, podendo ser utilizado, em casos especiais, para o modo de recirculação da suspensão.

3.1.3.2 – Gerador Atomizador da TSI, modelo 3079

O gerador atomizador da TSI, ilustrado na Figura 3.5, é um instrumento capaz de produzir aerossóis com distribuição de tamanho e concentração constantes, de forma a apresentar uma alta estabilidade na geração de aerossóis. Este equipamento apresenta como vantagem uma bomba interna de baixo ruído apropriada para fornecer ar comprimido durante o processo de atomização. Tal característica associada ao seu pequeno tamanho o confere a propriedade de ser facilmente transportado.

Este gerador possui um sistema regulável de vazão do aerossol gerado. A vazão é controlada por uma válvula agulha localizada no topo do medidor de vazão. A vazão máxima de operação é 250 L/h, equivalente a, aproximadamente, 4,2 L/min, sendo a vazão mínima igual a 1,0 L/min. Tal equipamento é capaz de gerar

10^8 partículas/cm³, visto que a concentração de partículas geradas decresce com a redução da vazão volumétrica do aerossol.



Figura 3.5 – Gerador atomizador de aerossóis, modelo 3079 da TSI.

As partículas geradas se concentram abaixo de 1 μ m, uma vez que as gotas maiores, resultantes do processo de atomização, são removidas por impactação inercial na própria parede do atomizador, garantindo, desta forma, a produção de partículas na escala nanométrica.

A operação do equipamento é simples. Uma vez preparada a solução a ser atomizada, a mesma era armazenada em um recipiente interno, chamado porta-solução. Este porta-solução, apresentado na Figura 3.6, era rosqueado em um compartimento de aço-inoxidável que, por sua vez, devia permanecer fechado durante o funcionamento do equipamento. O volume do líquido neste recipiente era mantido entre 10 e 80 mL.



Figura 3.6 – Sistema de geração de partículas: (1) atomizador com saída para o aerossol e (2) porta-solução de vidro.

A operação do equipamento pode ser iniciada, assim que a solução estiver adequadamente armazenada e a vazão requerida ajustada. A Figura 3.7 ilustra o esquema de componentes do gerador atomizador.

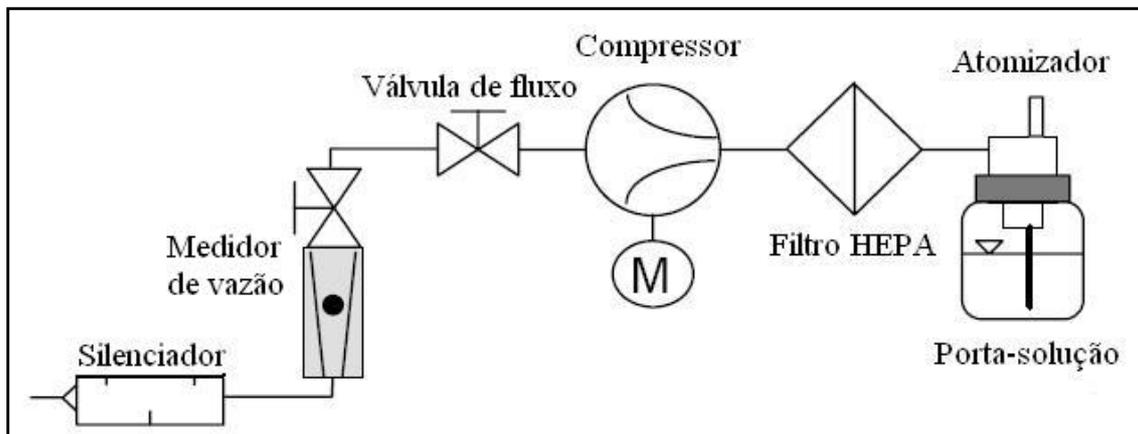


Figura 3.7 – Esquema do gerador atomizador, modelo 3079 da TSI. (Manual de serviço e operação do Gerador Atomizador, modelo 3079 da TSI).

3.1.4 – Secador de difusão

O secador de difusão da marca TSI, modelo 3062 apresentado na Figura 3.8, foi empregado com a finalidade de remover a umidade remanescente do fluxo do aerossol proveniente do gerador.

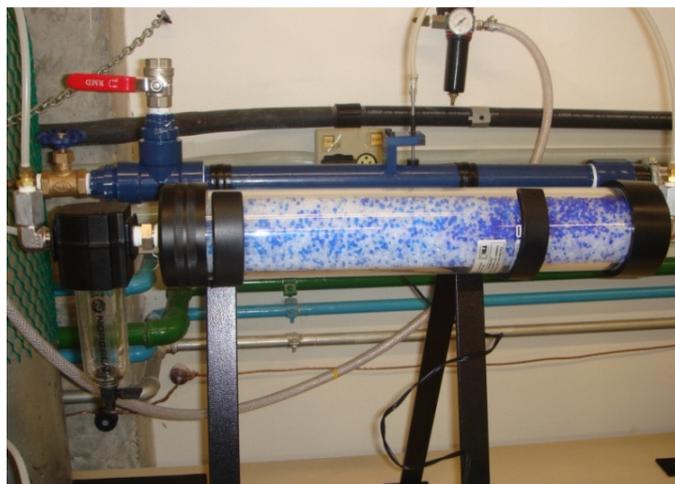


Figura 3.8 – Secador de difusão.

A estrutura do secador é composta por dois cilindros concêntricos, sendo o externo preparado com material acrílico e o interno formado por uma tela de fio metálico. O espaço entre os dois cilindros é preenchido com sílica-gel. Desta forma, ao passo que o aerossol úmido percorre através do cilindro interno, o vapor de água, através da tela, se difunde no espaço preenchido por sílica.

3.1.5 – 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.

Para tanto, foram utilizadas as fontes de Kriptônio 85 e a de Amerício 241. A primeira foi empregada logo após a passagem do aerossol pelo secador de difusão, enquanto a segunda, que estava acondicionada em uma caixa revestida de chumbo, foi justaposta antes do aerossol seguir para análise no equipamento que mede a concentração e a distribuição de tamanhos das partículas (*Scanning Mobility Particle Sizer* – SMPS). O uso da fonte de Amerício neste local foi necessário visto que o princípio de funcionamento do SMPS se baseia em uma técnica de detecção por mobilidade elétrica. Tal técnica 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.

3.1.6 – Dispositivo de filtração

O dispositivo de filtração, ilustrado na Figura 3.9, é o aparato em que os meios filtrantes eram acoplados à unidade. Tal dispositivo, de formato cilíndrico e construído de material PVC, apresentava uma área de filtração circular de 40,7 cm². Ainda, o mesmo possuía um comprimento de 40 cm e era composto por duas partes desmontáveis de 20 cm que garantiam a fixação dos meios filtrantes na unidade e

também facilitavam a troca dos mesmos. A região de junção destas seções possuía uma vedação assegurada pelo uso de *o'rigins*, com o propósito de evitar possíveis vazamentos do aerossol.



Figura 3.9 – Dispositivo de filtração.

As regiões internas das extremidades de ambas as partes do dispositivo, referentes à entrada e à saída do aerossol, possuíam formato cônico, com a finalidade de minimizar os efeitos de turbulência do gás ao adentrar e sair do mesmo. Adicionalmente, nesta mesma região concernente à entrada do aerossol, foi fixada uma grade metálica que promovia uma distribuição do aerossol de maneira uniforme dentro da tubulação.

Com a finalidade de evitar fraturas nos filtros durante a operação, colocou-se uma tela metálica de suporte na abertura da segunda parte do dispositivo, no local onde era feito o contato com os meios filtrantes. Além disso, dois conectores foram instalados em cada parte do dispositivo a fim de que a queda de pressão nos filtros fosse medida.

3.1.7 - Amostragem de partículas

A amostragem das partículas foi realizada através de sondas metálicas de 2 mm de diâmetro interno, curvada em ângulo reto e alinhada ao centro do duto no qual

escoava o aerossol. A Figura 3.10 esquematiza a disposição da sonda de amostragem no duto de escoamento do gás.

Para tanto, instalaram-se duas sondas coletoras neste duto, sendo uma disposta antes e outra depois do dispositivo de filtração, a uma distância de 26 cm do mesmo. O arranjo destas sondas na unidade experimental permitiu a realização de amostragens do aerossol antes e após os meios filtrantes, de tal forma a avaliar os seus desempenhos. O duto de escoamento do gás no ponto de amostragem possuía diâmetro interno de 2,6 cm.

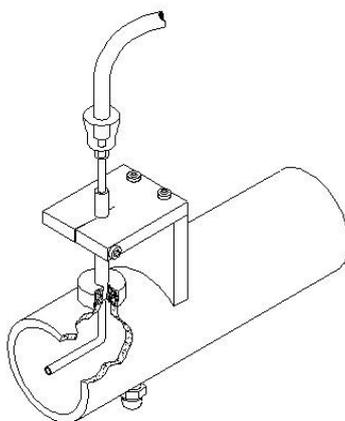


Figura 3.10 – Esquema da sonda de amostragem.

O sistema de filtração e amostragem do aerossol está esquematizado na Figura 3.11. Tal figura ilustra o alinhamento das sondas no duto de escoamento do gás, bem como os detalhes do dispositivo de filtração.

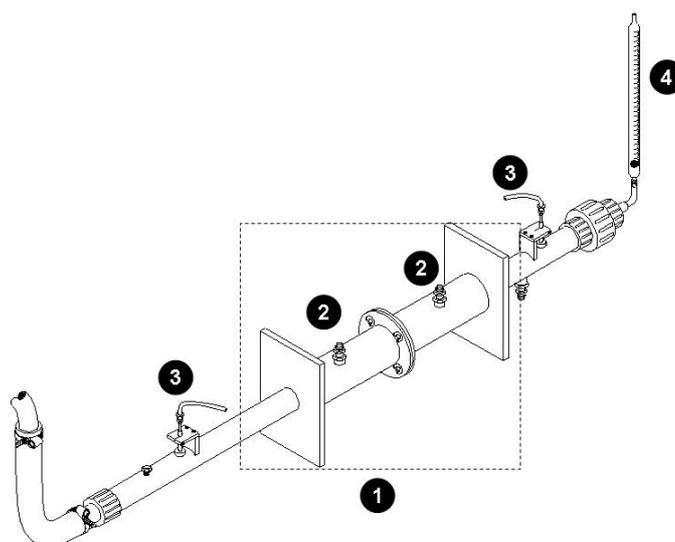


Figura 3.11 – Esquema da linha de filtração: (1) Dispositivo de filtração; (2) Conectores de medição de queda de pressão no filtro; (3) Sonda de amostragem; (4) Rotâmetro.

Cada sonda foi estabelecida no duto a uma distância de aproximadamente 30 cm do dispositivo de filtração, sendo que a posição longitudinal da sonda localizada antes do meio filtrante em relação ao início do duto era de 30 cm enquanto a segunda sonda apresentava uma distância longitudinal de 25 cm em relação à extremidade final do duto de escoamento. As sondas eram conectadas a uma mangueira de 0,5 cm de diâmetro interno que conduzia o aerossol amostrado. Estas mangueiras se conectavam a uma válvula de três vias que, por sua vez, foi empregada para garantir um acionamento alternado e imediato das amostragens antes e após os meios filtrantes. Desta forma, a seleção da amostragem requerida era realizada pelo acionamento manual da alavanca da válvula na posição correspondente à amostragem solicitada.

Foram avaliadas as condições de isocinetismo e não-isocinetismo na amostragem de partículas nanométricas. A primeira condição se refere à situação em que a velocidade na linha de amostragem é igual à velocidade na linha principal, enquanto a segunda condição corresponde às ocasiões em que as velocidades em ambas as linhas não são as mesmas. A metodologia destes testes está descrita na seção 3.2.1.2.

Para os experimentos em que se avaliou o desempenho dos meios filtrantes, foram realizadas amostragens sob condições não isocinéticas.

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, como observado na Figura 3.11.

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

A temperatura foi medida por meio de um medidor termopar da marca Tri-Sense, modelo 37000-90 da Cole-Parmer Instruments.

3.1.10 - Medidor de queda de pressão

A queda de pressão nos meios filtrantes foi medida pelo uso de um manômetro digital da marca *Sper Scientific Ltd*, Modelo 840080, cuja aferição máxima equivalia a 5 psi (34473,79 Pa, aproximadamente).

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

O Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (SMPS) da TSI, modelo 3936, é um equipamento capaz de fornecer a concentração de partículas nanométricas por faixa de tamanhos, diretamente do aerossol, através de amostragens *on-line*. O SMPS, visualizado na Figura 3.12, consiste de um Classificador Eletrostático, modelo 3080, acoplado a um Analisador de Mobilidade Diferencial (*Differential Mobility Analyser -DMA*) e de um Contador de Partículas Ultrafinas (*Ultrafine Condensation Particle Counter - UCPC*), modelo 3776. Ainda, o equipamento possui um Impactador Inercial (*Impactor Inlet*, Modelo 1035900 da TSI) e um software para aquisição de dados (390062, da TSI).

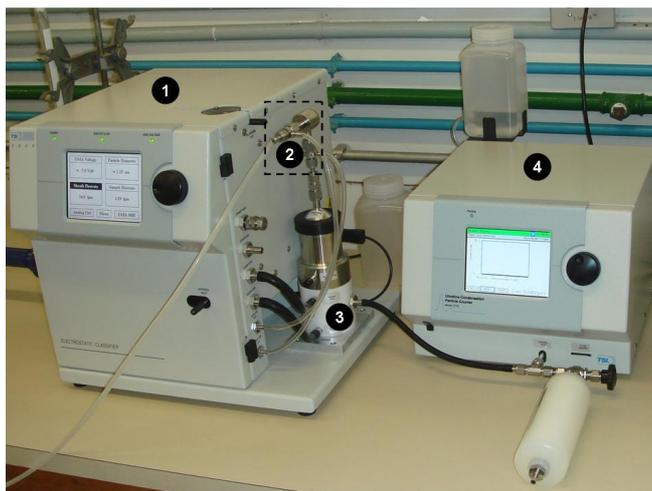


Figura 3.12 – SMPS: (1) classificador eletrostático; (2) impactador inercial; (3) torre Nano-DMA; (4) contador de partículas.

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, já o Nano-DMA, modelo 3085 da TSI, classifica partículas entre 2 e 165 nm. A Figura 3.13 ilustra estes dois tipos de Analisador de Mobilidade Diferencial (DMA).



Figura 3.13 – Analisador de Mobilidade Diferencial: (1) Long-DMA e (2) Nano-DMA.

O princípio de funcionamento do SMPS se baseia na medição das distribuições de tamanho das partículas usando uma técnica de detecção por mobilidade elétrica.

Primeiramente, o aerossol polidisperso e neutralizado passa pelo impactador, disposto na entrada do SMPS, onde as partículas maiores que o limite de detecção são removidas 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. Apenas uma fração estreita de partículas monodispersas sai do DMA através de uma pequena abertura em sua parte inferior e, então, segue para o UCPC, onde são feitas as medidas de concentração. A ilustração do princípio de funcionamento do DMA encontra-se na Figura 3.14.

Portanto, a partir da classificação das partículas, realizada no DMA, e da contagem das mesmas, no UCPC, obtém-se a análise do aerossol amostrado apresentada na forma de canais ou faixas de tamanhos de partículas e suas respectivas concentrações volumétricas.

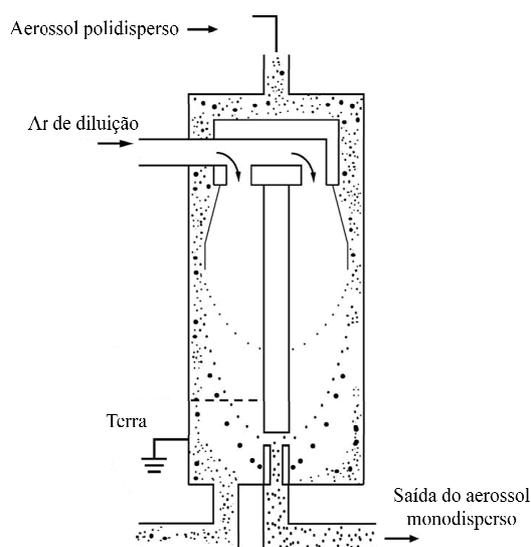


Figura 3.14 – Esquema de funcionamento do DMA.

A operação do SMPS é simples, desde que os parâmetros requeridos para seu funcionamento sejam estabelecidos apropriadamente. Dentre os parâmetros solicitados pelo equipamento para a sua configuração, destacam-se 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. Adicionalmente, o equipamento permite que a vazão de aerossol amostrado possa ser regulada em uma faixa compreendida entre 0, e 1,5 L/min.

O impactador (*Impactor Inlet*, Modelo 1035900 da TSI) pode ser usado com três tipos de orifícios, cujos diâmetros são: 0,0457, 0,0508 e 0,0710 cm. A combinação

entre o tamanho do orifício selecionado e a vazão do aerossol estabelecida dentro do SMPS determina o diâmetro de corte (d_c) das partículas no impactador.

Dentre os parâmetros operacionais pré-estabelecidos no SMPS para análise do aerossol destaca-se o *scan up* que se refere ao tempo em que as partículas são 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 *retrace* é o período requerido para a tensão retornar ao seu valor inicial, possibilitando, então, o início de um novo escaneamento. Adicionalmente, pode ser estabelecido, pelo usuário, o tempo de espera entre um escaneamento e outro (*break*).

A seleção adequada destes parâmetros é determinante para um bom desempenho do equipamento ao analisar o aerossol.

3.1.12 – Aerossol gerado

Para a geração de partículas nanométricas foi utilizado como material particulado o cloreto de sódio (NaCl) puro, da marca *Synth*, cuja densidade era equivalente a $2,165 \text{ g/cm}^3$.

Soluções aquosas de cloreto de sódio eram preparadas em diversas concentrações do soluto, utilizando-se para tanto água ultrapura como solvente. A utilização de água ultrapura foi imprescindível para garantir uma maior pureza da amostra. Para tanto, empregou-se o *Simplicity Ultrapure Water System*, da Millipore, que consiste em um purificador de água capaz de remover contaminantes remanescentes por meio da filtração por resinas de troca iônica.

3.1.13 – Meios filtrantes

Os meios filtrantes utilizados para promover a remoção de nanopartículas e, portanto, para avaliar seus desempenhos nesta operação foram os filtros de poliéster, de

celulose HEPA, de microfibras de quartzo e as membranas filtrantes. Nas seções seguintes, são apresentadas as principais características de cada meio filtrante.

3.1.13.1 – Filtro de poliéster

O filtro de poliéster, fornecido pela empresa Gino Cacciari Indústria e Comércio de Filtros de Tecidos Ltda, era constituído por fibras 100% poliéster e possuía espessura de 4,5 mm e peso de 550 g/m³. A Figura 3.15 ilustra a imagem do respectivo filtro obtida em Microscópio Eletrônico de Varredura.

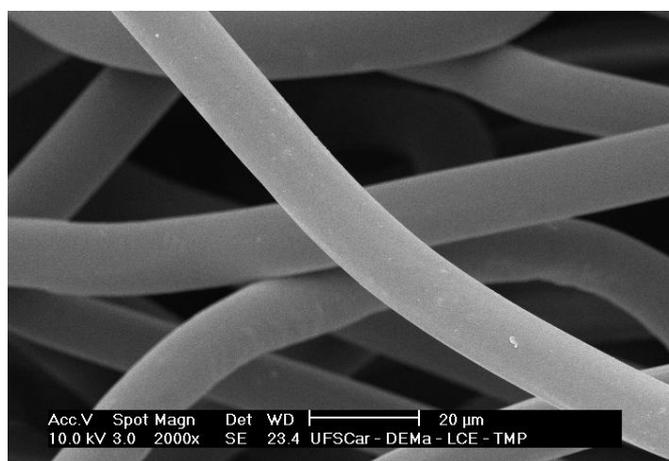


Figura 3.15 - Vista do filtro de poliéster obtida em MEV.

Em trabalhos anteriores desenvolvidos no DEQ-UFSCar, foram realizados ensaios de caracterização deste filtro a fim de determinar o diâmetro das fibras e sua porosidade. De acordo com os resultados obtidos no trabalho de Steffens (2007), o diâmetro médio das fibras foi de $16\mu\text{m}\pm 0,06$, enquanto sua porosidade média era de $0,882\pm 0,005$.

3.1.13.2 – Filtro de celulose HEPA

O filtro de celulose HEPA (*High Efficiency Particulate Air Filter*), segundo a empresa fornecedora VECO do Brasil Indústria e Comércio de Equipamentos Ltda,

apresenta espessura de 0,4 mm e peso de 80 g/m³. Este filtro, apresentado em imagem obtida em Microscópio Eletrônico de Varredura na Figura 3.16, é caracterizado por possuir fibras heterogêneas.

A partir de ensaios de caracterização desenvolvidos por Steffens (2007), verificou-se que os diâmetros das fibras variaram entre 0,075 e 2,35 µm. Ainda, pôde-se constatar que há predominância de fibras com menores diâmetros na faixa especificada, visto que este filtro apresentou um maior número de fibras com diâmetro médio de 0,43 µm, obtendo, também, poucas fibras com tamanhos maiores que 1,99 µm.

Adicionalmente, o filtro HEPA apresentou uma porosidade média de 0,920±0,005 (STEFFENS, 2007).



Figura 3.16 – Vista do filtro HEPA obtida em MEV.

3.1.13.3 – Filtro de microfibras de quartzo

O filtro de microfibras de quartzo, fornecido pela empresa Energética Indústria e Comércio Ltda., é caracterizado por apresentar espessura de 0,5 mm, porosidade de 0,698±0,015 e diâmetro médio das fibras de 1,09µm±0,08, segundo os resultados obtidos pelos ensaios de caracterização realizados por Silva (2008). A Figura 3.17 apresenta uma foto do filtro de microfibras de quartzo obtida em Microscópio Eletrônico de Varredura.

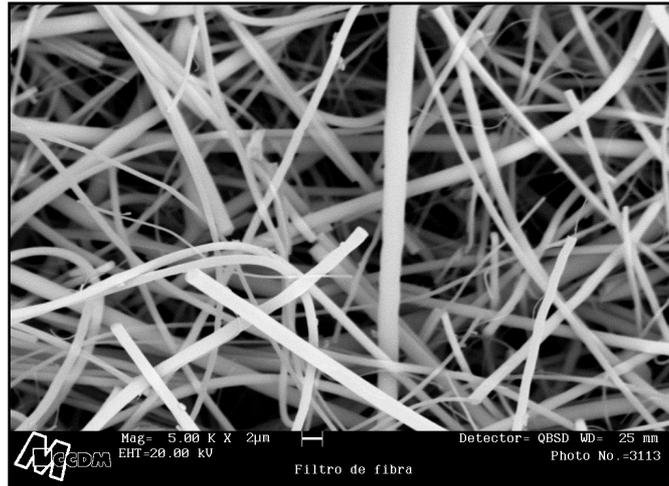


Figura 3.17 – Vista do filtro de microfibras de quartzo obtida em MEV.

3.1.13.4 – Membranas filtrantes

As membranas, da empresa Pam-Membranas Seletivas, são produzidas na forma de fibras ocas ou capilares, cuja composição é baseada em polímeros atóxicos, com elevada resistência mecânica, térmica e química. Tais membranas, ilustradas na Figura 3.18, são empregadas na separação de misturas gasosas e líquidas, sendo aplicadas nos processos de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, osmose inversa, diálise, eletrodialise, pervaporação e permeação de gases e vapores.

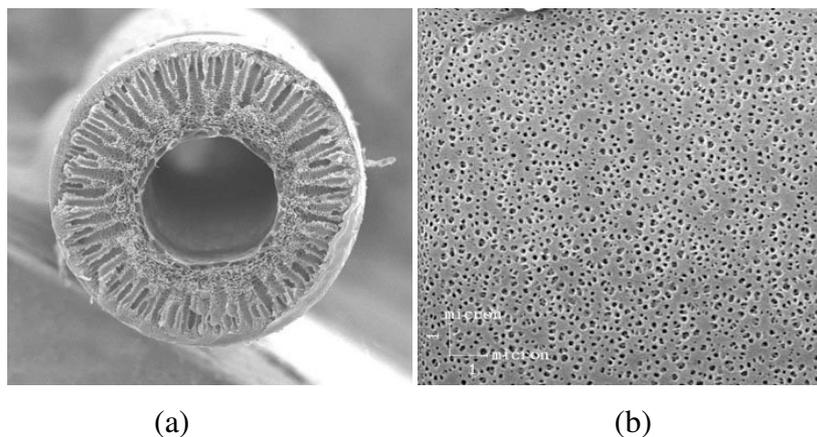


Figura 3.18 – Membranas filtrantes: (a) Corte transversal da membrana; (b) Superfície da membrana. (Fonte: www.pam-membranas.com.br).

As fibras, cujas paredes possuem microporos com diâmetro médio em torno de $0,2 \mu\text{m}$, são caracterizadas por apresentarem diâmetros externos equivalentes a $0,7 \text{ mm}$. O dispositivo filtrante era constituído por um conjunto de aproximadamente 1200 membranas contidas em um módulo de comprimento útil de 38 cm , ilustrado na Figura 3.19. Este módulo, cujo formato é de um tubo cilíndrico, possui diâmetro interno de $5,3 \text{ cm}$ e apresenta volume interno e área de permeação equivalentes a 900 cm^3 e 10000 cm^2 , respectivamente.

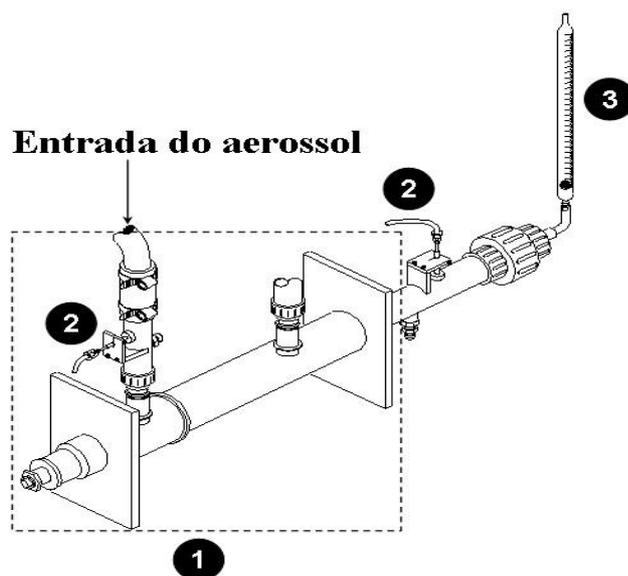


Figura 3.19 – Esquema da linha de filtração com a utilização das membranas: (1) Módulo das membranas; (2) Sonda de amostragem; (3) Rotâmetro.

O processo de filtração por meio das membranas consiste na alimentação do aerossol em um ponto localizado perpendicularmente à disposição das fibras no módulo, como observado na Figura 3.20. Tal configuração permite que, primeiramente, a distribuição do aerossol ocorra na direção radial, de tal maneira que o mesmo seja penetrado no interior das fibras. Desta forma, à medida que o aerossol atravessa o tubo pelo seu interior até o ponto de saída, partículas vão sendo depositadas nas paredes das membranas.

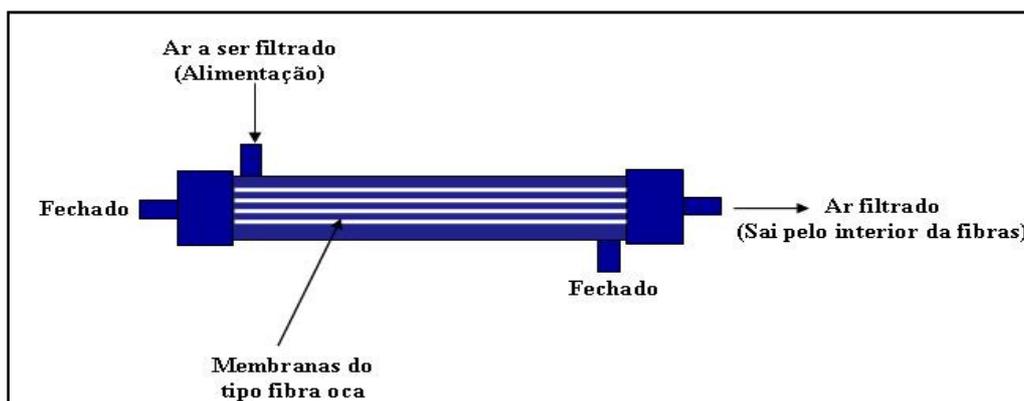


Figura 3.20 – Esquema do módulo das membranas.

3.2 - Procedimentos experimentais

Após o cumprimento das primeiras atividades do trabalho em questão que consistiu na concepção do projeto, na construção e montagem da unidade experimental, iniciou-se o desenvolvimento dos testes experimentais. As atividades experimentais foram subdivididas em duas etapas. A primeira é referente aos testes preliminares que são assim designados por se constituírem nos ajustes do aparato experimental para o controle da produção e remoção de partículas nanométricas de aerossóis. Esta etapa incluiu a determinação das condições ótimas de operação do gerador de partículas projetado e construído no DEQ-UFSCar, avaliações das condições dos procedimentos de amostragens do aerossol e estudo do desempenho do analisador de partículas de mobilidade elétrica (SMPS).

Uma vez definidos os parâmetros e as condições de operação para um bom funcionamento da unidade, deu-se o início da segunda fase. Esta fase consistiu na coleta de dados referentes à caracterização dos meios filtrantes, ou seja, na obtenção de dados determinantes para avaliar a eficiência de coleta dos filtros atuando na remoção de partículas nanométricas.

Os procedimentos de funcionamento da unidade experimental para a realização destes testes resultaram na simulação de uma contaminação de partículas nanométricas e polidispersas de NaCl. Desta forma, a geração de nanopartículas foi realizada a partir de uma solução de sal, preparada a uma concentração de 0,5 g/L.

O aparato experimental consistia em dois módulos independentes: o módulo de geração de partículas e a linha principal, onde as partículas geradas eram alimentadas na corrente de ar puro e, conseqüentemente, o aerossol produzido era neutralizado, filtrado e amostrado para análise. Quando se utilizou o gerador de nanopartículas construído no DEQ-UFSCar, a solução era então transferida para um 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. Quando se fez o uso do atomizador da TSI (Modelo 3079), a solução preparada era armazenada no recipiente interno (porta-solução) e a vazão era ajustada no valor de 4,0 L/min, visto que, quanto maior a vazão volumétrica do aerossol no gerador, maior é 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. Este ar seguia, através de uma mangueira PVC, até um regulador de pressão conjugado a uma válvula de ar com dreno manual, acoplada na entrada do sistema. A pressão máxima na entrada do sistema era 50 psi. O regulador de pressão distribuía o ar comprimido para dois filtros de purificação de ar (Modelo 3074B da TSI), utilizados também para a remoção de partículas remanescentes. 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. Posteriormente à inserção de nanopartículas nesta linha, o aerossol passava por uma fonte de Kriptônio-85, a fim de que as cargas eletrostáticas presentes nas partículas fossem neutralizadas. O aerossol neutralizado seguia para o dispositivo de filtração onde era filtrado. Neste percurso, o aerossol passava pelos dois pontos de amostragem localizados antes e após os meios filtrantes. A amostra de aerossol coletada pelas sondas era, então, conduzida ao SMPS. A vazão da linha principal era medida pelo rotâmetro, na saída do sistema. O aerossol remanescente da

linha principal era descartado. O esquema do procedimento experimental descrito encontra-se na Figura 3.21.

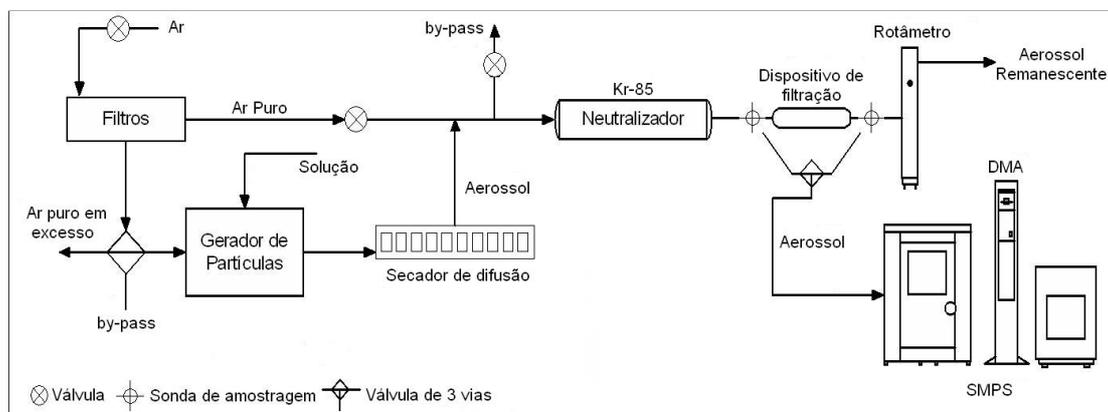


Figura 3.21– Esquema da unidade experimental.

A metodologia aqui descrita é comum para os testes experimentais das duas etapas, ou seja, para a etapa dos testes preliminares, como também para a etapa referente à avaliação do desempenho dos meios filtrantes. Porém, cada tipo de teste possui suas peculiaridades em relação aos seus respectivos procedimentos experimentais. A seguir, são descritos com mais detalhes os diferentes ensaios experimentais correspondentes as duas etapas mencionadas.

3.2.1 – Testes Preliminares - Otimização das condições de operação da unidade experimental.

3.2.1.1 – Avaliação do Gerador de Nanopartículas projetado no DEQ-UFSCar.

Os primeiros testes objetivaram avaliar a performance do gerador de partículas nanométricas projetado no DEQ-UFSCar. A finalidade do processo era monitorar as propriedades do aerossol através de medidas extensivas, tais como a distribuição de tamanhos e a concentração de nanopartículas em suspensão.

Diversos testes foram realizados com soluções aquosas de cloreto de sódio, incluindo réplicas experimentais nas concentrações de 10, 100, 200, 500, 750, 2000, 3000 e 5000 ppm (ou 0,01; 0,1; 0,2; 0,5; 0,75; 2; 3 e 5 g/L, respectivamente). Além da

produção de nanopartículas de cloreto de sódio (NaCl), o desempenho do gerador foi avaliado para outros materiais, dentre eles: amido solúvel P.A, sacarose P.A-A.C.S ($C_{12}H_{22}O_{11}$) e cloreto de potássio (KCl), todos da marca *Synth*. Para cada caso, a solução aquosa era preparada na concentração de 500 ppm (ou 0,5 g/L) do soluto.

Para análise do desempenho do gerador adotou-se a metodologia descrita anteriormente no tópico 3.2. Para tanto, o SMPS era configurado juntamente com as torres Nano-DMA e Long-DMA, com a finalidade de analisar tamanhos de partículas em uma ampla faixa nanométrica, tornando possível assim avaliar os limites operacionais para a produção de partículas na escala desejada.

Os testes foram realizados monitorando-se as distribuições de tamanho e a concentração total de partículas por unidade de volume de aerossol amostrado ($\#/cm^3$) para cada solução. Três réplicas experimentais foram executadas em cada caso particular. Para tanto, as faixas de diâmetros foram estabelecidas de acordo com as torres Nano-DMA (4,37 a 165,5 nm) e Long-DMA (13,8 a 749,9 nm), que promoviam uma varredura total de partículas com diâmetros compreendidos entre 4,37 e 749,9 nm. O orifício do impactador utilizado era 0,0457 cm. Como recomendado pelo manual do equipamento quando se utiliza este modelo de impactador, a vazão do aerossol amostrado no DMA era, então, estabelecida em 0,3 L/min, em uma corrente que mantinha a proporção de 10:1 em relação à vazão de ar de dissolução. O tempo *scan up* era ajustado em 300s, enquanto os tempos *retrace* e *break* eram equivalentes a 30 e 180s, respectivamente.

A vazão de aerossol da linha principal, que é a soma entre as vazões do aerossol produzido pelo gerador e do ar ultrapuro proveniente dos filtros de purificação, era mantida em 8,6 L/min.

As curvas de distribuições de tamanhos obtidas com o uso das torres Nano-DMA e Long-DMA eram superpostas para apresentação dos resultados para toda a faixa de diâmetros obtida.

3.2.1.2 – Avaliação das condições de amostragem do aerossol

A realização dos testes para a avaliação do efeito da amostragem isocinética de partículas nanométricas em aerossóis buscou investigar o comportamento

fluidodinâmico de tais partículas quando sujeitas a mudanças repentinas nas direções de escoamento do gás. A análise se baseou na comparação de medidas das distribuições de tamanhos das partículas coletadas por amostragens conduzidas em diferentes relações entre a velocidade do aerossol no duto de escoamento da linha principal e a velocidade do aerossol amostrado.

Para a realização de amostragens de aerossóis utilizando-se sondas coletoras, é necessário que haja um balanço entre as vazões do aerossol na linha principal e na entrada do dispositivo de amostragem e isso se dá em termos das velocidades do gás em ambos os dutos. Tal balanço garante que as partículas em suspensão não sejam succionadas em excesso ou discriminadas. Desta forma, quando a velocidade na linha de amostragem é igual à velocidade do sistema no duto de escoamento do gás da linha principal, a coleta é dita isocinética. Nos casos em que as velocidades não são as mesmas, a discriminação pode ocorrer para partículas maiores ou menores. Isso se dá devido à inércia das partículas, que a depender de suas massas, são impedidas de permanecer nas linhas de corrente e sofrem mudanças acentuadas na direção do fluxo do gás em que se encontram.

A importância da amostragem isocinética certamente depende do tamanho das partículas suspensas no aerossol e de sua densidade. Quando se trata de partículas compreendidas na escala micrométrica e em casos que a velocidade do gás no amostrador é maior que a velocidade do mesmo na linha principal, as partículas maiores (ou que contém mais massa) não conseguem descrever as mudanças repentinas em suas trajetórias nas vizinhanças do coletor e são discriminadas na amostra. Assim, sob tais condições, partículas menores são coletadas mais eficientemente. Em contrapartida, se a velocidade do aerossol na entrada do coletor é menor que a velocidade da linha principal, então as menores partículas acompanham o escoamento do gás através da alteração de suas trajetórias, enquanto as partículas mais pesadas são coletadas com maior eficiência. Adicionalmente, sabe-se que os efeitos inerciais no escoamento de nanopartículas se tornam desprezíveis devido às pequenas quantidades de massa das mesmas.

Portanto, parte dos testes preliminares teve como objetivo avaliar os efeitos das condições de isocinetismo e não-isocinetismo na amostragem de partículas nanométricas.

Para tanto, adotou-se o procedimento experimental descrito anteriormente no item 3.2, porém a configuração do SMPS se deu pela utilização da torre Long-DMA e

do impactador de orifício de 0,0710 cm. Esta configuração permitiu analisar partículas em uma faixa entre 6,04 e 245,8 nm. Ainda, a vazão de aerossol amostrado requerida pelo DMA era fixa 1,4 L/min, sendo que os valores dos tempos *scan up*, *retrace* e *break* foram estabelecidos em 300, 30 e 180s.

Para os testes com amostragem isocinética, utilizou-se um ar de diluição ultrapuro proveniente de um dos filtros de purificação de ar. A captação deste ar foi realizada por meio de um sistema de *by-pass* na entrada de ar do gerador. A vazão do ar de diluição era controlada por uma válvula presente neste sistema *by-pass*, sendo medida com o uso de um rotâmetro da marca Gilmont Instruments Inc, Modelo 31601-31700, número 3, com esfera de vidro. O ar de diluição (q_3) se misturava ao aerossol amostrado (q_2) através de um dispositivo de entroncamento em Y e, então, a corrente (q_T) era conduzida para análise no SMPS. O critério que garantia a condição de isocinetismo da amostragem era satisfeito ao se estabelecer a velocidade do aerossol no duto de escoamento do gás na linha principal, v_1 , igual à velocidade do aerossol no amostrador, v_2 . Para tanto, o controle da velocidade no amostrador se dava pelo controle da injeção do ar de diluição (q_3) no dispositivo de entroncamento em Y.

Todavia, de acordo com os limites operacionais da unidade experimental, o regime de escoamento do aerossol no duto de escoamento da linha principal é estritamente laminar. Estes limites operacionais são restringidos pelo diâmetro do duto de escoamento, que se manteve fixo em 2,6 cm, e pela velocidade do aerossol que, no caso e devido à configuração da unidade, permitiu que atingisse 41,6 cm/s como valor máximo nestes testes em que não envolveu a utilização de meios filtrantes.

Deste modo, o cálculo da velocidade do aerossol no duto de escoamento da linha principal (v_1) não pode ser obtido pela velocidade média no centro do duto, como é feito quando o escoamento é dito turbulento. Em casos de escoamento laminar, a velocidade no centro do duto é estimada pela Equação 3.1:

$$v_1 = \frac{2 q_1}{a_1} \left(1 - \frac{a_2}{2 a_1}\right) = \frac{8 q_1}{\pi d_1^2} \left(1 - \frac{d_2^2}{2 d_1^2}\right) \quad (3.1)$$

na qual q_1 , a_1 e d_1 são, respectivamente, a vazão volumétrica, área da seção transversal e diâmetro correspondentes ao duto da linha principal, sendo a_2 e d_2 , a área da seção transversal e o diâmetro do amostrador.

Desta forma, sendo $v_1=v_2$, pode-se obter a vazão requerida para a condição isocinética através da relação apresentada na Equação (3.2):

$$q_2 = q_1 \frac{a_2}{a_1} \quad (3.2)$$

na qual q_2 corresponde a vazão volumétrica no amostrador. A vazão total de material amostrado requerida para análise, $q_T = 1,4$ L/min, era equivalente a soma das vazões de aerossol amostrado, q_2 , e ar de diluição, q_3 . Enfim, o controle da injeção do ar de diluição (q_3) dependia, então, da vazão do aerossol no duto do sistema (q_1) e da vazão estabelecida pelo equipamento de análise, SMPS, (q_T). O esquema do procedimento experimental para a realização destes testes encontra-se na Figura 3.22.

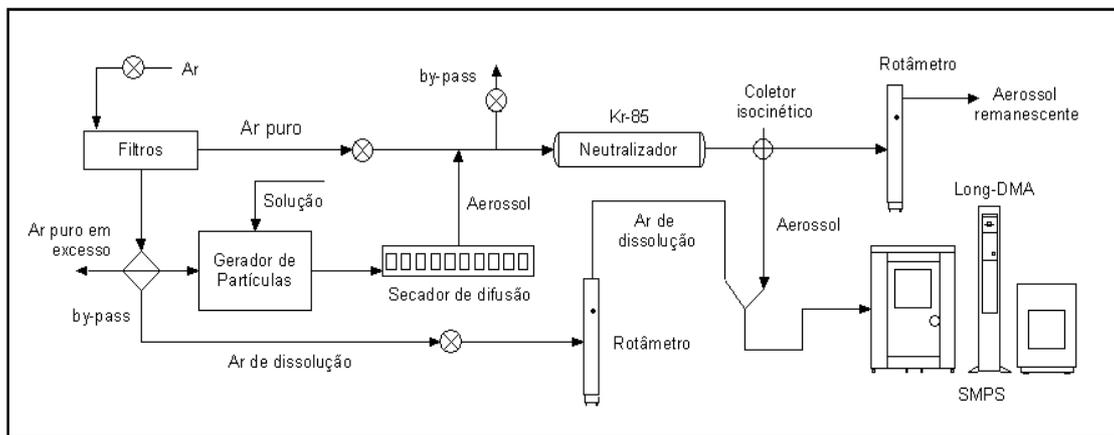


Figura 3.22 – Esquema da unidade experimental para a realização dos testes de avaliação das condições de amostragem do aerossol.

Foram avaliadas diversas condições variando-se a vazão do aerossol no duto de escoamento da linha principal, que, por sua vez, era estabelecida nos valores de 3,27; 5,17 e 7,15 L/min. Além disto, foram utilizados três bocais de diferentes diâmetros que se encaixavam na sonda de amostragem, na abertura do amostrador onde o aerossol adentrava, permitindo, de tal modo, avaliar diversos tamanhos de diâmetros do amostrador. Os bocais empregados apresentavam diâmetros internos de 0,65; 1 e 1,35 cm, como observado na Figura 3.23. Estas diferentes configurações possibilitaram variar a relação entre as velocidades na linha principal e no amostrador, garantindo uma maior flexibilidade operacional.

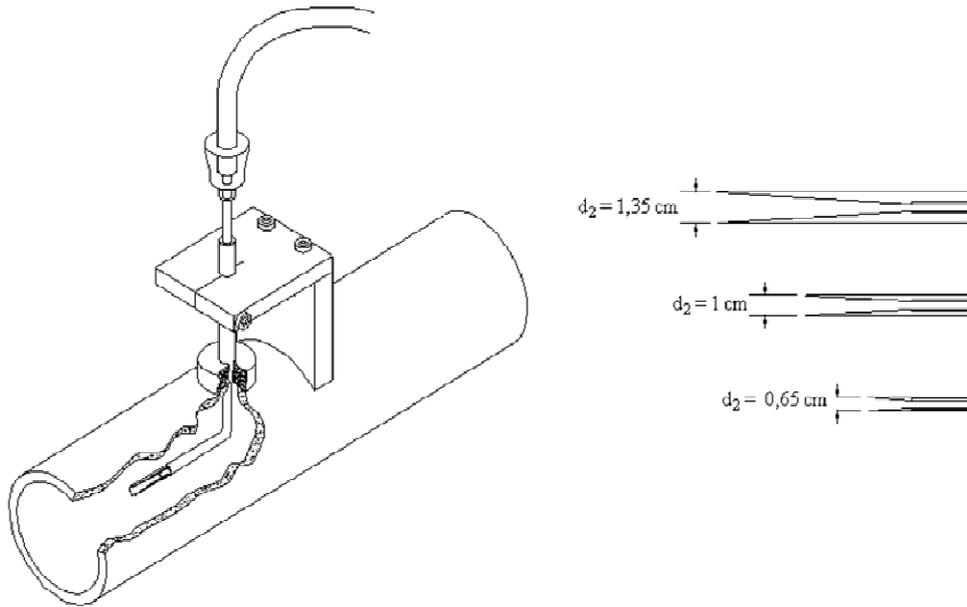


Figura 3.23 – Sonda de amostragem com bocais de diferentes tamanhos.

As amostragens eram realizadas sob diversas condições operacionais, combinando-se relações entre as velocidades do aerossol do sistema e do material amostrado, incluindo o caso isocinético. Para cada teste foram conduzidas três réplicas experimentais.

3.2.1.3 – Avaliação do Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica - SMPS

Diversos estudos vêm abordando o uso do SMPS em várias aplicações (FRANK et al., 2008; CHENG et al., 2007). Porém, alguns trabalhos relataram medidas incorretas de concentração de partículas, quando alguns parâmetros que configuram o SMPS eram incorretamente especificados em cada análise (HUANG et al., 2004; LIU e DESHLER, 2003). Estas variações nas medidas podem estar sujeitas ao modo em que o equipamento foi configurado ao analisar o aerossol. A fim de determinar condições adequadas para a operação do SMPS ao analisar aerossóis em escala nanométrica, estes testes visaram avaliar o desempenho deste instrumento, variando sua configuração e examinando os resultados de suas medidas. As alternâncias dos parâmetros do SMPS foram realizadas com o propósito de constatar a magnitude dos erros nas análises do

aerossol, e, assim, determinar as suas causas, designando os parâmetros apropriados para um bom funcionamento do equipamento.

Para a realização destes testes, seguiu-se a mesma metodologia descrita anteriormente no tópico 3.2. Porém, o procedimento de amostragem do aerossol foi realizado sob condição isocinética. O SMPS foi configurado com a torre Nano-DMA, utilizando-se impactadores de orifício de 0,0710 cm e de 0,0457 cm. O uso de impactadores de diferentes orifícios permitiu constatar o efeito dos mesmos sobre as medidas de concentração das partículas. Para cada tipo de impactador utilizado, variou-se a vazão do aerossol amostrado requerida pelo SMPS e os tempos *scan up*, *retrace* e *break*.

Desta forma, quando se utilizava o impactador de orifício 0,0457 cm, a vazão do aerossol amostrado requerida pelo SMPS era fixada no valor de 0,3 L/min e, conseqüentemente, o ar de diluição no DMA era ajustado em 3,0 L/min, visto que, como já mencionado, as vazões do ar de diluição no DMA e do aerossol amostrado devem-se constituir, respectivamente, uma relação de proporção de 10:1. Tal valor de vazão é recomendado pelo manual do equipamento quando o mesmo é operado com este modelo de impactador. A faixa de diâmetro analisada nestes testes estava compreendida entre 4,45 e 162,5 nm.

A configuração do SMPS com o impactador de orifício 0,0710 cm permitiu analisar partículas com diâmetros entre 2,09 e 66,1 nm. Os testes envolvendo a utilização deste impactador foram conduzidos alterando-se a vazão do aerossol amostrado. Tais experimentos visaram examinar a influência da vazão sobre a análise final do aerossol. Assim sendo, foram selecionados valores da corrente amostrada em 1,4 L/min e 0,3 L/min. É importante destacar que a vazão de 1,4 L/min é indicada pelo manual do equipamento quando se configura o SMPS com este modelo de impactador. Além disto, a vazão de 0,3 L/min foi selecionada com a finalidade de avaliar, com diferentes impactadores, o uso de uma mesma vazão do aerossol amostrado. Em suma, estes testes tiveram a finalidade de investigar o efeito sobre as medidas de concentração de partículas, ao utilizar diferentes impactadores e, concomitantemente, ao se alterar as vazões do aerossol amostrado no SMPS.

Ainda, para cada teste realizado alteraram-se os valores dos tempos *scan up*, *retrace* e *break*. Estes experimentos foram imprescindíveis para averiguar a influência destes parâmetros nas medidas de concentração das partículas. Desta forma, assim que o impactador e a vazão de aerossol haviam sido especificados, os tempos eram ajustados

nos valores desejados e, finalmente, a classificação e a contagem de partículas eram submetidas a dar início. No momento em que a análise chegava-se ao fim, tais parâmetros eram reajustados em outros valores, sendo iniciadas, então, novas análises.

Foram feitas diversas combinações destes parâmetros a fim de determinar diferentes configurações do equipamento para cada análise. Além disto, incluíram-se três réplicas experimentais para cada tipo de configuração. Os valores dos parâmetros do SMPS utilizados nos testes encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros utilizados na configuração do SMPS.

Impactador	Vazão (L/min)	Tempo (segundos)		
		<i>Scan up</i>	<i>Retrace</i>	<i>Break</i>
0,0710 cm	1,4	120, 180, 300	15, 60	0, 180
	0,3	120, 180, 300	15, 60	0, 180
0,0457 cm	0,3	120, 180, 300	15, 60	0, 180

A primeira configuração do SMPS foi caracterizada pela seleção do impactador de tamanho 0,0710 cm e pelo ajuste da vazão de aerossol amostrado em 1,4 L/min. Em seguida, os tempos *scan up*, *retrace* e *break* foram estabelecidos nos valores de 120, 15 e 0s, respectivamente. Quando a primeira análise, juntamente com suas respectivas réplicas, era concluída, somente o valor do *break* era alterado para 180s. Ainda, para este mesmo tempo de escaneamento (120s), o *retrace* fixado em 60s foi combinado com o *break* nos valores de 0 e 180s, respectivamente. Esta mesma combinação foi realizada para os tempos de escaneamento de 180 e 300s.

Foram improvisadas sucessivas combinações destes parâmetros para o mesmo impactador e vazão de aerossol amostrado, de maneira que todos os valores apresentados na Tabela 3.1 fossem agrupados. As possíveis combinações dos tempos *scan up*, *retrace* e *break* também foram arranjadas quando se configurava o SMPS com o uso do impactador de orifício 0,0710 cm operando com uma vazão de aerossol amostrado estabelecida em 0,3 L/min e quando se aplicava o impactador de orifício 0,0457 cm nas mesmas condições. Obtiveram-se, como resultado destas análises, curvas de concentração de partículas para cada faixa de tamanho.

3.2.2 – Testes relacionados ao desempenho dos meios filtrantes

O desempenho dos meios filtrantes operando na remoção de partículas nanométricas do aerossol produzido foi avaliado através de experimentos cuja metodologia foi apresentada anteriormente no tópico 3.2. Primeiramente, avaliou-se a atuação do filtro de poliéster nesta operação e, em seguida, foram analisados os filtros HEPA e de micro-fibras de quartzo, respectivamente. Estes filtros foram preparados e ajustados no dispositivo de filtração descrito anteriormente no item 3.1.6. Para os testes nos quais se fez o uso das membranas, o dispositivo de filtração foi retirado para que o módulo das membranas fosse acoplado à unidade experimental.

As condições operacionais empregadas nestes testes foram selecionadas a partir das análises dos testes preliminares comentados anteriormente. Desta forma, a amostragem do aerossol foi realizada sob condição não isocinética, sendo que o aerossol amostrado, antes de seguir para análise no SMPS, foi conduzido até a fonte de Amerício 241. O uso da fonte de Amerício foi determinado através de ensaios que investigaram seu efeito sobre as análises do aerossol em relação às medidas de concentração de partículas. Assim sendo, devido ao princípio de funcionamento do SMPS e às diferenças nas medidas de concentração de partículas quando se fazia, ou não, o uso da fonte, constatou-se a necessidade de neutralizar o aerossol antes de conduzi-lo para análise no espectrômetro. Os resultados destes ensaios encontram-se no Apêndice A.

A execução destes testes, quanto à configuração do SMPS, se deu pelo uso do impactador 0,0710 cm e da torre Long-DMA, de forma que a faixa de partículas analisadas estivesse compreendida entre 6,15 e 241,4 nm. Ainda, a vazão do aerossol amostrado requerida pelo SMPS era de 1,4 L/min e os tempos *scan up*, *retrace* e *break* foram ajustados, respectivamente, nos valores de 300, 15 e 0s. Tais valores referentes aos tempos foram estabelecidos devido aos resultados dos testes da seção 3.2.1.3 (Avaliação do Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica – SMPS) que se encontram na seção 4.1.3 do Capítulo 4, correspondente aos Resultados e Discussões.

A Figura 3.24 apresenta o esquema da unidade experimental utilizada para a realização destes testes.

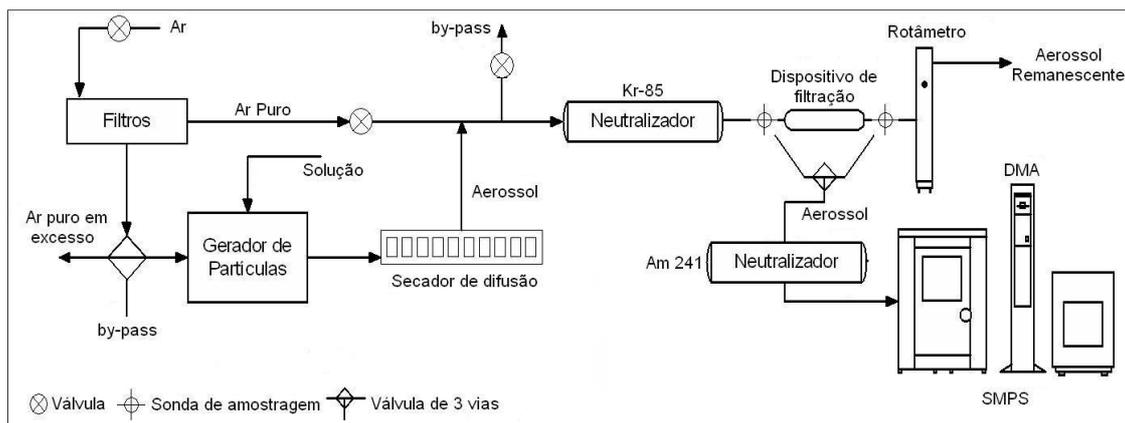


Figura 3.24 – Esquema da unidade experimental para a realização dos testes relacionados ao desempenho dos meios filtrantes.

O gerador de partículas empregado nestes experimentos foi o atomizador da TSI (modelo 3079), uma vez que o mesmo se destaca por garantir maior estabilidade na geração de partículas, principalmente para testes de longa duração. Além disso, este equipamento possui a propriedade de ajustar a vazão de saída do aerossol que, por sua vez, concede a possibilidade de se estabelecer maiores velocidades do gás no duto de escoamento da linha principal. Isto é explicado pelo fato de que o estabelecimento de velocidades relativamente altas na unidade dificulta a alimentação do aerossol no duto da linha principal, devido à contra-pressão exercida pelo sistema.

Em virtude disto, as vazões estudadas nestes testes para o filtro de poliéster foram 2,56; 4,78; 7,55; 9,96; 12,4; 14,7; 17,1; 19,5; 21,9 e 24,6 L/min, que correspondem, respectivamente, as velocidades de filtração de 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9 e 10 cm/s. Para os filtros HEPA e de microfibras de quartzo avaliaram-se as velocidades de 1 a 9 cm/s, uma vez que, na velocidade de 10 cm/s, não foi possível alimentar o aerossol no duto de escoamento da linha principal devido à contrapressão existente no sistema. Pelo mesmo motivo, nos ensaios envolvendo a aplicação das membranas só foi possível examinar as velocidades de filtração de 1 a 8 cm/s.

3.2.2.1 – Determinação da eficiência dos meios filtrantes

Uma vez que o sistema estivesse gerando partículas nanométricas regularmente, assim como a vazão requerida tivesse invariavelmente ajustada e os

parâmetros do SMPS já estivessem estabelecidos, a análise do aerossol era iniciada. Primeiramente, analisava-se o aerossol antes do dispositivo de filtração e, em seguida, ao se modificar a posição da válvula de três vias, conduzia-se, então, a análise do aerossol após o meio filtrante. Foram realizadas três réplicas deste procedimento. Estes testes foram realizados para cada velocidade de filtração estipulada. Durante a operação de filtração, o manômetro era conectado ao dispositivo de filtração e, então, a queda de pressão no meio filtrante era medida.

O desempenho dos meios filtrantes era obtido a partir dos cálculos das eficiências fracionárias, ou seja, das eficiências para cada faixa de tamanho das partículas. A eficiência é dada em termos da porcentagem, sendo expressa pela Equação 3.3:

$$E = \frac{C_0 - C_E}{C_0} \quad (3.3)$$

na qual C_0 e C_E referem-se as concentrações de partículas antes e após a passagem pelo meio filtrante, respectivamente.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Testes preliminares

4.1.1 - Avaliação do gerador de partículas nanométricas projetado no DEQ-UFSCar

O desempenho do gerador de partículas nanométricas projetado no DEQ-UFSCar foi avaliado em relação à produção de nanopartículas para diversas concentrações de sal de cloreto de sódio das soluções aquosas. Além disso, observou-se a atuação do mesmo quando se preparou soluções a partir de diferentes solutos, tais como a sacarose, amido solúvel e cloreto de potássio.

Desta forma, a distribuição de tamanhos e a concentração total de partículas por volume amostrado foi examinada para cada solução preparada. Para todos os testes, a vazão do aerossol na linha principal era mantida em 8,6 L/min. A geração de partículas de cloreto de sódio foi realizada a partir de diversas concentrações de soluto (0,01; 0,1; 0,2; 0,5; 0,75; 2; 3 e 5 g/L) e obteve como resultado as curvas de distribuições de tamanhos, mostradas na Figura 4.1.

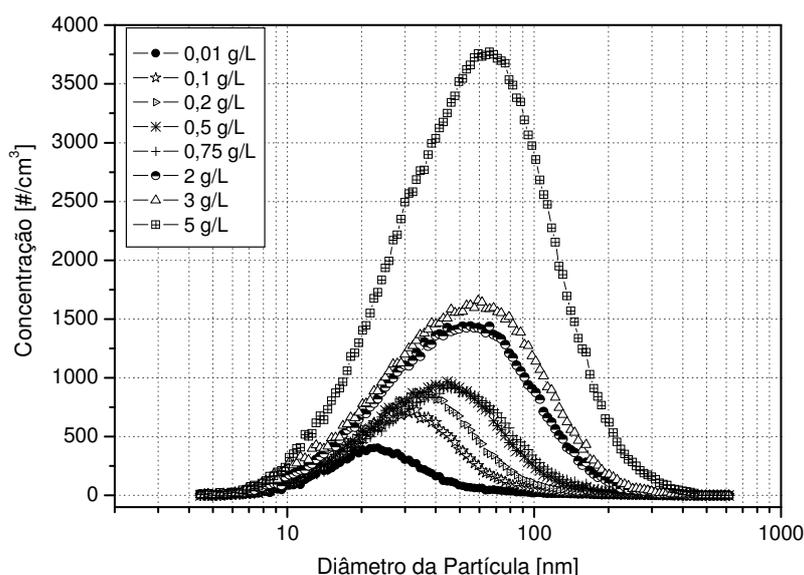


Figura 4.1 - Distribuições de tamanhos de partículas para diferentes soluções aquosas de NaCl.

Cada curva apresentada na Figura 4.1 representa a média aritmética de três réplicas experimentais. Ainda, a faixa de tamanhos de partículas analisada compreende diâmetros entre 4,37 e 749,9 nm. Torna-se evidente, a partir de tal figura, que o gerador se mostrou eficiente para a produção de partículas compreendidas na escala nanométrica que, no caso, é a faixa de interesse do estudo. As curvas representam a capacidade que o gerador possui em produzir nanopartículas de cloreto de sódio para as diversas concentrações do soluto. Nota-se que ao passo que a solução salina era mais concentrada, o diâmetro médio da distribuição aumentava. Isto permite que o gerador seja aplicado em casos em que se deseja produzir partículas com diâmetros médios previamente estabelecidos. A Figura 4.2 apresenta a relação entre os diâmetros médios das curvas de distribuição e a concentração de sal da solução.

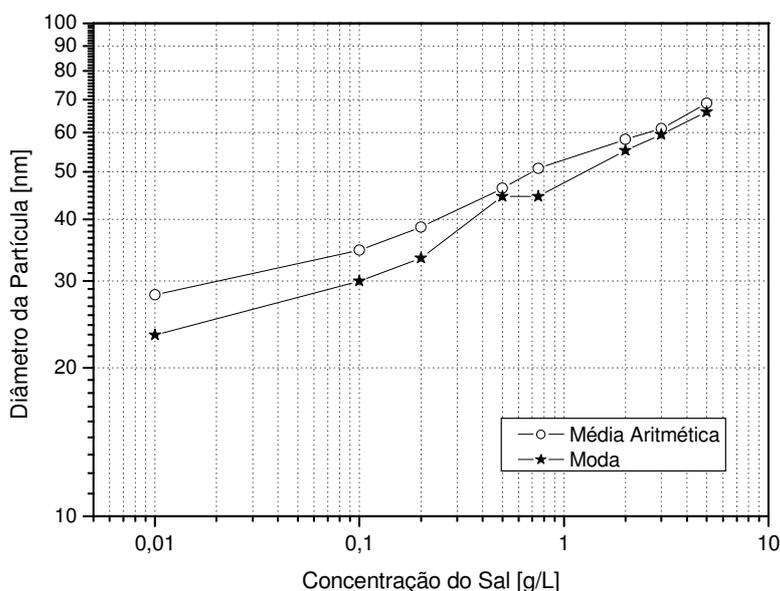


Figura 4.2 - Diâmetro da partícula como função da concentração do sal.

Observa-se que os maiores diâmetros de partículas foram obtidos para as maiores concentrações do soluto. Ainda, a Figura 4.2 mostra que à medida que se aumenta a concentração de sal, a moda, ou seja, o valor do diâmetro de maior concentração observado no aerossol, se assemelha ao valor do diâmetro calculado pela média aritmética.

A Figura 4.3 apresenta o desvio padrão geométrico para cada concentração das soluções atomizadas.

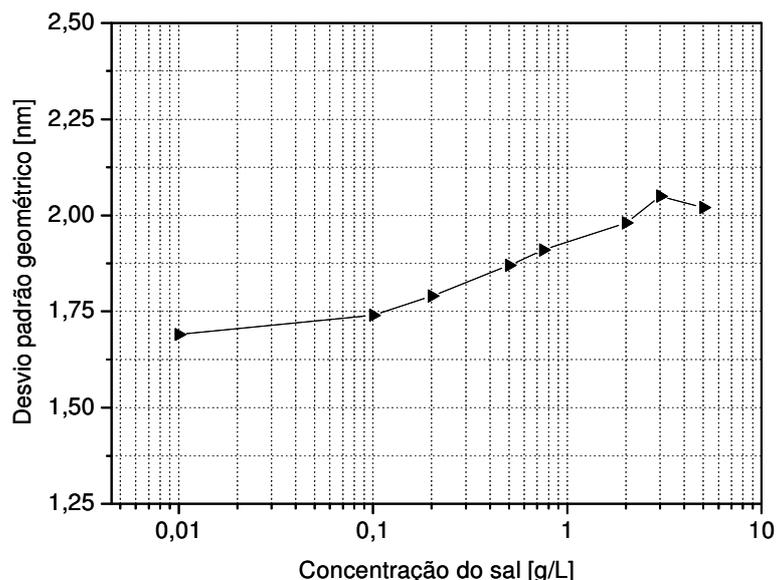


Figura 4.3 – Comportamento do desvio padrão geométrico como função da concentração do sal.

Para soluções com baixas concentrações de sal, o desvio padrão geométrico apresentou valores discretamente menores. Isto pode ser um indicativo para justificar a instabilidade na geração de partículas pela atomização quando se aumenta a concentração de tais soluções.

A Figura 4.4 apresenta o número total de partículas produzidas pelo gerador por unidade de volume do aerossol [$\#/cm^3$] como função da concentração de sal da solução atomizada.

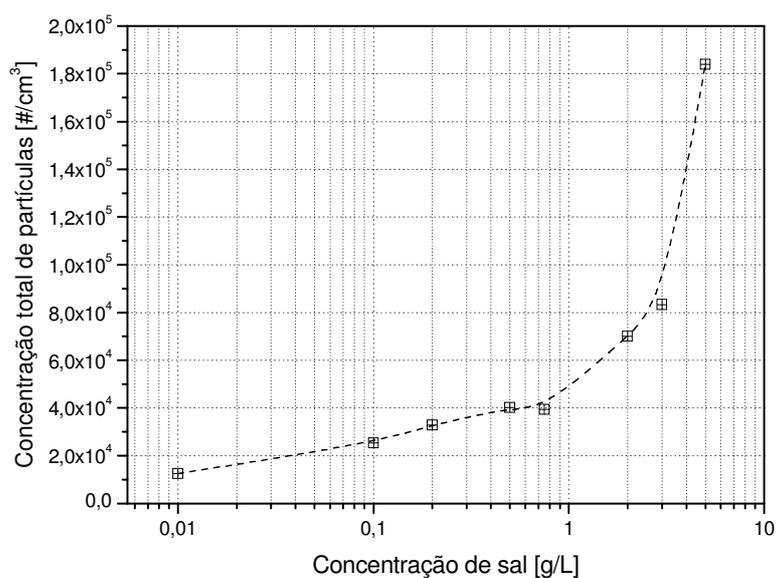


Figura 4.4 – Concentração total de partículas no aerossol, como função da concentração de sal na solução.

Nota-se que quanto maior era a concentração de cloreto de sódio na solução atomizada, maior era a concentração total de partículas no aerossol formado. Esta relação é explicada pelo fato de que quanto maior a concentração de sal na solução, maior é o diâmetro final da partícula e conseqüentemente maior a probabilidade da mesma se quebrar em partículas menores aumentando a concentração total por volume do aerossol.

Estas figuras evidenciam a eficiência do gerador em produzir aerossóis na escala nanométrica. Além disso, para as faixas de concentrações de cloreto de sódio estudadas, certificou-se que a concentração total de nanopartículas produzidas variou de $1,2 \cdot 10^4$ a $1,8 \cdot 10^5$ $\#/cm^3$.

Por conseqüência, com a finalidade de constatar a produção de partículas de NaCl pelo gerador, foram realizadas análises de amostras contendo nanopartículas do sal através do uso do Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET – TECNAI de 200 kV). A solução de NaCl utilizada para a geração de partículas apresentava uma concentração de soluto equivalente a 0,5 g/L. As amostras foram obtidas através da deposição das partículas nanométricas nas grades de cobre do porta amostra, requerido por tal equipamento. Tal deposição foi realizada por meio de um sistema de jato, com vazão de saída do gerador controlada, a fim de evitar a obstrução da grade de cobre. As análises em MET foram realizadas no Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar. A Figura 4.5 ilustra a imagem de uma partícula produzida pelo gerador, através da análise no MET.

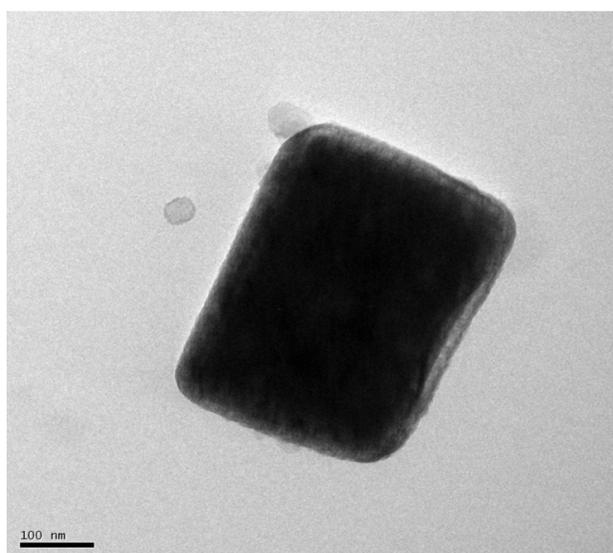


Figura 4.5 – Visualização de uma partícula em MET obtida a partir de uma solução de NaCl de concentração de 0,5 g/L.

De acordo com a Figura 4.5, é possível constatar, a partir de avaliações de artigos disponíveis na literatura, que partículas de NaCl possuem forma cúbica com as pontas levemente arredondadas. No entanto, durante a análise em MET, não foi verificada grande quantidade de partículas depositadas nas grades, conferindo, no caso, apenas partículas isoladas. Provavelmente, isto se deve a técnica de preparação da amostra que, por consequência, necessita ser aprimorada para as próximas análises.

Por fim, a Figura 4.6 expõe os últimos testes referentes à avaliação do gerador de nanopartículas construído no DEQ-UFSCar. Tais testes concernem à capacidade do gerador em produzir partículas nanométricas a partir de soluções de sacarose, amido solúvel e cloreto de potássio. Desta forma, a Figura 4.6 apresenta, para os diferentes solutos, as curvas de concentração de partículas produzidas para cada diâmetro analisado. Para cada caso, as soluções aquosas eram preparadas na concentração de 0,5 g (500 ppm) do soluto por litro.

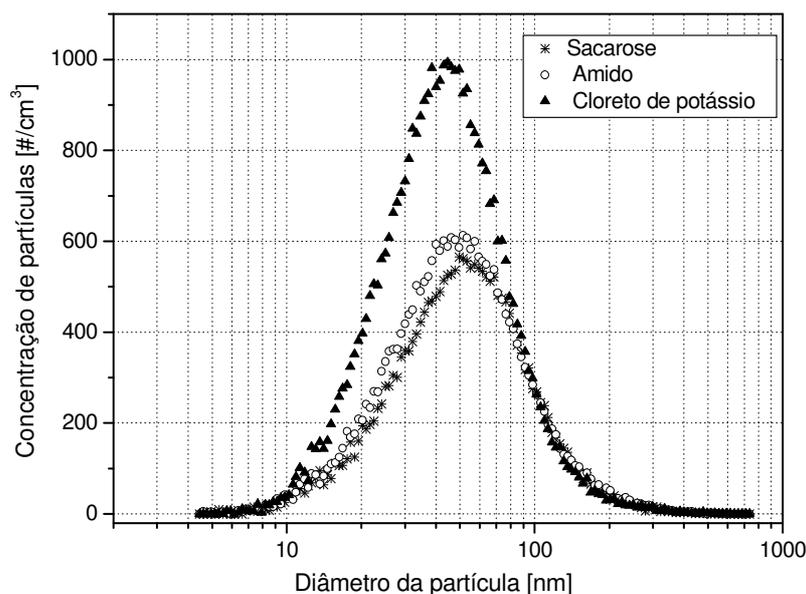


Figura 4.6 - Distribuições de tamanhos de partículas de diferentes sólidos.

As curvas apresentadas na Figura 4.6 também foram obtidas através da média aritmética de três réplicas para cada material. Nota-se que o gerador é capaz de produzir aerossóis de outros materiais solúveis em água na escala nanométrica.

4.1.2 – Avaliação das condições de amostragem do aerossol.

Primeiramente, testes com o propósito de avaliar o efeito da amostragem isocinética de partículas nanométricas foram realizados para uma mesma vazão do aerossol no sistema (linha principal), ou seja, mantendo-se q_1 fixo, com e sem a adoção dos critérios de isocinetismo nas amostragens. Como primeiro passo, os ensaios realizados envolveram testes em que a amostragem do aerossol era feita sob condições isocinéticas e não isocinéticas. Assim, em casos de coleta sob condição de não isocinetismo, foram analisadas ocorrências em que a velocidade do aerossol no duto de escoamento da linha principal (v_1) era menor que a velocidade do aerossol no amostrador (v_2), isto é, a coleta do aerossol era realizada acima da categoria isocinética que, neste estudo, denominou-se de condição sobre-isocinética. Neste mesmo sentido, também foram realizados testes em que a velocidade do aerossol no duto de escoamento da linha principal (v_1) era maior que a velocidade do aerossol no amostrador (v_2), sendo, então, designado como condição sub-isocinética.

Com o propósito de satisfazer estas condições, realizaram-se testes em que se variou a injeção de ar de diluição em diversas proporções (0, 10, 25, 36, 50, 75 e 90%) na corrente de aerossol requerida pelo SMPS, de forma a avaliar diferentes categorias de amostragem. A Tabela 4.1 apresenta as condições operacionais dos testes. A vazão do sistema (q_1) era mantida fixa em 3,27 L/min que, corresponde, a uma velocidade (v_1) de 19 cm/s, enquanto a vazão total de aerossol conduzido para o espectrômetro (q_T) era 1,4 L/min. O diâmetro interno do coletor utilizado nestes experimentos era 1 cm.

Uma vez conhecidas a vazão do sistema (q_1) e as áreas do duto de escoamento da linha principal (a_1) e do amostrador (a_2), determinava-se, então, a vazão do aerossol no coletor (q_2), utilizando-se a Equação (3.2). Sabendo-se também que o espectrômetro SMPS promovia uma vazão de sucção do aerossol amostrado (q_T) equivalente a 1,4 L/min, calculava-se, portanto, a vazão do ar de diluição, visto que a soma das vazões do ar de diluição (q_3) e da corrente de aerossol amostrado pelo coletor (q_2) correspondia à vazão total do aerossol amostrado requerida pelo SMPS (q_T). Como explicado no item 3.2.1.2 do Capítulo Materiais e Métodos, o ar de diluição, proveniente de uma corrente na entrada do gerador, era controlado através do ajuste da válvula presente no sistema *by-pass*. Desta forma, era possível manipular a velocidade de amostragem na sonda.

Quanto maior a quantidade de ar de diluição liberado, menor era o fluxo de aerossol saindo do sistema e sendo conduzido ao espectrômetro SMPS. O fechamento completo da válvula que fornecia o ar de diluição garantia a máxima vazão de aerossol amostrado (1,4 L/min). Por outro lado, caso a válvula fosse aberta no ponto em que o rotâmetro do ar de diluição media a vazão total requerida pelo SMPS, nenhum material era amostrado na linha do sistema e apenas ar puro era succionado pelo espectrômetro. A amostragem isocinética era garantida, portanto, pela determinação da vazão no amostrador, através da Equação (3.2), e da abertura da válvula de alimentação de ar de diluição, tal que a velocidade de amostragem do aerossol pudesse ocorrer na mesma velocidade do aerossol no interior do sistema (v_1).

Tabela 4.1 - Condições operacionais para os testes de variação da injeção do ar de diluição.

Ar diluição [%]	Vazão do ar de diluição q_3 [L/min]	Vazão requerida pelo SMPS q_T [L/min]	Vazão no amostrador q_2 [L/min]	Velocidade no sistema v_1 [cm/s]	Velocidade no amostrador v_2 [cm/s]	Condição
0	0	1,4	1,4	19,0	29,7	Sobre-isocinética
10	0,14	1,4	1,26	19,0	26,7	
25	0,35	1,4	1,05	19,0	22,3	
36	0,504	1,4	0,896	19,0	19,0	Isocinética
50	0,7	1,4	0,7	19,0	14,9	Sub-isocinética
75	1,05	1,4	0,35	19,0	7,4	
90	1,26	1,4	0,14	19,0	3,0	

As condições operacionais, apresentadas na Tabela 4.1, se distinguem em relação às proporções de ar de diluição no material amostrado que, por sua vez, proporcionaram diferentes velocidades de aerossol no amostrador (v_2) para uma mesma vazão de aerossol no sistema (q_1). No teste em que não houve injeção de ar de diluição (q_3), a vazão de aerossol amostrado (q_2) era constante e igual a 1,4 L/min, que produzia uma velocidade de 29,7 cm/s no amostrador, superior à velocidade no duto do sistema (v_1).

A Figura 4.7 mostra, para todas as condições de amostragem apresentadas na Tabela 4.1, a relação entre a concentração de partículas para cada faixa de tamanho e a concentração total de partículas no aerossol, por unidade de volume da amostra, fornecendo, então, a porcentagem de partículas analisadas para cada diâmetro. Isto

permitiu verificar a influência da velocidade de amostragem durante a coleta de partículas nanométricas no interior de dutos e, conseqüentemente, analisar as distribuições provenientes de diferentes amostragens (sub-isocinética, isocinética e sobre-isocinética).

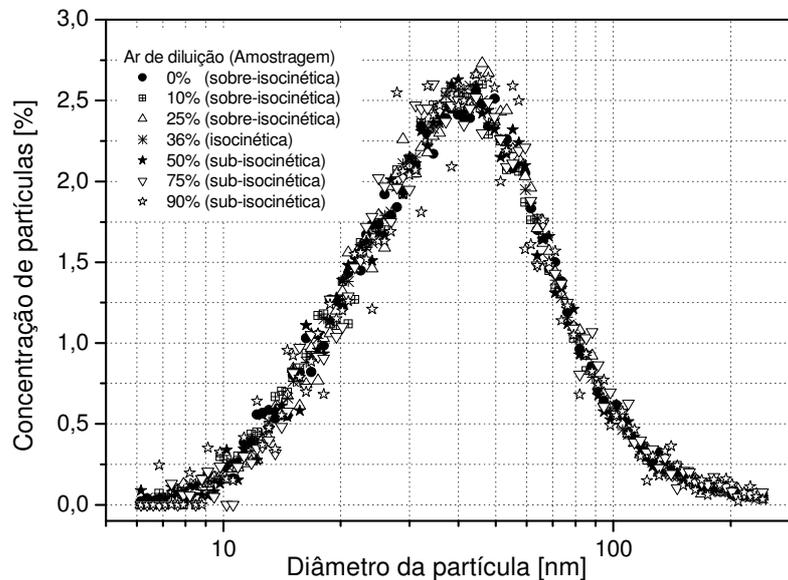


Figura 4.7 – Comparação das distribuições de tamanhos de partículas nanométricas em termos das porcentagens de concentrações para diversas condições de amostragem.

De acordo com a Figura 4.7, nota-se que em diferentes condições de amostragem não ocorreu discriminação de partículas ou coleta preferencial, visto 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.

Se as partículas contidas no aerossol abrangessem a escala micrométrica na situação em que não houvesse injeção de ar de diluição ($q_3 = 0$) e, conseqüentemente, a vazão do aerossol amostrado (q_2) fosse equivalente a 1,4 L/min, isto é, nos casos em que a velocidade no amostrador (v_2) é superior a velocidade do aerossol no sistema (v_1) (condição sobre-isocinética), observaria, no aerossol amostrado, uma maior quantidade de partículas de menores diâmetros. Em se tratando de partículas nanométricas, a fluidodinâmica das mesmas não seguiu o comportamento descrito por partículas micrométricas e os efeitos inerciais durante o escoamento se mostraram desprezíveis.

Ainda, na Figura 4.7, nota-se que os maiores desvios são observados para grandes vazões de ar de diluição e isso certamente se deve ao dispositivo de entroncamento (em Y) no qual as vazões de ar de diluição (q_3) e de aerossol amostrado (q_2) eram misturadas e que, desta forma, não garantiu uma boa homogeneidade da mistura sob tais condições. Assim, para todas as condições de amostragem avaliadas (sub-isocinética, isocinética e sobre-isocinética), não foi verificada coleta preferencial, seja de partículas menores ou maiores.

A próxima etapa na avaliação das condições de amostragem de aerossóis nanométricos foi examinar diferentes vazões do aerossol no sistema (q_1), mantendo-se a vazão do aerossol amostrado (q_2) fixa. As vazões de aerossol (q_1) empregadas foram 3,27, 5,17 e 7,15 L/min que correspondem, respectivamente, às velocidades do sistema (v_1) equivalentes a 19, 30,1 e 41,6 cm/s que, por sua vez, foram calculadas a partir da Equação 3.1. Para a realização destes experimentos, foi utilizado o coletor com diâmetro de sonda fixo igual a 1 cm. Além disto, não houve injeção de ar de diluição ($q_3 = 0$), a fim de que a vazão do aerossol amostrado (q_2) correspondesse apenas à vazão de sucção promovida pelo espectrômetro SMPS (q_T), ou seja, $q_2 = q_T = 1,4$ L/min. Tais condições proporcionaram categorias de amostragens isocinética e não isocinética, como pode ser observado na Tabela 4.2.

Os resultados obtidos com base nas condições operacionais apresentadas na Tabela 4.2 são ilustrados na Figura 4.8.

Tabela 4.2 - Condições operacionais para os testes de amostragem do aerossol variando a vazão do aerossol no sistema (q_1).

Vazão no sistema q_1 [L/min]	Vazão no amostrador q_2 [L/min]	Vazão requerida pelo SMPS q_T [L/min]	Vazão do ar de diluição q_3 [L/min]	Velocidade no sistema v_1 [cm/s]	Velocidade no amostrador v_2 [cm/s]	Condição
3,27	1,4	1,4	0	19,0	29,7	Sobre-isocinética
5,17	1,4	1,4	0	30,1	29,7	Próxima da isocinética
7,15	1,4	1,4	0	41,6	29,7	Sub-isocinética

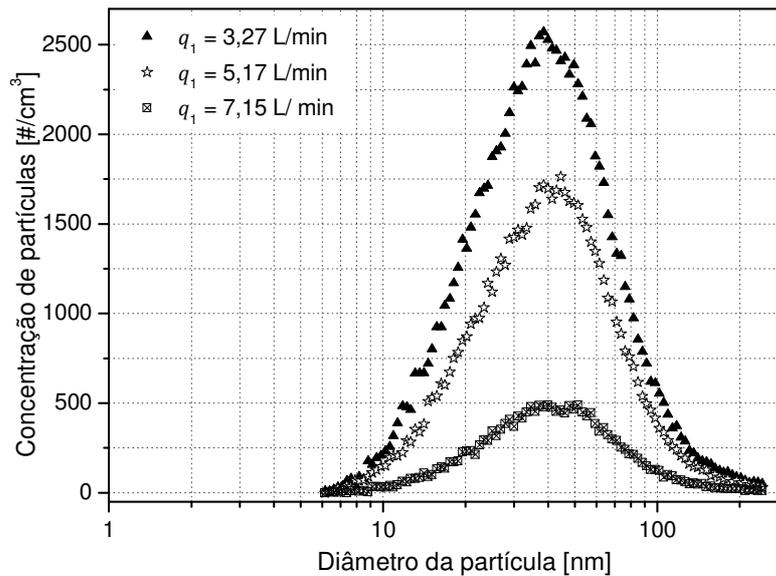


Figura 4.8 – Curvas de distribuições de tamanhos de partículas nanométricas de aerossóis: amostragens isocinética e não isocinética.

Pela análise da Figura 4.8, observa-se que as curvas de distribuições de tamanhos de partículas nanométricas, que representam os ensaios feitos sob amostragem isocinética e não isocinética, apresentaram as mesmas tendências em seus comportamentos. A diferença na magnitude das concentrações de partículas por volume de aerossol amostrado se deve às diferentes condições operacionais que caracterizaram os testes. Com o aumento da vazão do aerossol no sistema (q_1), ou seja, no duto de escoamento da linha principal, verifica-se uma diminuição nas medidas de concentrações de partículas amostradas. Esta ocorrência se deve ao aumento da corrente de ar proveniente dos filtros de purificação, haja vista que a vazão do gerador na produção de partículas permaneceu constante em todos os ensaios. Portanto, uma maior de vazão de ar puro acarreta uma diluição do aerossol dentro do sistema. Em contrapartida, não se observa diferença significativa nas proporções das concentrações para cada faixa de tamanho, como pode ser observado na Figura 4.9.

A Figura 4.9 apresenta a relação da concentração de partículas para cada faixa de tamanho com a concentração total de partículas no aerossol, por unidade de volume da amostra, para todas as condições de amostragem apresentadas na Tabela 4.2.

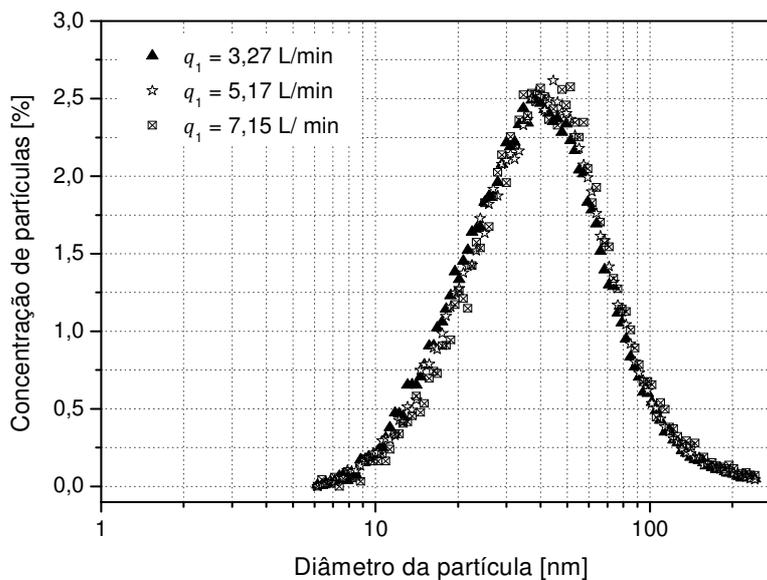


Figura 4.9 - Comparação das distribuições de tamanhos de partículas nanométricas em termos das porcentagens de concentrações para cada faixa de diâmetro: amostragens isocinética e não isocinética.

Pela análise da Figura 4.9, certifica-se que o comportamento de partículas nanométricas em aerossóis difere das partículas micrométricas pelo fato de que são capazes de acompanhar o escoamento do fluido no qual escoam, mesmo quando submetidas a variações bruscas na direção de escoamento, como nas vizinhanças de sondas coletoras. Tal característica mostra que as nanopartículas são dificilmente coletadas por impactação e que os efeitos inerciais no arraste das mesmas são desprezíveis. Ainda, em aerossóis cujas partículas suspensas compreendem a faixa nanométrica, nota-se que a representatividade das propriedades de escoamento em dutos independe do tipo da condição em que uma amostragem com sonda coletora é realizada, seja isocineticamente ou não.

Por fim, com o propósito de constatar a afirmação de que a amostragem de aerossóis nanométricos com sonda coletora independe da condição de escoamento, os próximos testes buscaram analisar o efeito da relação entre o diâmetro do orifício de entrada do coletor (d_2) e o diâmetro do duto de escoamento do aerossol no sistema (d_1). A fim de verificar a influência de tal relação no processo de amostragem do material, utilizaram-se diferentes diâmetros de sondas (d_2), equivalentes a 0,65; 1 e 1,35 cm, enquanto manteve-se fixo o duto de escoamento do aerossol da linha principal (d_1), cujo diâmetro interno era 2,6 cm. Desta forma, variou-se razão entre as áreas das seções

transversais do duto do sistema (a_1) e do amostrador (a_2). A vazão do sistema foi estabelecida em 3,27 L/min para todos os casos.

A Tabela 4.3 apresenta as condições operacionais dos testes.

Tabela 4.3 - Condições operacionais para os testes de variação do diâmetro do amostrador.

Diâmetro do amostrador d_2 [cm]	Vazão no sistema q_1 [L/min]	Vazão no amostrador q_2 [L/min]	Vazão requerida pelo SMPS q_T [L/min]	Vazão do ar de diluição q_3 [L/min]	Velocidade no sistema v_1 [cm/s]	Velocidade no amostrador v_2 [cm/s]	Condição
0,65	3,27	0,896	1,4	0,504	19,9	45,0	Sobre-I.
1	3,27	0,896	1,4	0,504	19,0	19,0	I.
1,35	3,27	0,896	1,4	0,504	17,7	10,4	Sub-I.

Sobre-I. – Sobre-isocinética; I – Isocinética e Sub-I – Sub-isocinética.

O arranjo de diferentes configurações para este teste permitiu examinar ensaios sob distintas condições de amostragem, como observado na Tabela 4.3. A Figura 4.10 apresenta as curvas de distribuições de tamanho para as três sondas coletoras utilizadas e a influência de diferentes condições de amostragem de partículas nanométricas de aerossóis.

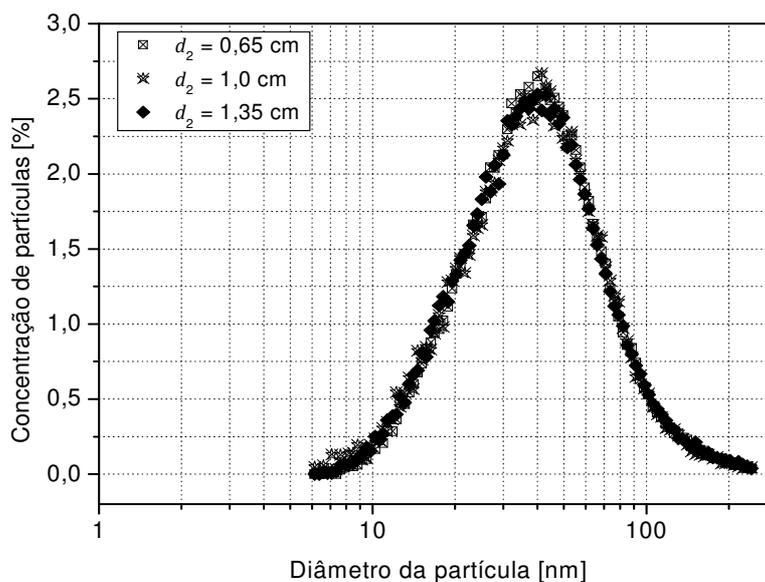


Figura 4.10 - Efeito da amostragem de partículas nanométricas de aerossóis coletadas por sondas com diferentes diâmetros (d_2): 0,65, 1,0 e 1,35 cm.

Pela análise da Figura 4.10, nota-se que a amostragem de partículas nanométricas em aerossóis independe da relação entre os tamanhos da sonda coletora e do duto de escoamento do aerossol da linha principal. Ainda, é constatado que nos três casos nos quais se utilizou diferentes diâmetros de sondas coletoras e foram conduzidas condições de amostragem díspares, as curvas de distribuição de tamanhos em termos da concentração total de partículas, em porcentagem de material coletado, se sobrepõem, indicando que os efeitos inerciais são desprezíveis para partículas nanométricas e a amostragem independe da condição de isocinetismo.

Para as condições avaliadas, observa-se que a velocidade de coleta de partículas nanométricas de aerossóis no interior de dutos não interfere na qualidade da amostra. Por outro lado, não se percebe alteração nas propriedades extensivas do aerossol do sistema, tais como concentração de partículas por unidade de volume e distribuição de tamanhos.

4.1.3 – Avaliação do desempenho do Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (SMPS)

Avaliou-se o desempenho do espectrômetro SMPS ao utilizar o mesmo para analisar um aerossol cujas partículas suspensas estavam compreendidas em escala nanométrica. Tal avaliação foi efetuada através de diversos testes nos quais a configuração do equipamento era modificada em cada experimento. Assim, para cada caso, o aerossol amostrado era conduzido ao espectrômetro onde se procedia a análise em termos de medidas da 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). Para cada teste, executavam-se três réplicas experimentais.

A vazão do aerossol no sistema era mantida constante em 3,27 L/min e a amostragem do aerossol era efetuada sob condição isocinética. O SMPS era configurado para operar com a torre Nano-DMA, utilizando-se dois modelos de impactadores, com tamanhos do orifício iguais a 0,0710 cm e 0,0457 cm. A determinação da faixa de diâmetro a ser analisada pelo SMPS dependia da escolha da torre DMA, do modelo do impactador e do valor da vazão de aerossol amostrado requerida por tal equipamento.

Deste modo, tais parâmetros eram combinados entre si para a avaliação de seus efeitos principais. O primeiro arranjo se fez com o uso da torre Nano-DMA e do impactador de orifício 0,0710 cm ao aplicar uma vazão de aerossol amostrado fixada em 0,3 L/min. A segunda disposição distinguiu-se da primeira em relação ao modelo de impactador utilizado que, neste caso, foi selecionado o de orifício 0,0457 cm. Ambas configurações permitiram estabelecer uma análise de partículas na faixa compreendida entre 4,53 e 159,6 nm. Por fim, a terceira combinação constituiu-se em estabelecer a vazão de aerossol amostrado em 1,4 L/min e utilizar a torre Nano-DMA acoplada ao impactador de orifício 0,0710 cm. Tal arranjo permitiu a análise de partículas com diâmetros compreendidos entre 2,05 e 67,3 nm.

Para cada uma destas três combinações descritas, alternaram-se os valores dos tempos *scan up*, *retrace* e *break*, como apresentado na Tabela 3.1 do Capítulo 3. O intuito da variação da configuração do espectrômetro SMPS era avaliar o efeito que cada parâmetro proporcionava na análise do aerossol. Desta forma, o primeiro teste consistiu em investigar a magnitude dos efeitos destes tempos nas análises do aerossol, para cada um dos três arranjos relacionados aos usos do DMA, do impactador e do valor da vazão do aerossol amostrado.

Ao se adotar o primeiro arranjo mencionado (impactador de orifício 0,0710 cm e vazão de aerossol amostrado de 0,3 L/min), pôde-se definir a primeira configuração do SMPS a ser examinada que, por sua vez, dependeu fundamentalmente dos ajustes dos tempos *scan up* em 120s, *retrace* em 15 e 60s e *break* em 0 e 180s. A Figura 4.11 ilustra os resultados das análises do aerossol ao operar o SMPS com a antecedente configuração.

A partir da Figura 4.11, nota-se que as curvas de distribuição de tamanhos, em termos de porcentagem, apresentam o mesmo comportamento para diâmetros acima de 10 nm, ainda que os valores dos tempos *retrace* e *break* tenham sido submetidos à alteração. Por outro lado, observa-se a ocorrência de um efeito, do tipo “*fish hook*”, nas medidas de concentração de partículas cujos tamanhos compreendem valores inferiores a 10 nm. Este efeito é caracterizado por uma elevação da curva nesta faixa de diâmetro (4,53 a 10 nm), implicando em um comportamento atípico da mesma nesta região. Esta anormalidade pode ser referida a uma superestimação das medidas de concentração de partículas que envolvem esta faixa de tamanho. Ainda, nesta mesma figura, verifica-se que tal efeito é atenuado quando o *break* é estabelecido em 180s, ou seja, em situações em que houve um tempo de espera de 180s entre uma análise e outra.

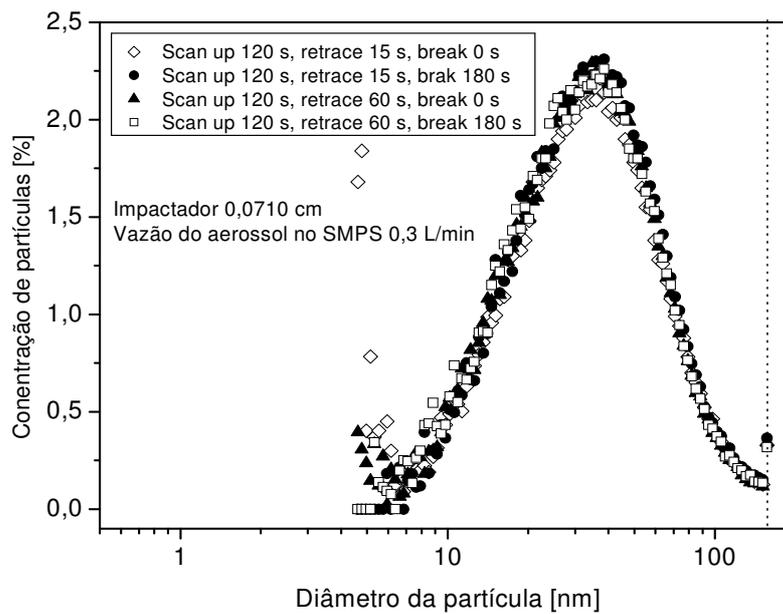


Figura 4.11: Distribuições de tamanho para testes com diferentes configurações do SMPS: impactador de 0,0710 cm, vazão do aerossol no SMPS de 0,3 L/min e *Scan up* de 120s.

As Figuras 4.12-a e 4.12-b referem-se aos testes nos quais a configuração do SMPS se assemelha à primeira conformação (impactador de orifício 0,0710 cm, vazão do aerossol amostrado de 0,3 L/min, *retrace* 0 e 15s e *break* 0 e 180s), entretanto a diferença se encontra no valor estabelecido para o tempo *scan up*. A Figura 4.12-a representa os experimentos conduzidos a um tempo de escaneamento de 210s, enquanto os testes em que a análise é realizada durante 300s estão concebidos na Figura 4.12-b. As curvas de distribuição de tamanho apresentadas nas Figuras 4.12-a e 4.12-b exibiram o mesmo comportamento observado nas curvas da Figura 4.11, sendo que as mesmas figuras se distinguem em relação ao valor do tempo *scan up*. Adicionalmente, observa-se a presença do efeito *fish hook* mencionado anteriormente referente à superestimação das medidas de concentração de partículas cujos diâmetros estão abaixo de 10 nm. Logo, isto é um indicativo de que a constituição de tal efeito independe do tempo em que é realizada a análise do aerossol dentro do SMPS.

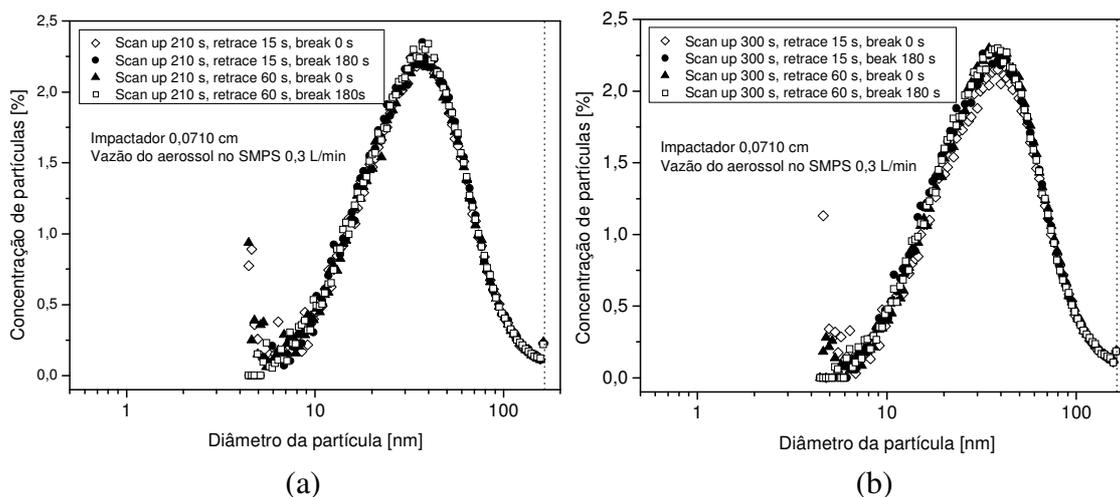


Figura 4.12 - Distribuições de tamanho para testes com diferentes configurações do SMPS: impactador de 0,0710 cm e vazão do aerossol no SMPS de 0,3 L/min, sendo (a) *Scan up* de 210s e (b) *Scan up* de 300s.

Através de um diagnóstico minucioso das Figuras 4.11 e 4.12, nota-se que ao comparar as curvas em que os tempos *scan up* e *break* têm seus valores fixos e o *retrace* é modificado (exemplo: *scan up* 300s e *break* 0s), observa-se uma leve diminuição do efeito previamente descrito quando o *retrace* tem seu valor acrescido. Do mesmo modo, ao passo que o valor do *break* é aumentado, o efeito é ainda mais reduzido, independente do valor estabelecido para o *retrace*. Isto pode ser explicado pelo fato de que quando são submetidas análises sequenciais, ou seja, quando não se estabelece um tempo de espera entre duas análises, considera-se admissível que ainda haja partículas presentes (partículas residuais) dentro do contador de partículas (UCPC). A presença destas partículas residuais está atribuída, dentre outros fatores, à perda por difusão das mesmas dentro do equipamento, visto que a vazão do aerossol analisado é relativamente baixa e, conseqüentemente, o tempo de permanência das mesmas no equipamento também. Logo, quando o SMPS é submetido a analisar o aerossol no momento em que a análise anterior foi concluída, a varredura é iniciada sem que a recirculação das partículas dentro do equipamento tenha sido finalizada, de modo a removê-las totalmente.

Este mesmo efeito também é percebido nos testes nos quais o SMPS foi configurado com uso do impactador de orifício 0,0457 cm e vazão do aerossol amostrado de 0,3 L/min e que, igualmente, aplicavam-se alternadamente os valores dos tempos *scan up*, *retrace* e *break*, já citados. Os resultados destes testes estão ilustrados nas Figuras 4.13 e 4.14.

Pela análise de tais figuras, nota-se que, como nos testes anteriores, o comportamento atípico das curvas de distribuição também ocorreu em faixas de tamanho abaixo de 10 nm. Uma vez que a corrida é caracterizada por baixos valores de *break* e *retrace*, medidas incorretas de concentração de partículas são ocasionadas, induzindo, assim, a conclusões errôneas. Como era de se esperar e já discutido, a redução desta implicação é feita adotando-se o mesmo procedimento, ou seja, aumentando-se o *retrace* e, principalmente, o *break*, como se pode observar nas figuras. O acréscimo destes tempos contribui com o aumento do tempo de recirculação das partículas no equipamento, especialmente no UCPC, evitando, de tal modo, a presença de partículas residuais que possam vir a ser contadas.

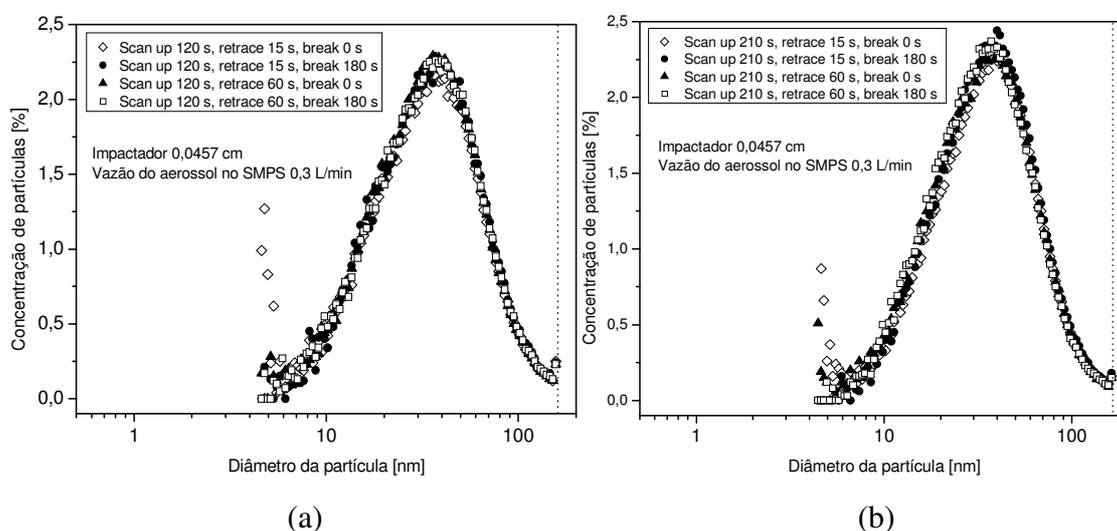


Figura 4.13 - Distribuições de tamanho para testes com diferentes configurações do SMPS: impactador de 0,0457 cm e vazão do aerossol no SMPS de 0,3 L/min, sendo (a) *Scan up* de 120s e (b) *Scan up* de 210s.

Ao confrontar as Figuras 4.11 e 4.13-a, assim como as Figuras 4.12-a e 4.13-b ou 4.12-b e 4.14, observa-se que o tamanho do orifício do impactador é o parâmetro diferencial entre os testes representados por tais figuras. Certamente, a dedução de que a modificação do modelo do impactador não acarreta uma diferença significativa nas análises do aerossol é válida, nestas situações, desde que se alerte que a vazão do aerossol amostrado se manteve fixa em 0,3 L/min. Adicionalmente, pela análise dos gráficos, certifica-se que a porcentagem de concentração de partículas para cada faixa de diâmetro possui, aproximadamente, o mesmo valor, independente da configuração do SMPS.

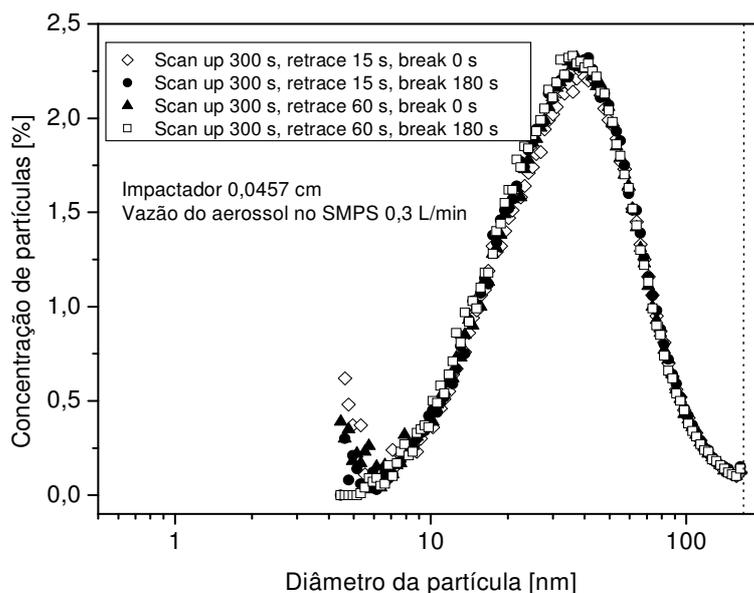


Figura 4.14 - Distribuições de tamanho para testes com diferentes configurações do SMPS: impactador de 0,0457 cm, vazão do aerossol no SMPS de 0,3 L/min e *Scan up* de 300s.

Os próximos testes foram conduzidos operando-se o SMPS com o impactador de orifício 0,0710 cm e estabelecendo em 1,4 L/min a vazão de aerossol amostrado requerida pelo espectrômetro. Esta configuração do SMPS permitiu analisar aerossóis nanométricos em uma faixa de tamanho entre 2,05 e 67,3 nm. Para esta conformação, também se aplicaram os valores dos tempos *scan up*, *retrace* e *break*, mencionados anteriormente. As Figuras 4.15 e 4.16 ilustram os resultados destes experimentos.

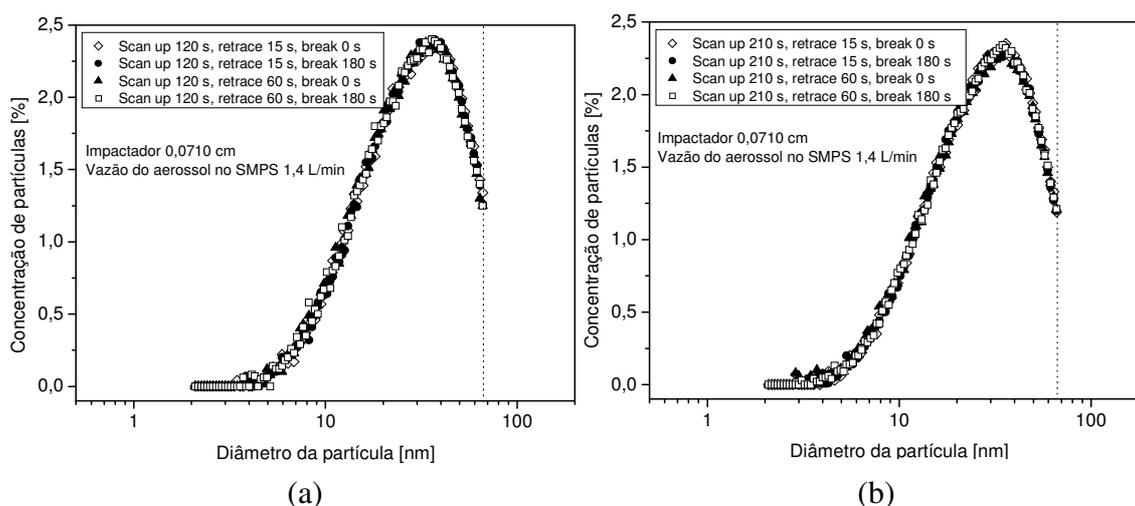


Figura 4.15 - Distribuições de tamanho para testes com diferentes configurações do SMPS: impactador de 0,0710 cm e vazão do aerossol no SMPS de 1,4 L/min, sendo (a) *Scan up* de 120s e (b) *Scan up* de 210s.

Ao contrário de como foi analisado nos testes anteriores, observa-se que as Figuras 4.15 e 4.16 não apresentaram o efeito de superestimação das medidas de concentração de partículas com diâmetros abaixo de 10 nm. Não se levando em conta a faixa de diâmetros analisada nestes últimos testes (2,05 a 67,3 nm), nota-se que a diferença entre estas figuras (4.15 e 4.16) e as demais (4.11, 4.12, 4.13 e 4.14) ocorre exclusivamente pelo desaparecimento deste comportamento atípico na faixa referida. Adicionalmente, as curvas de distribuição exibiram o mesmo comportamento, sendo que a porcentagem de concentração de partículas para cada diâmetro obteve, aproximadamente, o mesmo valor para todos os experimentos.

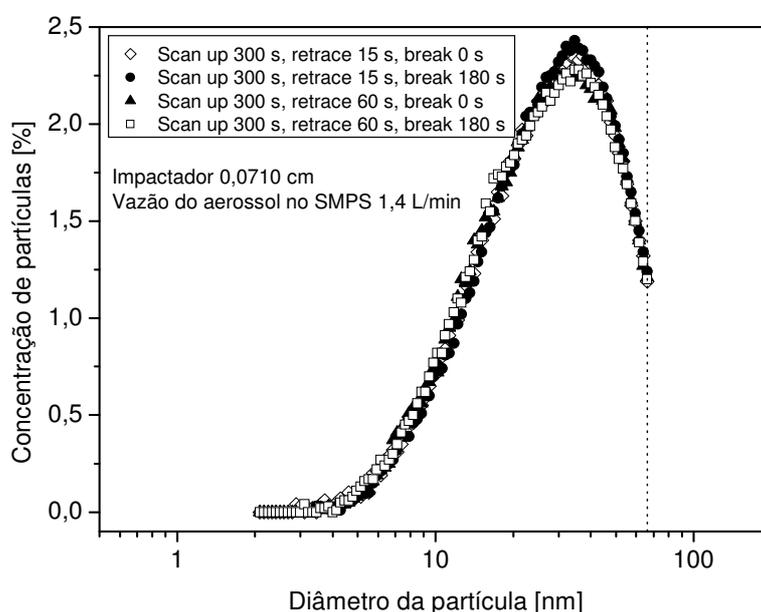


Figura 4.16 - Distribuições de tamanho para testes com diferentes configurações do SMPS: impactador de 0,0710 cm, vazão do aerossol no SMPS de 1,4 L/min e *Scan up* de 300s.

Mesmo alterando-se o valor do *break*, não se observou mudanças nas análises do aerossol. À medida que são comparadas as Figuras 4.11 e 4.15-a, 4.12-a e 4.15-b ou 4.12-b e 4.16, verifica-se que o valor da vazão do aerossol amostrado é o único parâmetro que distingue os respectivos testes e que, por sua vez, teve seu valor acrescido nestes últimos.

Pode-se concluir, à primeira vista, que a vazão de aerossol amostrado de 1,4 L/min tem uma forte influência no desaparecimento do efeito das medidas de concentração para diâmetros abaixo de 10 nm. Certamente, tal consequência está relacionada à presença de partículas residuais dentro do equipamento que, nestes

últimos testes, não foi constatada. Para melhor entender esta ocorrência, necessita-se explicar que há diferenças no modo de operação dos equipamentos que compõem o espectrômetro SMPS: o classificador eletrostático e o contador de partículas (UCPC), como por exemplo, velocidades de escaneamento de cada equipamento. Embora o aerossol seja absorvido com a mesma vazão em ambos os equipamentos, a velocidade de recirculação das partículas entre os mesmos é diferente, ou seja, estes equipamentos operam em diferentes velocidades rotacionais. Desta forma e como comentado anteriormente, se faz necessário estabelecer um tempo de espera entre uma análise e outra a fim de que as partículas residuais sejam removidas de tais equipamentos.

Por outro lado, quando a vazão do aerossol amostrado no equipamento é baixa, uma maior perda por difusão das partículas é incidida e isto se deve ao fato de que quanto menor a vazão, maior é o tempo de residência deste aerossol no equipamento, implicando em maiores perdas de partículas. Isto esclarece a presença de partículas residuais e a importância de aumentar o tempo entre as análises (*break*), quando o equipamento é configurado para operar em baixas vazões.

Contudo, quando se aumenta a vazão do aerossol no SMPS, ocorre uma redução das perdas das partículas por difusão dentro do equipamento, evitando, deste modo, a presença de partículas residuais nas próximas varreduras. Portanto, é importante ressaltar que quando o SMPS é configurado a operar com uma vazão de aerossol amostrado de 0,3 L/min, independente do tamanho do impactador, é necessário estabelecer valores adequados dos tempos *retrace* e, principalmente, *break*, a fim de minimizar possíveis erros de medidas de concentração ocasionados por partículas residuais presentes no UCPC. Em compensação, quando a vazão do aerossol amostrado requerida pelo SMPS estiver ajustada em 1,4 L/min, não se torna necessário o intervalo de tempo entre um escaneamento e outro, visto que, para este valor de vazão, são diminuídas as perdas das partículas por difusão e, conseqüentemente, a presença de partículas residuais no equipamento.

4.2 – Testes relacionados ao desempenho dos meios filtrantes

A avaliação do desempenho dos meios filtrantes dependeu fundamentalmente dos testes preliminares previamente apresentados e discutidos. A realização e a análise

dos testes preliminares foram imprescindíveis para a definição de parâmetros e condições operacionais determinantes para um bom funcionamento da unidade experimental. A partir dos resultados preliminares pôde-se dar início aos ensaios que consistiram em avaliar o comportamento dos meios filtrantes na remoção de partículas nanométricas.

Em se tratando dos testes que envolveram a análise das condições de amostragem de partículas nanométricas de aerossóis, notou-se, como observado nas seções anteriores, que não houve coleta preferencial, seja de partículas maiores ou menores, para as diferentes condições de amostragem testadas. Para todos os casos, as curvas de distribuição apresentaram o mesmo comportamento, concluindo, à vista disso, que a amostragem de aerossóis nanométricos independe do tipo de condição que é realizada, seja isocineticamente ou não. Portanto, a partir desta conclusão e para os testes subseqüentes, as amostragens do aerossol foram realizadas sob condições não isocinéticas, com o intuito de simplificar a execução dos testes.

Em relação aos testes em que foram avaliadas diversas configurações do espectrômetro SMPS com o propósito de identificar as condições operacionais adequadas para analisar aerossóis nanométricos, concluiu-se que à medida que se estabeleciam baixas vazões do aerossol amostrado no equipamento, efeitos atípicos surgiam nas medidas de concentração de partículas na faixa de tamanho inferior a 10 nm. Desta forma, selecionavam-se apropriadamente maiores valores dos tempos *retrace* e *break*, de tal forma que as partículas residuais presentes no equipamento fossem removidas para dar início a uma nova análise. A causa deste efeito é bem mais discutida na seção anterior (4.1.3). Em contrapartida, quando o SMPS era ajustado a operar com uma vazão de aerossol amostrado equivalente a 1,4 L/min, notou-se que o efeito mencionado não apareceu, visto que as perdas das partículas por difusão são diminuídas para esta vazão e, conseqüentemente, a presença de partículas residuais no equipamento também. Adicionalmente, para um mesmo valor de vazão de aerossol amostrado (no caso, 0,3 L/min), não foi observada diferença significativa na análise do aerossol quando se alterou o uso dos modelos de impactadores, já que as curvas de distribuição de partículas exibiram o mesmo comportamento. Em vista disso e para os próximos testes, optou-se empregar o SMPS utilizando-se o impactador 0,0710 cm e selecionando a vazão do aerossol amostrado em 1,4 L/min. Os tempos *scan up*, *retrace* e *break* foram estabelecidos em 300, 15 e 0s. Entretanto, o espectrômetro foi

configurado com a torre Long-DMA, o que permitiu analisar diâmetros de partículas entre 6,15 e 241,4 nm.

Como previamente discutido, o gerador de partículas utilizado para a realização destes testes foi o atomizador da TSI, modelo 3079. Além disto, a fonte de Amerício 241 foi empregada à frente do equipamento SMPS. O uso da fonte de Amerício foi determinado através de ensaios cujos resultados estão apresentados no Apêndice A.

Deste modo, os testes de desempenho dos meios filtrantes na remoção de partículas nanométricas e polidispersas de NaCl foram conduzidos ao analisar o aerossol amostrado antes e após sua passagem pelo dispositivo de filtração. Para cada velocidade avaliada, realizaram-se três réplicas experimentais deste procedimento

Por sua vez, a análise do aerossol, realizada pelo espectrômetro, resultava nas medidas de concentração de partículas para cada tamanho. Assim, à medida que se adquiriam estes resultados, calculava-se, a partir das três réplicas, a média aritmética dos valores de concentração de partículas para cada diâmetro e, então, os valores obtidos pela média eram aplicados na Equação 3.3 a fim de determinar a eficiência fracionária do meio filtrante.

Os resultados destes ensaios para cada meio filtrante são apresentados e discutidos nas próximas seções.

4.2.1 – Eficiência experimental do filtro de poliéster

As velocidades de filtração avaliadas nos ensaios utilizando-se o filtro de poliéster foram de 1 a 10 cm/s, variando-se de 1 em 1 cm/s o valor. A Figura 4.17 apresenta as curvas de concentrações de partículas por diâmetro antes e após a passagem do aerossol pelo meio filtrante das três réplicas experimentais para a velocidade de 3 cm/s. Pode-se observar que as curvas correspondentes às réplicas apresentaram o mesmo comportamento em relação às medidas de concentração de partículas, ou seja, as réplicas apresentaram reprodutibilidade nas medidas de concentração de partículas. Este comportamento foi observado em todas as réplicas e, por este motivo e como comentado anteriormente, serão apenas apresentadas as curvas

de concentração de partículas equivalentes às médias aritméticas das réplicas experimentais.

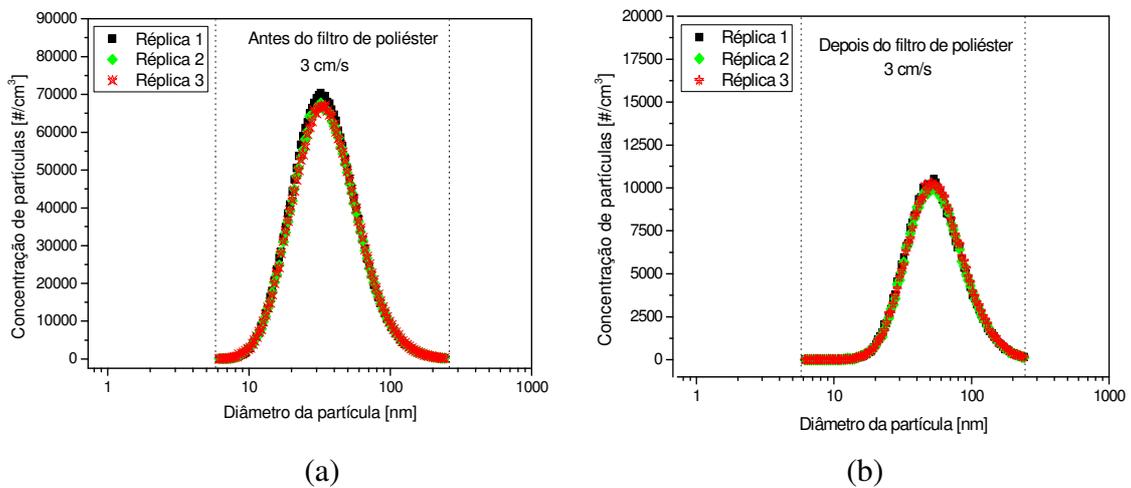


Figura 4.17 – Curvas de distribuição de partículas das três réplicas para a velocidade de 3 cm/s: (a) antes do filtro e (b) depois do filtro.

As figuras que ilustram, para todas as velocidades, as curvas de concentrações de partículas por diâmetro antes e após a passagem do aerossol pelo meio filtrante encontram-se no Apêndice C. No entanto, como ilustração, as Figuras 4.18 e 4.19 apresentam as curvas de distribuição de partículas, nos testes em que as velocidades de filtração estudadas equivaliam a 3 e 6 cm/s, respectivamente.

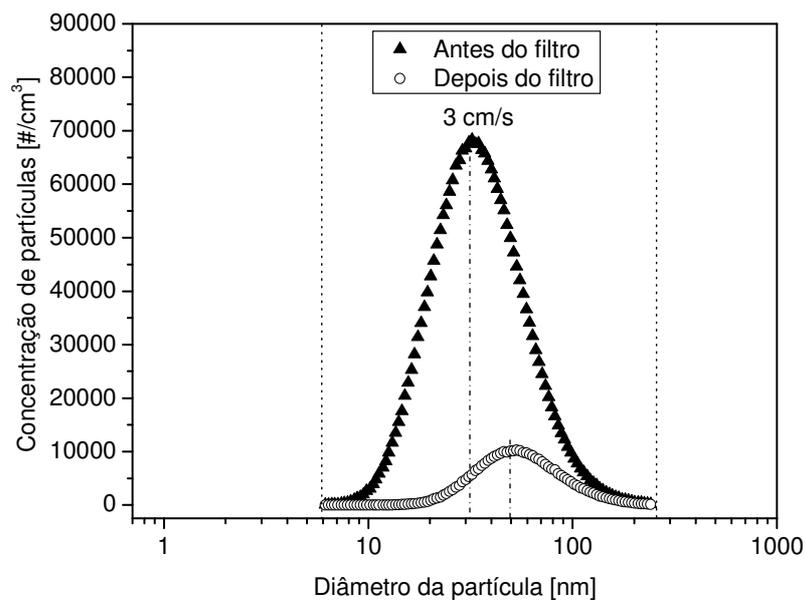


Figura 4.18 – Curvas de distribuição de partículas para a velocidade de 3 cm/s.

Pela análise das Figuras 4.18 e 4.19, assim como as demais figuras apresentadas na seção C.1 do Apêndice C, nota-se que, para todas as velocidades estudadas, a máxima geração de partículas está compreendida na faixa de 30 nm, aproximadamente. Ainda, observa-se que a penetração de partículas pelo meio filtrante ocorre em todas as velocidades de filtração, mas se dá preferencialmente para partículas de maiores diâmetros, visto que o deslocamento do pico de concentração máxima (moda) para a direita evidencia tal constatação.

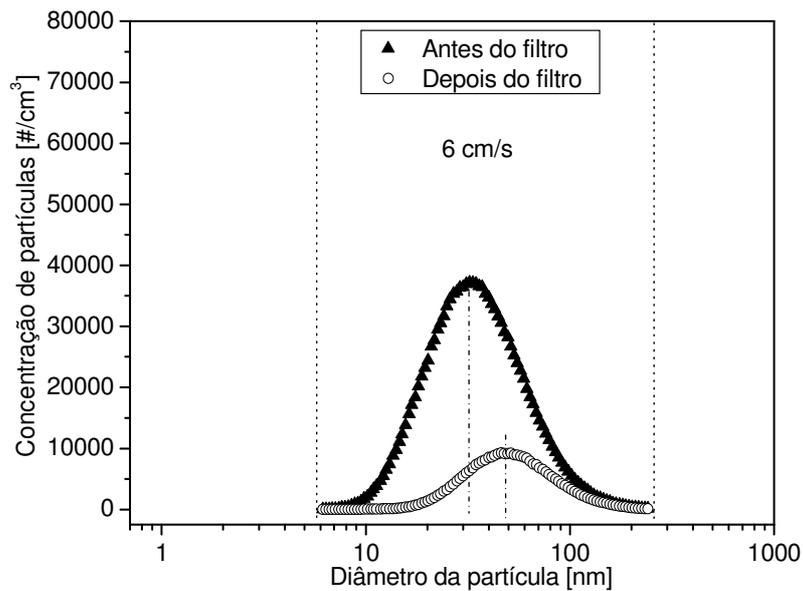


Figura 4.19 – Curvas de distribuição de partículas para a velocidade de 6 cm/s.

Adicionalmente, ao confrontar tais figuras, observa-se que, à medida que se aumentou a velocidade de 3 cm/s para 6 cm/s, as concentrações de partículas diminuíram nas amostragens do aerossol conduzidas antes do filtro. Certamente isto acontece devido ao aumento da vazão do aerossol no sistema que se faz pelo acréscimo da corrente de ar puro proveniente dos filtros de purificação de ar, haja vista que a vazão do gerador é mantida constante para todos os testes. Desta forma, o aumento da vazão do aerossol no sistema ocasiona, então, uma maior diluição das partículas. Logo, ao passo que se aumenta a velocidade de filtração, repara-se que há uma diminuição da concentração de partículas amostradas, uma vez que o aerossol dentro do sistema sofre diluição.

A Figura 4.20 ilustra as eficiências fracionárias do filtro de poliéster, até o diâmetro de partícula de 20,2 nm, para todas as velocidades de filtração estudadas. Tal figura mostra que a eficiência máxima foi de 100 % e ocorre em todas as velocidades de

filtração, porém em faixas de diâmetros diferentes. Grandes flutuações decorrentes da instabilidade do gerador de partículas são observadas com mais clareza para partículas muito pequenas (< 10 nm), cujo número de observações também é reduzido. O problema pode ser notado através do destaque na Figura 4.20.

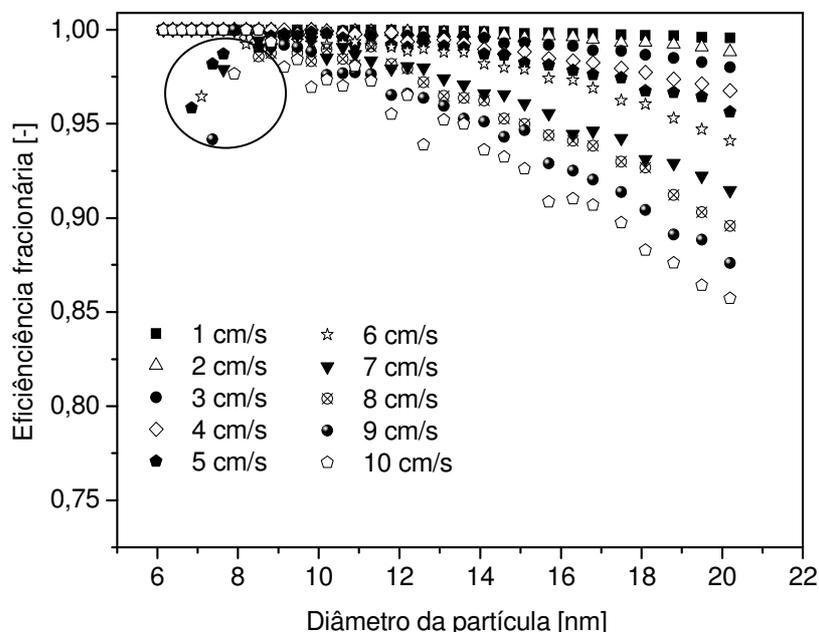


Figura 4.20 – Eficiência fracionária do filtro de poliéster até o diâmetro de 20,2 nm.

Verifica-se que, para as velocidades de 1 a 4 cm/s, a eficiência de coleta foi máxima para diâmetros de partículas compreendidos entre 6,15 e 10 nm, aproximadamente. Porém, as eficiências diminuem ao passo que o diâmetro da partícula e a velocidade de filtração têm seus valores acrescidos.

Este comportamento se repetiu em todos os testes realizados, como observado na Figura 4.21. Tal figura expõe as eficiências fracionárias para todos os diâmetros analisados e todas as velocidades estudadas.

Ao analisar a Figura 4.21, verifica-se que a eficiência de coleta do filtro de poliéster decresce com o aumento do diâmetro da partícula e tal efeito é ainda mais intensificado, à medida que se aumenta a velocidade de filtração. Esta característica permite deduzir que o mecanismo difusional, neste estudo, predomina sobre os demais mecanismos de coleta na remoção de partículas nanométricas. Em se tratando de partículas pequenas, a probabilidade das mesmas se deslocarem por constantes colisões entre as moléculas do ar e se difundirem tão rapidamente é maior quanto menor for a sua massa. Por tal motivo, as nanopartículas desviam-se das linhas de corrente podendo,

então, se chocar com as fibras do meio filtrante. A redução da velocidade de filtração acarreta em um maior tempo de permanência das partículas no meio filtrante, aumentando, ainda mais, a probabilidade de coleta das partículas pelas fibras.

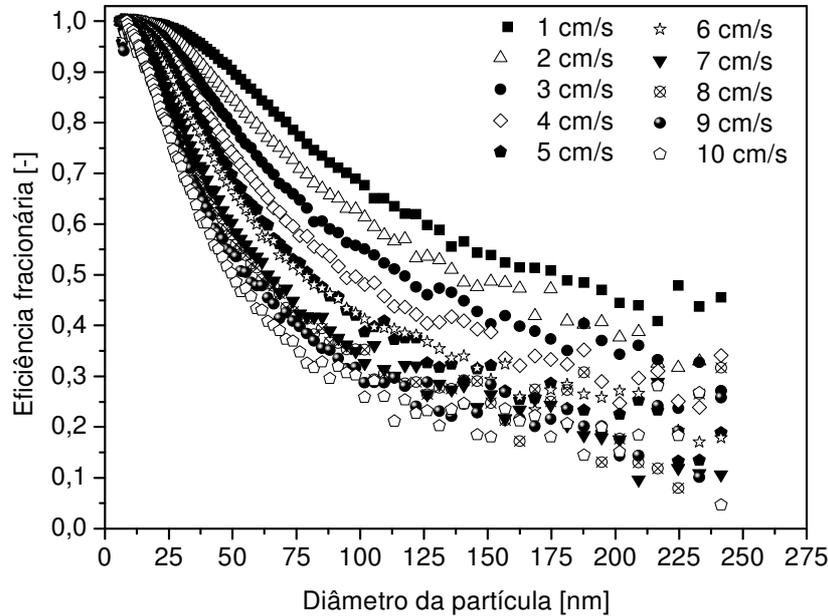


Figura 4.21 – Eficiência fracionária do filtro de poliéster.

Para o filtro de poliéster, a eficiência mínima atingida foi de aproximadamente 5% para o diâmetro de partícula de 241,4 nm e velocidade de 10 cm/s.

A partir da Figura 4.20 nota-se uma ligeira perturbação na curva de eficiência fracionária à medida que se aumenta o diâmetro da partícula. Isto é explicado pelo fato de que tal curva é obtida a partir das medidas de concentração de partículas antes e após o meio filtrante, como observado na Equação 3.3.

Assim, para os diâmetros menores, são obtidos altos valores de eficiência do filtro uma vez que a remoção de partículas nesta faixa é alta, sendo que a remoção para partículas menores de 25 nm foi de 100%. Isto quer dizer que ao analisar as curvas de concentração de partículas antes e depois do meio filtrante (Figura 4.19 e figuras da seção C.1 do Apêndice C), observa-se que a curva correspondente à análise do aerossol após o filtro segue tangente ao valor de concentração de partículas “zero” até o diâmetro de 20 nm, aproximadamente. Por tal motivo, ao substituir, na Equação 3.3, os valores das medidas de concentração de partículas antes e depois do filtro, obtêm-se altos valores de eficiência do filtro para os menores diâmetros.

Por outro lado, os valores de eficiência do filtro decaem para partículas maiores. Além disto, nestas mesmas curvas de eficiência são observadas ligeiras

perturbações em faixas de tamanho em que a eficiência é menor. Como já sabido, a penetração é mais incidente para partículas maiores, repercutindo-se em medidas de concentração depois do meio filtrante, para esta faixa de tamanho. Isto pode ser observado na Figura 4.19, assim como nas demais figuras presentes na seção C.1 do Apêndice C. Ainda, estas figuras mostram que as medidas de concentração de partículas antes e depois do meio filtrante se aproximam para tamanhos maiores que 125 nm, aproximadamente, já que suas respectivas curvas chegam a se sobrepor.

Desta forma, tendo conhecimento da faixa de tamanho em que a penetração de partículas pelo filtro de poliéster é mais ocorrente e que, como comentado anteriormente, a eficiência fracionária é obtida pela Equação 3.3, estima-se que, por isso, qualquer oscilação eventual nas medidas de concentração de partículas nesta faixa de tamanho, tanto antes como depois do meio filtrante, pode refletir em uma não-uniformidade nos valores de eficiência fracionária, uma vez que os valores de concentração de partículas antes e depois do filtro, nesta faixa de tamanho, são próximos. Logo, esta divergência nas medidas de concentração de partículas é capaz de ocasionar uma desordem na curva de eficiência fracionária, como observado na Figura 4.21. Além disto, estas curvas de concentração de partículas e, conseqüentemente, de eficiência fracionária foram obtidas a partir de uma média de réplicas triplas, podendo, então, contribuir com esta oscilação nas curvas.

Nota-se, também, que esta oscilação nos valores de eficiência para diâmetros acima de 100 nm, aproximadamente, é maior à medida que se aumenta a velocidade de filtração. Além da explicação mencionada anteriormente, isto acontece uma vez que com o aumento da velocidade, é causada uma maior perturbação no sistema de amostragem de partículas, acarretando uma dificuldade na coleta de partículas.

4.2.2 – Eficiência experimental para o filtro HEPA

As velocidades de filtração avaliadas nos ensaios que envolveram o comportamento do filtro HEPA foram de 1 a 9 cm/s, variando-se de 1 em 1 cm/s o seu valor. Como comentado anteriormente, não foi possível examinar maiores velocidades devido à limitação do sistema.

A curva de distribuição de partículas antes do meio filtrante e nos testes em que a velocidade de filtração foi estabelecida em 5 cm/s, como verificado na Figura 4.22-a, exibiu o mesmo comportamento que as curvas de distribuição apresentadas na seção referente ao filtro de poliéster, indicando também que a máxima geração de partículas compreende a faixa de diâmetros entre 30 e 35 nm, aproximadamente. Esta mesma característica é observada em todos os testes do filtro HEPA, sendo que as curvas de concentração de partículas, antes e após a passagem do aerossol por tal filtro, encontram-se na seção C.2 do Apêndice C.

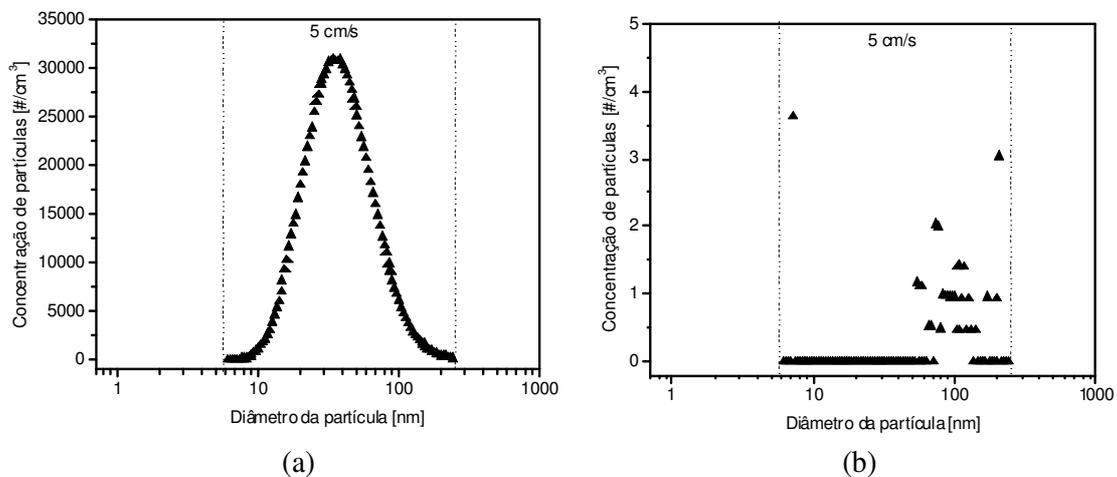


Figura 4.22 – Curvas de distribuição de partículas para a velocidade de filtração de 5 cm/s: (a) antes do filtro HEPA e (b) depois do filtro HEPA.

Analisando-se a Figura 4.22-b, certifica-se que houve penetração de partículas no filtro HEPA, embora as medidas de concentração de partículas penetradas sejam muito baixas. Neste mesmo sentido, observa-se que as partículas não removidas pelo meio filtrante compreendem diâmetros entre 50 e 160 nm, aproximadamente. A penetração de partículas ocorreu em todas as velocidades estudadas (Apêndice C), entretanto o filtro HEPA apresentou eficiências muito altas, como pode ser observado nas Figuras 4.23 e 4.24, com pequenas flutuações decorrentes da instabilidade do sistema.

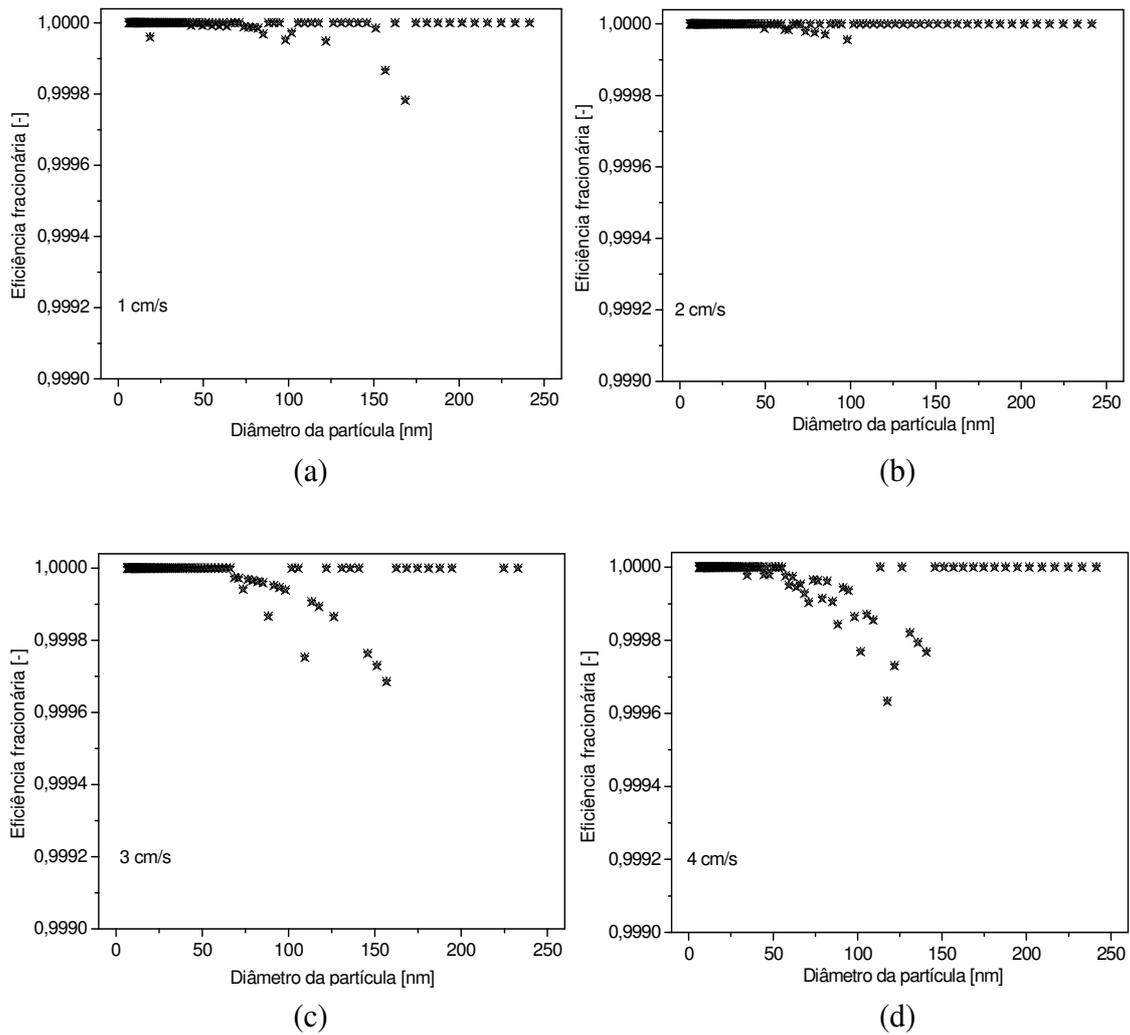


Figura 4.23 – Eficiência fracionária do filtro HEPA, para as velocidades de filtração: (a) 1 cm/s; (b) 2 cm/s; (c) 3 cm/s e (d) 4 cm/s.

Nota-se que, nas Figuras 4.23 a 4.25, as eficiências do filtro HEPA foram altas, sendo que, para a maioria dos diâmetros analisados, a remoção destas partículas foi de 100%. Estas altas eficiências são peculiares para este tipo de filtro devido ao fato de que o mesmo possui fibras heterogêneas, com predominância de fibras de pequenos diâmetros. Por outro lado, observa-se que ao aumentar a velocidade de filtração, a penetração de partículas se estende para demais faixas de tamanho.

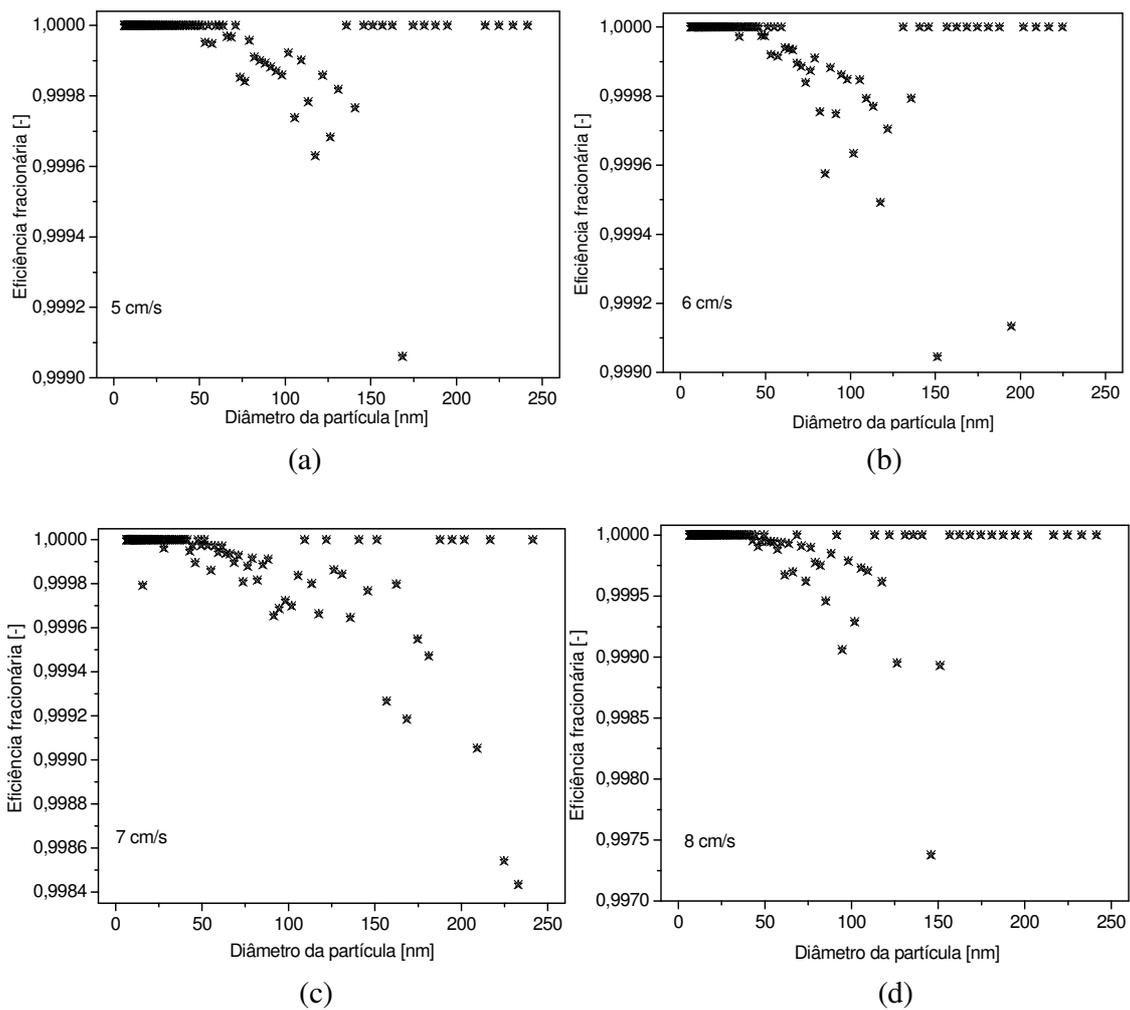


Figura 4.24 – Eficiência fracionária do filtro HEPA, para as velocidades de filtração: (a) 5 cm/s; (b) 6 cm/s; (c) 7 cm/s e (d) 8 cm/s.

Embora as eficiências fracionárias tenham alcançado valores acima de 0,99, verifica-se que a faixa de tamanho de partículas que não foram totalmente removidas pelo filtro HEPA compreende valores entre 45 e 160 nm. A penetração de partículas nesta faixa é mais freqüente, à medida que a velocidade de filtração é acrescida. Ainda, observa-se que, de um modo geral, as eficiências de remoção de partículas cujos diâmetros estão abaixo de 45 nm e acima de 170 nm, aproximadamente, apresentam valores equivalentes a 1, para todas as velocidades.

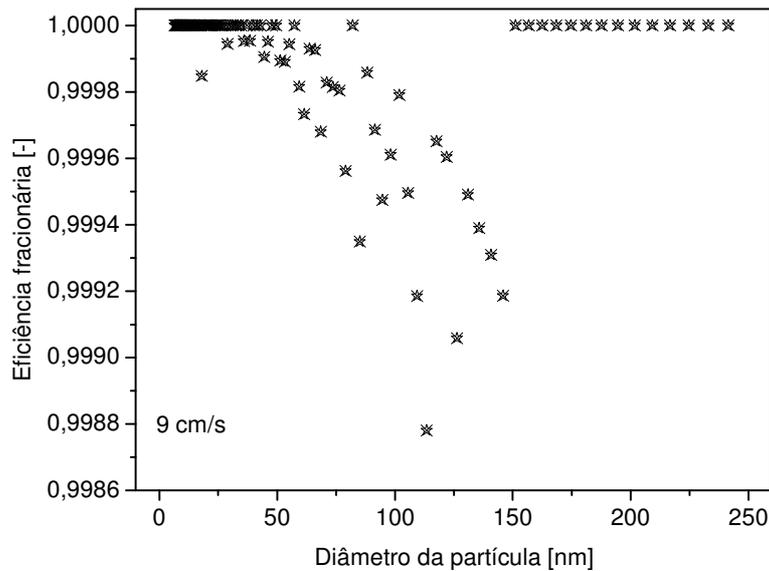


Figura 4.25 – Eficiência fracionária do filtro HEPA, para as velocidades de filtração de 9 cm/s.

Se observar à faixa total de diâmetros analisada, nota-se que a penetração de partículas pelo filtro HEPA acontece apenas em uma faixa de tamanho intermediária, como mencionado anteriormente. Assim, com a finalidade de validar tal comportamento, investigaram-se os procedimentos adotados que, por sua vez, buscaram eliminar problemas que pudessem estar correlacionados aos resultados referentes ao desempenho deste meio filtrante. Esta apreciação incluiu testes nos quais constataram se as medidas de concentração de partículas após a passagem do aerossol pelo filtro estavam conjugadas à desprendimentos das mesmas na tubulação ou ao seu próprio tempo de permanência no espectrômetro, de tal forma que pudessem vir a ser contadas em análises subsequentes. Estes testes, apresentados e discutidos no Apêndice B, comprovaram que estas medidas certamente se devem à penetração de partículas pelo filtro HEPA e que, tal ocorrência, realmente acontece nesta faixa de diâmetro (entre 45 e 160 nm, aproximadamente).

4.2.3 – Eficiência experimental para o filtro de microfibras de quartzo

Com a finalidade de verificar o desempenho do filtro de microfibras de quartzo, foram avaliadas velocidades de filtração de 1 a 9 cm/s, variando-se de 1 em 1 cm/s seu valor. Como pode ser observado nas figuras que representam as curvas de

concentração de partículas antes e após a passagem do aerossol pelo filtro de microfibras de quartzo (seção C.3 do Apêndice C), certifica-se que este meio filtrante apresenta um bom desempenho na remoção de partículas nanométricas, visto que a concentração de partículas penetradas é muito baixa, obtendo valores máximos na ordem de 10 partículas/cm³.

A Figura 4.26 ilustra, para a velocidade de filtração de 9 cm/s, a concentração de partículas amostradas antes e após à passagem do aerossol pelo dispositivo de filtração.

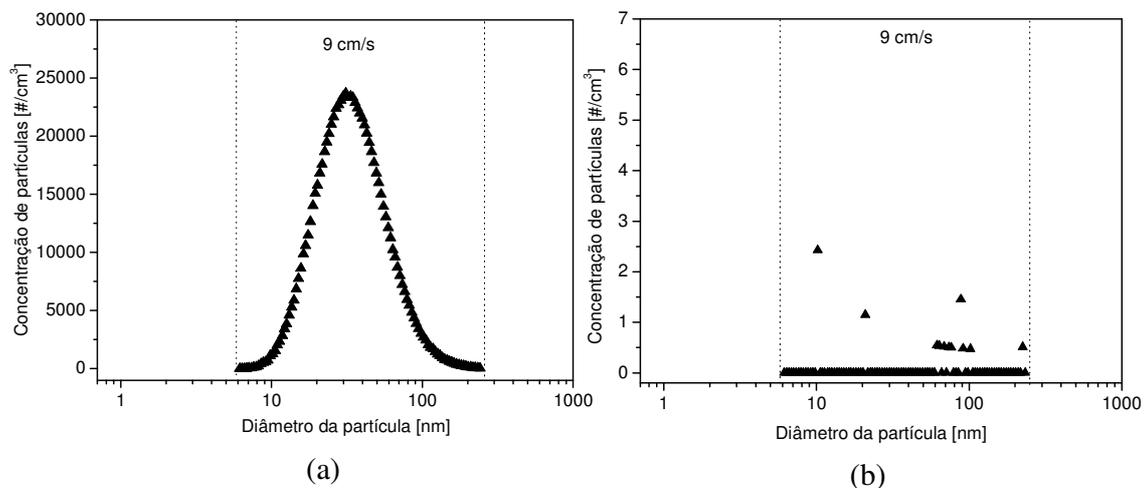


Figura 4.26 – Concentração de partículas para a velocidade de filtração de 9 cm/s: (a) antes do filtro de microfibras de quartzo e (b) depois do filtro de microfibras de quartzo.

A concentração de partículas que penetram através do filtro é muito baixa, como observado na Figura 4.26, ainda que a velocidade de filtração estabelecida neste teste seja equivalente a 9 cm/s. Neste mesmo sentido, uma melhor análise em relação ao desempenho do filtro de microfibras de quartzo é realizada através dos resultados de eficiência fracionária apresentados nas Figuras 4.27 a 4.30.

Observa-se na Figura 4.27 que, para a velocidade de 1 cm/s, os valores de eficiência fracionária do filtro para alguns diâmetros são menores que os valores de eficiência quando se aplica a velocidade de 2 cm/s. Porém, ao analisar as eficiências fracionárias para as demais velocidades estudadas, verifica-se que à medida que a velocidade aumenta, a penetração de partículas também é mais freqüente, embora a concentração de partículas penetradas seja muito baixa.

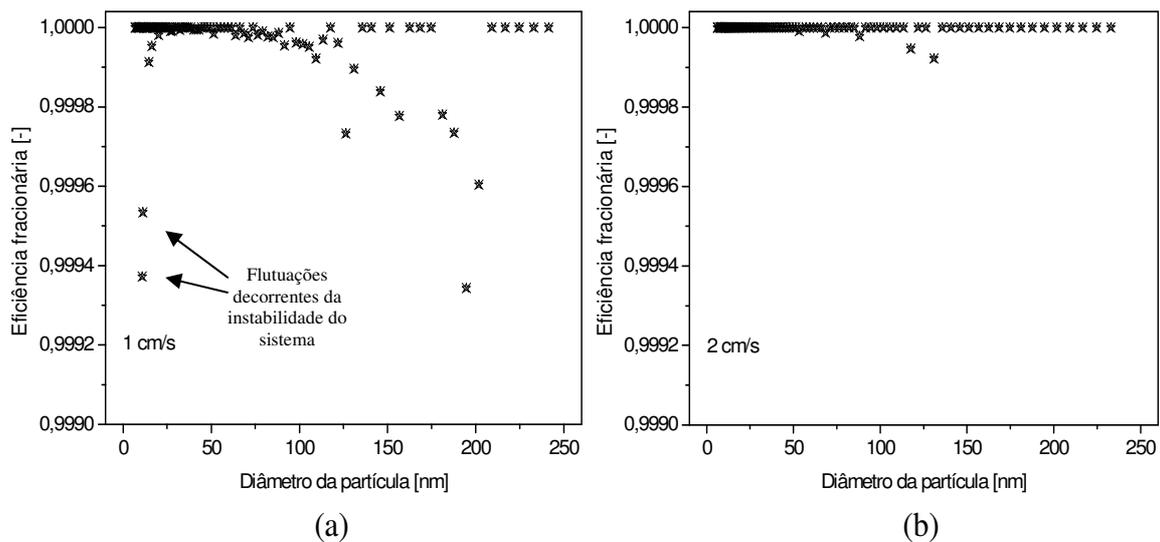


Figura 4.27 – Eficiência fracionária do filtro de microfibras de quartzo, para as velocidades de filtração: (a) 1 cm/s e (b) 2 cm/s.

Com relação à penetração de partículas em testes nos quais a velocidade de filtração do aerossol é estabelecida no sistema em 1 cm/s, foi investigado tal comportamento e constatou que este resultado está atribuído ao uso do sistema da fonte de amerício (caixa de chumbo e fonte de amerício, ver Figura 3.1 referente à unidade experimental). Isto é explicado pelo fato de que para se ajustar a velocidade em 1 cm/s, é necessário estabelecer a vazão do aerossol no sistema em 2,56 L/min; para tanto, a vazão do aerossol requerida pelo SMPS é acertada em 1,4 L/min. Deste modo, o espectrômetro irá sugar uma corrente de gás em 1,4 L/min, ainda que a vazão do sistema seja baixa (2,56 L/min), sendo possível, nesse caso, que a amostra conduzida ao SMPS não seja apenas do aerossol produzido, caso exista algum ponto de vazamento não identificado no sistema. Assim, para tal velocidade, foi verificado que quando se utilizava a caixa de chumbo contendo a fonte de amerício, partículas presentes neste dispositivo eram amostradas e analisadas, de forma a deduzir erroneamente a relação deste resultado com a penetração de partículas. Por outro lado, quando não se deu o uso do dispositivo contendo a fonte de amerício, para a mesma velocidade, não foram constatadas partículas presentes no aerossol amostrado após sua passagem pelo meio filtrante. Entretanto, a concentração de partículas medidas nestes ensaios discutidos (velocidade de filtração de 1 cm/s e utilizando o sistema da fonte de amerício) é muito baixa, sendo até mesmo considerada desprezível.

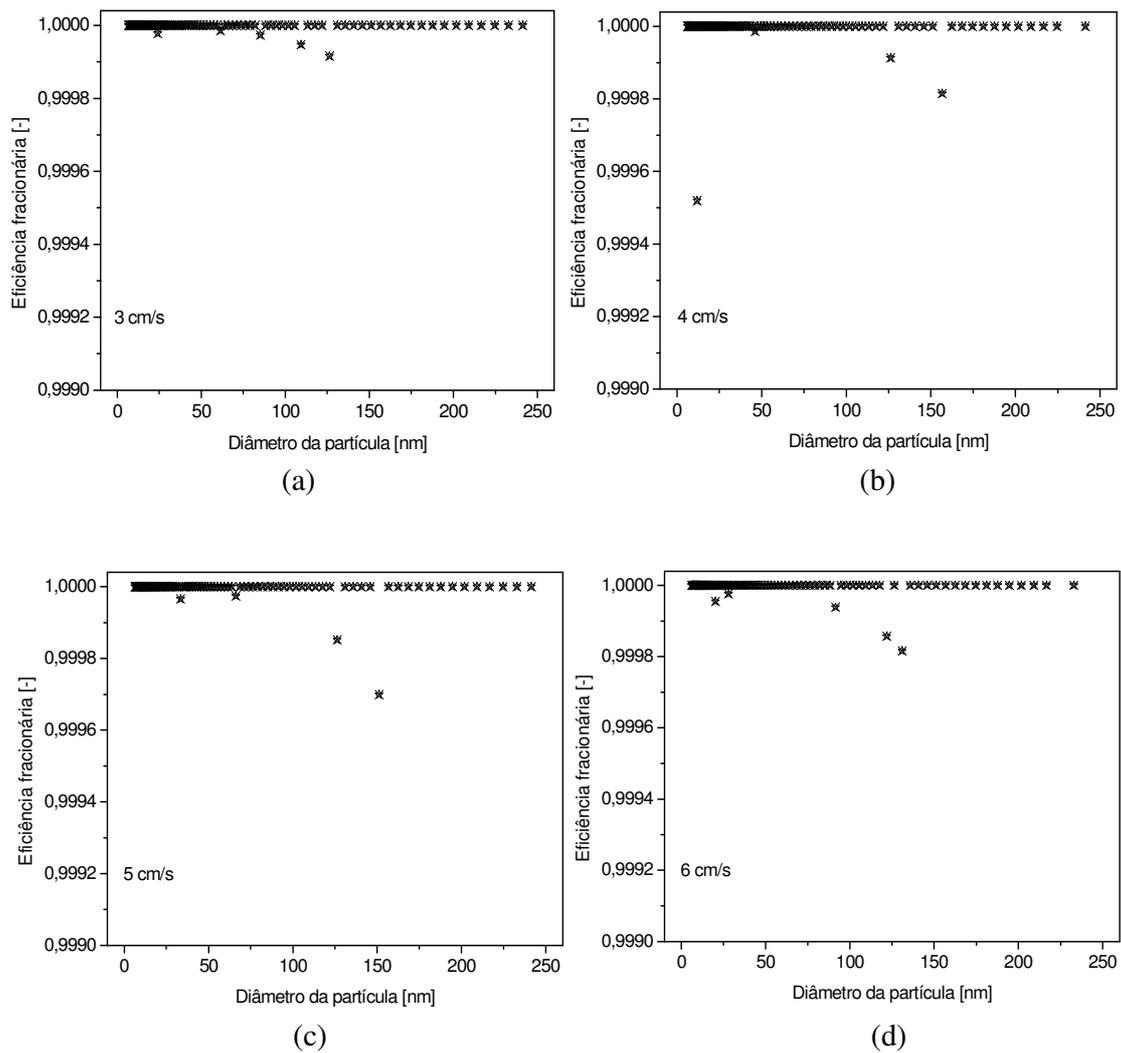


Figura 4.28 – Eficiência fracionária do filtro de microfibras de quartzo, para as velocidades: (a) 3 cm/s; (b) 4 cm/s; (c) 5 cm/s e (d) 6 cm/s.

De acordo com as Figuras 4.27 a 4.30, certifica-se que a eficiência do filtro de microfibras de quartzo é alta para todas as velocidades de filtração avaliadas. Ainda, verificou-se que tal filtro obteve o mesmo comportamento em relação à faixa de partículas penetradas que o filtro HEPA, visto que, conforme a velocidade era aumentada, a penetração de partículas com diâmetros compreendidos entre 45 e 160 nm, aproximadamente, era incidida. No entanto, o filtro de microfibras de quartzo alcançou um melhor desempenho na remoção de partículas nanométricas se comparado à performance do filtro HEPA, obtendo valores de eficiência acima de 0,999.

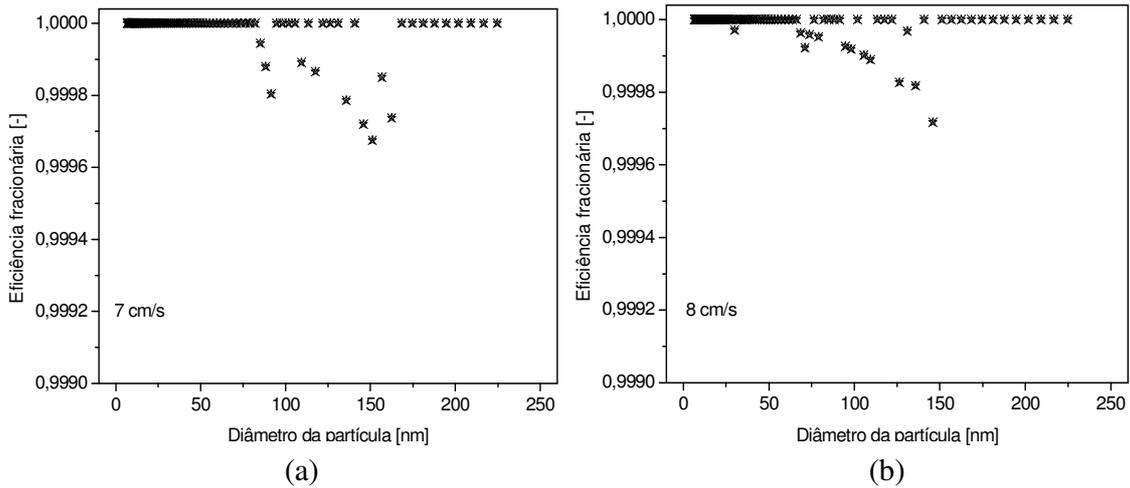


Figura 4.29 – Eficiência fracionária do filtro de microfibras de quartzo, para as velocidades: (a) 7 cm/s e (b) 8 cm/s.

O bom desempenho deste filtro é atribuído ao pequeno tamanho das fibras.

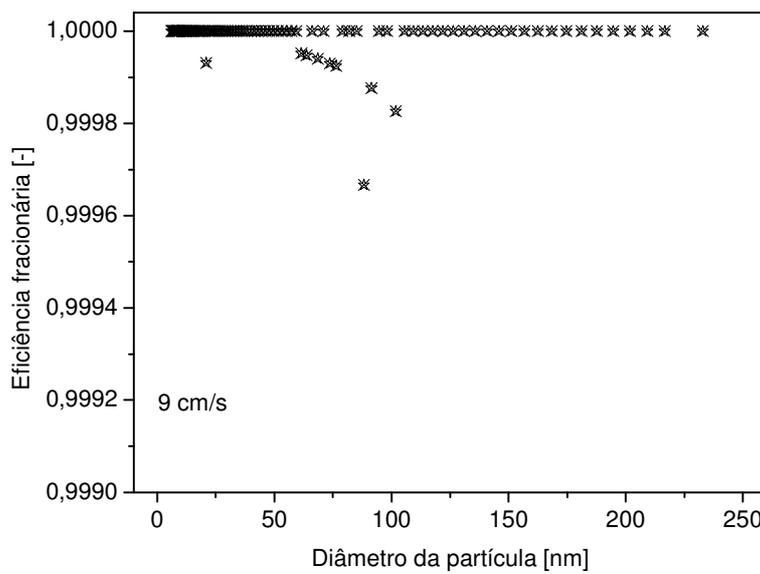


Figura 4.30 – Eficiência do filtro de microfibras de quartzo para a velocidade de 9 cm/s.

4.2.3 – Eficiência experimental para as membranas

O desempenho das membranas na remoção de partículas nanométricas foi avaliado utilizando-se as velocidades de filtração de 1 a 8 cm/s, variando-se de 1 em 1 cm/s o seu valor. As concentrações de partículas medidas antes e depois da passagem do aerossol após tal meio filtrante estão representadas pelas figuras apresentadas na seção

C.4 do Apêndice C. Como observado na Figura 4.31, a geração máxima de partículas compreende diâmetros na ordem de 30 nm (moda), aproximadamente.

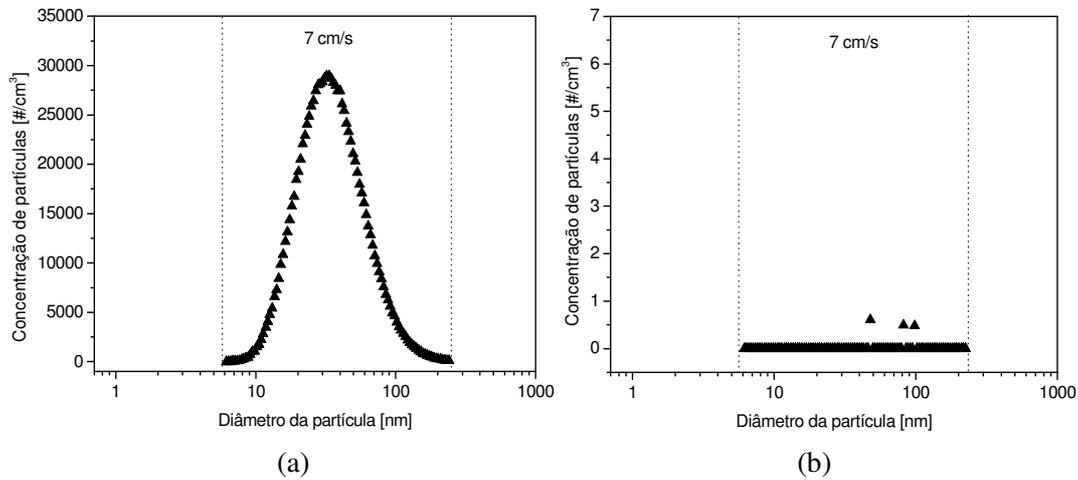


Figura 4.31 – Concentração de partículas no aerossol para a velocidade de filtração de 7 cm/s: (a) antes das membranas e (b) depois das membranas.

Ainda, a partir da Figura 4.31, pode-se verificar que a penetração de partículas é praticamente desprezível, uma vez que, além de quase não ocorrer, a ordem de concentração das mesmas equivale a 1 partícula/cm³ [# /cm³] Isto também pode ser observado nas figuras contidas no Apêndice C. Por outro lado, uma melhor avaliação, no que diz respeito ao desempenho das membranas, pode ser realizada através das Figuras 4.32 a 4.36 que representam as eficiências fracionárias para cada velocidade estudada.

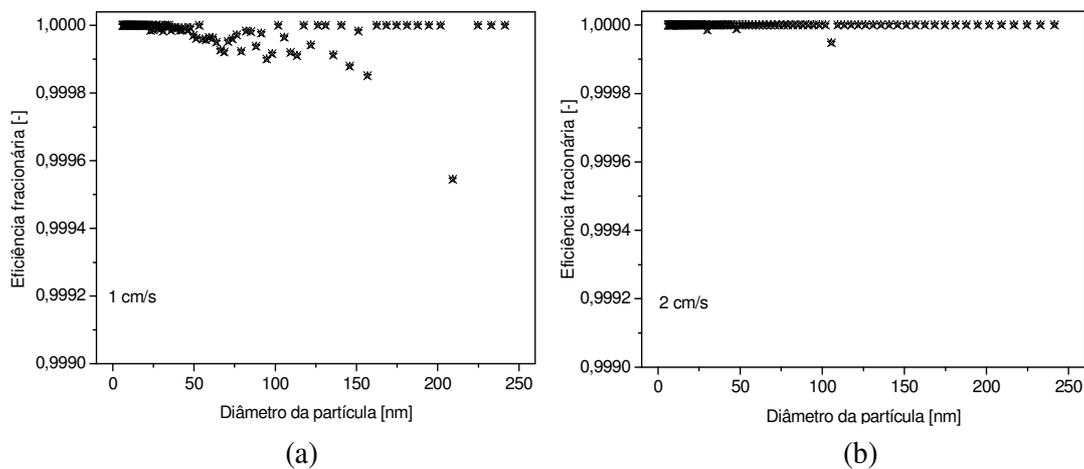


Figura 4.32 – Eficiência fracionária das membranas, para as velocidades: (a) 1 cm/s e (b) 2 cm/s.

Pela análise da Figura 4.32-a, constata-se o mesmo efeito relacionado à presença de partículas após a passagem do meio filtrante devido ao ajuste da velocidade em 1 cm/s e ao uso do dispositivo de acondicionamento da fonte de amerício. Como já explanado, tal concentração de partículas presentes no aerossol amostrado após o dispositivo de filtração, não pertinente à penetração, é praticamente desprezível, visto que a eficiência do filtro se mantém elevada.

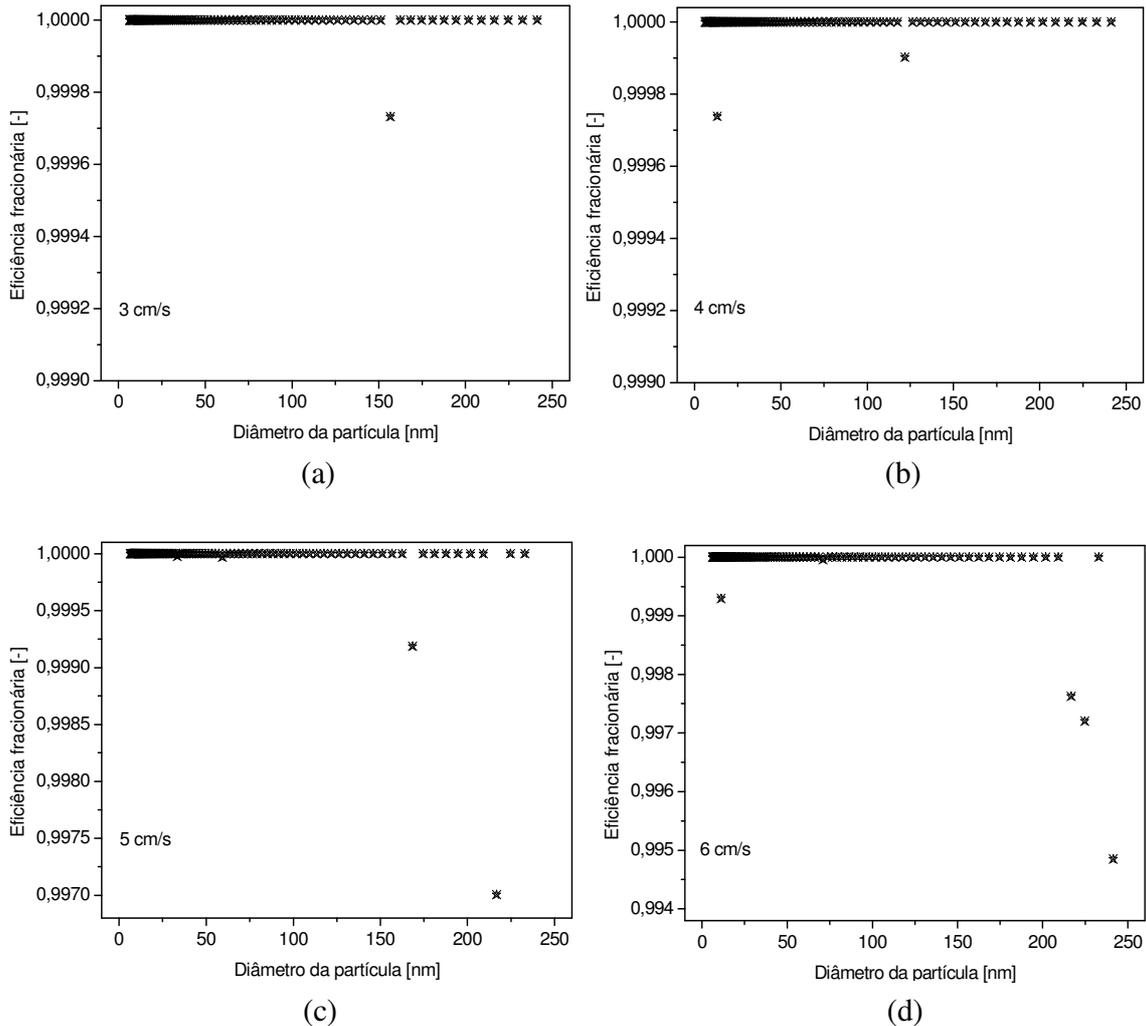


Figura 4.33 – Eficiência fracionária das membranas, para as velocidades: (a) 3 cm/s; (b) 4 cm/s; (c) 5 cm/s e (d) 6 cm/s.

Nota-se que, de acordo com as Figuras 4.32 a 4.34, as membranas apresentaram um bom desempenho na remoção das nanopartículas, já que a eficiência de remoção das partículas foi de 100% para a maioria dos diâmetros analisados, na faixa de velocidades de interesse.

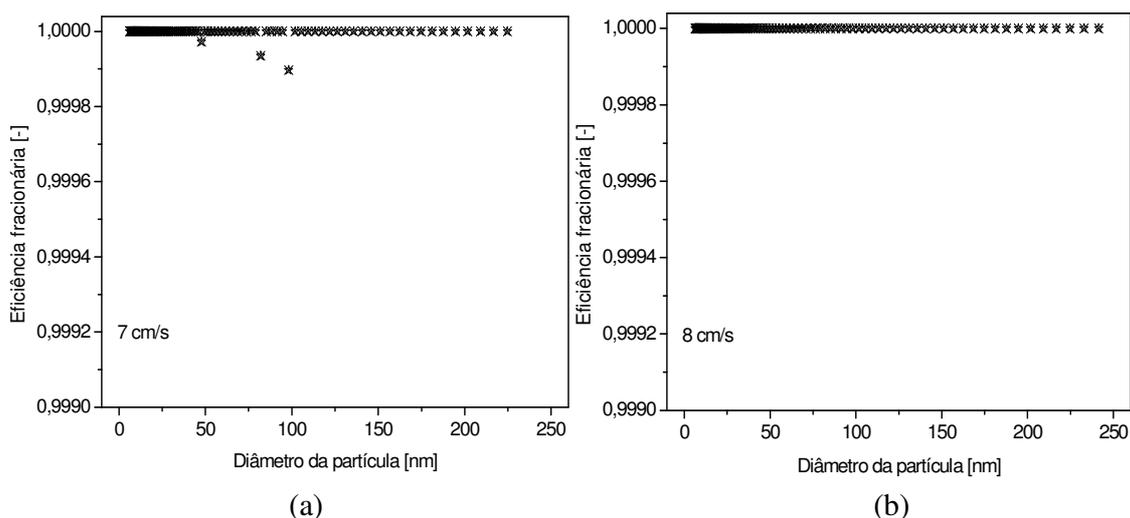


Figura 4.34 – Eficiência fracionária das membranas para as velocidades: (a) 7 cm/s e (b) 8 cm/s.

Certamente, a atuação das membranas na filtração de partículas compreendidas na escala nanométrica foi mais eficiente quando comparada aos demais meios filtrantes estudados neste trabalho. Isto é evidenciado pelo fato de que com o aumento da velocidade de filtração, não se percebe aumento significativo na penetração de partículas em tais membranas, visto que para a velocidade de 8 cm/s, a eficiência foi de 100 % para todos os diâmetros analisados. Neste mesmo sentido, observa-se que, em todas as velocidades estudadas, a penetração de partículas, mesmo sendo desprezível, aconteceu de forma aleatória em relação à faixa de tamanho, ou seja, não houve tendência alguma em seu comportamento.

4.3 – Queda de pressão nos meios filtrantes

A queda de pressão juntamente com os resultados de eficiência de remoção de partículas proporciona uma análise bem mais detalhada do desempenho dos meios filtrantes. Altos valores de queda de pressão podem inviabilizar um projeto, mesmo que a eficiência de um filtro apresente valores altos.

Neste contexto, os valores da queda de pressão dos meios filtrantes foram obtidos, à medida que se alteravam as velocidades de filtração estabelecidas no sistema. Desta forma, as Figuras 4.35 a 4.37, apresentadas em mesma escala, mostram o

comportamento da queda de pressão, em função das velocidades, para os meios filtrantes testados.

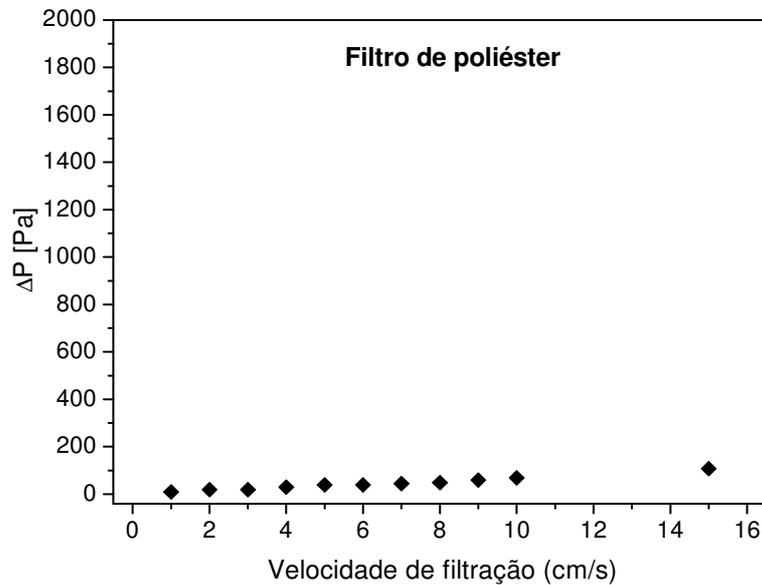


Figura 4.35 – Queda de pressão do filtro de poliéster em função da velocidade de filtração.

Nota-se que a queda de pressão, para todos os meios filtrantes, possui uma tendência em aumentar, de forma discretamente linear, quando a velocidade de filtração é acrescida.

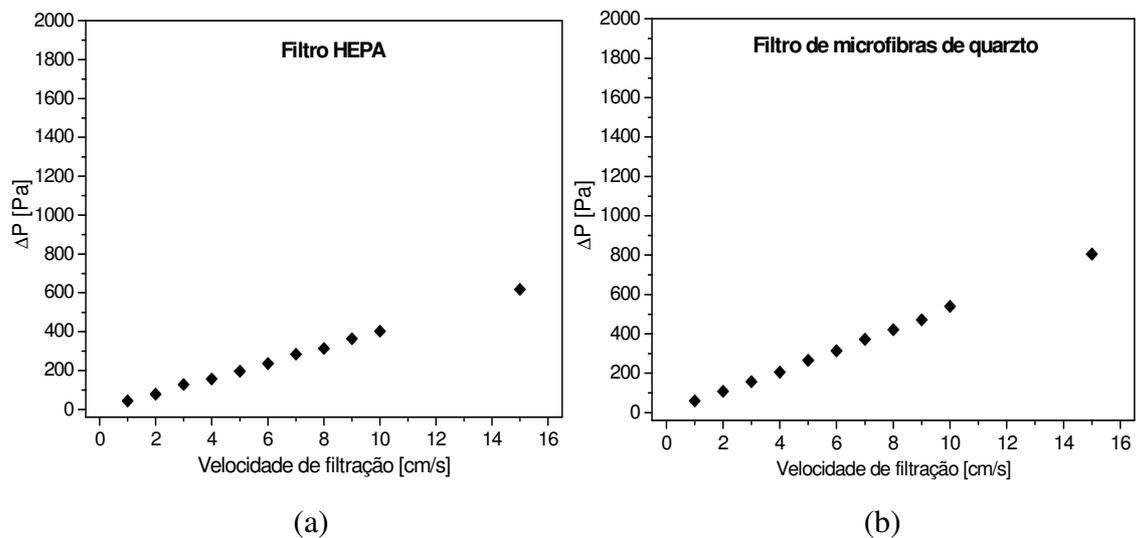


Figura 4.36 – Queda de pressão nos meios filtrantes em função da velocidade de filtração: (a) filtro HEPA e (b) filtro de microfibras de quartzo.

O filtro de poliéster apresentou uma menor queda de pressão em relação aos demais meios filtrantes, atingindo um valor máximo de 108 Pa, aproximadamente, para a velocidade de filtração de 15 cm/s. Pode-se observar na Figura 4.35 que, ao passo que se aumentava a velocidade do sistema, a queda de pressão quase não se alterava, tendo seus valores acrescidos levemente. Este comportamento é devido a algumas propriedades do filtro de poliéster, tal como a permeabilidade que, por sua vez, indica a facilidade da passagem do fluido pelos poros. Certamente, tal propriedade depende das características estruturais do filtro.

Neste sentido, o filtro de microfibras de quartzo apresentou uma queda de pressão levemente maior que o filtro HEPA. No entanto, dentre os meios filtrantes avaliados, as membranas apresentaram uma maior queda de pressão, visto que o maior valor foi equivalente a 1883 Pa, para a velocidade de 15 cm/s.

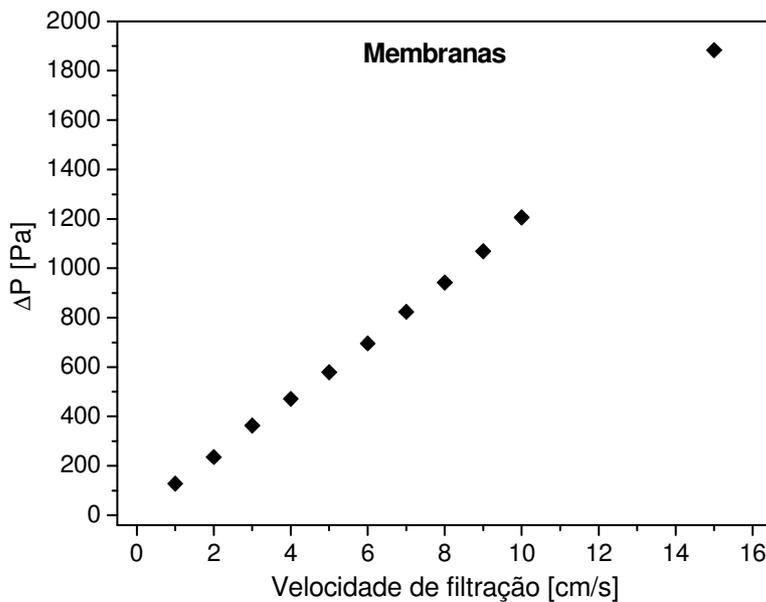


Figura 4.37 – Queda de pressão das membranas em função da velocidade de filtração.

4.4 – Comparação da eficiência experimental do filtro de poliéster com os modelos da literatura

Os resultados de eficiência fracionária do filtro de poliéster foram comparados com os modelos apresentados no Capítulo 2, correspondente à Revisão Bibliográfica.

Desta forma, para os mecanismos difusional e interceptação direta foram aplicadas, respectivamente, as Equações (2.20) e (2.27) que correspondem às equações de Liu e Rubow (1990). Para os mecanismos de coleta inercial e gravitacional, foram utilizadas as Equações (2.26) e (2.29) propostas, respectivamente, por Friendlander e Pasceri (apud SPURNY, 1998) e Tien (2007). O mecanismo eletroforético não foi considerado uma vez que as partículas eram neutralizadas pela fonte de Kriptônio-85, antes da passagem do aerossol pelo meio filtrante, e pela fonte de Amerício 241, antes do aerossol seguir para análise no espectrômetro SMPS.

A partir da determinação das eficiências de coleta individuais para cada mecanismo, foi possível verificar que os mecanismos de coleta de interceptação direta e, principalmente, o difusional são os mais significativos para a remoção de partículas na faixa em estudo. Já os mecanismos inercial e gravitacional não foram representativos na coleta das partículas.

Desta forma, a eficiência total de coleta da fibra (η_T) foi determinada pela soma das eficiências individuais de cada mecanismo, conforme a Equação (2.34). Uma vez que se obteve a eficiência total de coleta da fibra (η_T), foi possível definir a eficiência do filtro para cada diâmetro de partícula analisada, conforme a Equação (2.11) que está apresentada novamente na Equação (4.1):

$$E = 1 - P = 1 - \exp \left[- \frac{4 L (1 - \varepsilon) \eta_T}{\pi \varepsilon D_f} \right] \quad (4.1)$$

A partir de tal equacionamento, efetivado para todas as velocidades estudadas, tornou-se possível gerar as curvas teóricas comparativas. A Figura 4.38 apresenta a comparação da eficiência teórica com a eficiência experimental, para todas as velocidades estudadas.

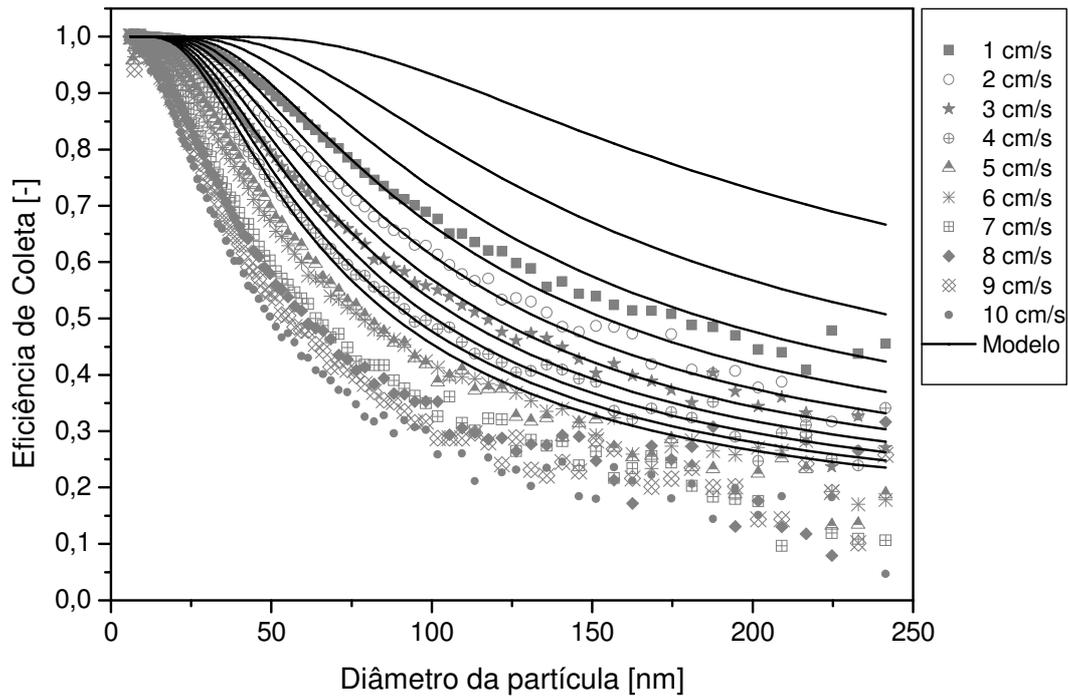


Figura 4.38 – Comparação entre as eficiências experimental e teórica do filtro de poliéster.

Nota-se que a eficiência teórica superestima a eficiência experimental para a faixa de partículas analisada e para todas as velocidades de filtração estudadas. No entanto, as curvas de eficiência teórica tiveram a mesma tendência qualitativa, se colocadas com as curvas de eficiência experimental, ou seja, ambas eficiências decaíram com o aumento do diâmetro da partícula e tal efeito tornou-se intensivo com o aumento da velocidade.

A diferença entre tais curvas certamente se deve as simplificações das equações utilizadas. Porém, tais equações podem ser ajustadas, de forma a representar os dados satisfatoriamente, pela introdução ou adequação de alguns parâmetros e/ou coeficientes. No entanto, o desenvolvimento de tal estudo não pertenceu ao domínio deste trabalho.

5- CONCLUSÕES

A partir dos testes referentes à eficiência dos meios filtrantes, bem como a queda de pressão dos mesmos, foi possível obter as seguintes conclusões:

- Para as velocidades estudadas, o filtro de poliéster apresentou valores de eficiência na remoção de partículas entre 5 e 100%. Observou-se que, quando as velocidades de filtração eram baixas, a eficiência foi alta para faixas de tamanho entre 6,15 e 50 nm. Adicionalmente, para velocidades maiores, tal como as de 8 a 10 cm/s, o filtro de poliéster apresentou um baixo desempenho, atingindo eficiências abaixo de 40% para diâmetros maiores que 70 nm. Portanto, notou-se que a eficiência do filtro decai com o aumento do diâmetro da partícula e o efeito é intensificado com o aumento da velocidade, implicando na inferência de que o mecanismo difusional é o mais significativo na coleta de partículas que abrangem a faixa nanométrica em questão;

- Os filtros HEPA e de microfibras de quartzo obtiveram valores de eficiência de coleta acima de 0,99, sendo que, para todas as velocidades estudadas, o segundo apresentou eficiências acima de 0,999. Adicionalmente, foi observado um comportamento em relação à faixa de partículas penetradas que, por sua vez, estava compreendida entre 45 e 160 nm, em ambos os filtros. A penetração de partículas nesta faixa foi mais incidida, à medida que a velocidade de filtração era aumentada em magnitude. Ainda, notou-se que, de um modo geral, as eficiências de remoção de partículas cujos diâmetros estavam abaixo de 45 nm e acima de 170 nm, aproximadamente, apresentaram valores equivalentes a 1, para todas as velocidades. A diferença entre o desempenho do filtro de poliéster e dos filtros de celulose HEPA e de microfibras de quartzo se deve às suas próprias características: tamanho médio das fibras e heterogeneidade das mesmas;

- As membranas também apresentaram um elevado desempenho na remoção das nanopartículas, já que a eficiência de remoção das partículas, em termos percentuais, foi de 100% para a maioria dos diâmetros analisados e de acordo com as velocidades avaliadas. A atuação das membranas na filtração de partículas compreendidas na escala nanométrica foi mais eficiente quando comparada aos demais meios filtrantes estudados neste trabalho. Isto foi evidenciado pelo fato de que com o aumento da velocidade de filtração, não se percebeu

qualquer aumento na penetração das partículas. Além disso, não se observou tendência em relação à faixa de tamanho de partículas penetradas, visto que a penetração ocorreu de forma aleatória, em se tratando da escala de diâmetros estudada;

- Em relação à queda de pressão, os meios filtrantes avaliados não se tornaram inviáveis na operação de filtração. Além disso, notou-se que, embora o filtro de poliéster tenha apresentado uma baixa queda de pressão, o mesmo não exibiu um bom desempenho na remoção de partículas, para toda a faixa de diâmetros analisada e velocidades estudadas. Por outro lado, as membranas representaram o meio filtrante que proporcionou uma maior queda de pressão, como também o que apresentou uma maior eficiência na coleta de partículas, como mencionado anteriormente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, M. L. *Filtração de gases em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada*.1995.p.123. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- AHN, Y.C.; PARK, S.K.; KIM, G.T.; HWANG, Y.J.; LEE, C. G.; SHIN, H.S.; LEE, J.K. Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers. *Current Applied Physics*, v. 6, n.6, p. 1030-1035, 2006.
- AITKEN, R. J.; CREELY, K. S.; TRAN, C.L. Nanoparticles: an occupational hygiene review. *Research Report 274. Institute of Occupational Medicine*,2004.
- ASSUMPÇÃO, L.F.J. *Sistema de Gestão Ambiental: Manual prático para implementação de SGA e Certificação de ISO 14.001*. 3.ed. Curitiba: Juruá, 2006. p.204.
- BALAZY, A.; PODGÓRSKI, A.; GRADÓN, L. Filtration of nanosized aerosol particles in fibrous filters. I – Experimental results. *Abstracts of the European Aerosol Conference*, p. 967-968, 2004. Abstracts.
- BOSKOVIC, L.; AGRANOVSKI, I.E.; ALTMAN, I.S.; BRADDOCK, R.D. Filter efficiency as a function of nanoparticle velocity and shape. *Journal Aerosol Science*, v. 39, p. 635-644, 2008.
- BRAGA, B; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. J. L.; MIERZWA, J.C.; BARROS, M.T.L; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. *Introdução a Engenharia Ambiental*. São Paulo: Prentice Hall, 2005.
- CETESB. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. Qualidade do ar. Disponível em: <www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em 16/10/2008.
- 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, n.5/6, p. 497-509, 1998.
- CHENG, M.; FORD, E.A.; DEPAOLI, D.W.; KENIK, E.A., ANGELINI, P. Validation of TiO₂ particle size distribution measured by scanning mobility particle sizer. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 46, p. 6269–6272, 2007.

- COURY, J. R. *Electrostatic effects in granular bed filtration of gases*. 1983. p.234. Tese (Doutorado). University of Cambridge, Inglaterra.
- DIAS, T. Membranas: meio filtrante de tecnologia avançada. *Revista e portal Meio Filtrante*. Ano V, n. 23, 2006.
- DICKENSON, C. *Filters and Filtration Handbook*. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 1992, p.778.
- 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.
- DONOVAN, R. P. *Fabric filtration for combustion sources*. New York: Marcel Dekker Inc., 1985, p.426.
- DULLIEN, F. A. L. *Introduction to industrial gas cleaning*. San Diego: Academic Press, 1989, p.285.
- ENGLERT, N. Fine particles and human health – a review of epidemiological studies. *Toxicology Letters*, n.149, p.235-242, 2004.
- FALAGUASTA, M.C.R. *Estudo do desempenho de um precipitador eletrostático operando na captura de partículas submicrométricas e nanométricas*. 2005.p.305. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- FRANK, B. P.; SALTIEL, S.; HOGREFE, O.; GRYGAS, J. LALA, G.G. Determination of mean particle size using the electrical aerosol detector and the condensation particle counter: Comparison with the scanning mobility particle sizer. *Journal of Aerosol Science*, v. 39, p. 19–29, 2008.
- HINDS, W. C. *Aerosol Technology: properties, behavior and measurement of airborne particles*. 2. ed., New York: John Willey & Sons, 1999, p.483.
- HUANG, S.H.; CHENA, C.W.; CHANGA, C.P.;LAI, C.Y.; CHEN, C.C. Penetration of 4.5 nm to 10 µm aerosol particles through fibrous filters. *Journal of Aerosol Science*. v.38.p.719-727. 2007.

- HUANG, H.L.; HUANG, Y.C.; WANG, D.M. Aerosol filtration efficiency of Teflon fibrous filters. *Abstracts of the European Aerosol Conference*, p.973-974, 2004. Abstracts.
- INTERNATIONAL STANDARDS 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.
- KIM, C.S; BAO, L.; OKUYAMA, K.; SHIMADAL, M.; NIINUMA, H. Filtration efficiency of a fibrous filter for nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, n.8, p.215-221, 2006.
- LIU, B. Y. H.; LEE, K. W. An aerosol generator of high stability. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, v. 36, p. 861–865, 1975.
- LIU, B.Y.H; RUBOW, K.L. Efficiency, pressure drop and figure of merit of high efficiency fibrous and membrane filter media. *Proceedings of the 5th World Filtration Congress*, Nice, p.112, 1990.
- LIU, P. S. K.; DESHLER, T. Causes of concentration differences between a scanning mobility particle sizer and a condensation particle counter. *Aerosol Science and Technology*, v. 37, p. 917–923, 2003.
- LINAK, W.P.; YOO, J.I.; WASSON, S.J.; ZHU, W.; WENDT, J.O.L.; HUGGINS, F.E.; CHEN, Y.; SHAH, N.; HUFFMAN, G.P.; GLMOUR, M.I. Ultrafine ash aerosols from coal combustion: characterization and health effects. *Proceedings of the Combustion Institute*, n.31, p.1929-1937, 2007.
- LORA, E.E.S. Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.
- NANI, S. Vantagens e riscos da nanotecnologia ao meio ambiente. Campinas, 2002. UNICAMP – Labjor. Reportagens Nanociência e Nanotecnologia. Disponível em <www.comciencia.br/reportagens/nanotecnologia/nano04.htm>. Acesso em 13/10/2007.
- PAM-MEMBRANAS SELETIVAS LTDA. Disponível em <www.pam-membranas.com.br>.
- PAYET, S.; BOULAUD, D.; MADELAINE, G.; RENOUX, A. Penetration and pressure-drop of Hepa filter during loading with submicron liquid particles. *Journal of Aerosol Science*, v.23, p. 723-735, 1992.

- PIMENTEL, L.F.; JÁCOME, A.T.J.; MOSQUEIRA, V.C.F; MAGALHÃES, N.S.S. Nanotecnologia farmacêutica aplicada ao tratamento da malária. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, v. 43, n.4, p. 503-514, 2007.
- PUI, D.Y.H; CHEN, D.R. Nanometer particles: a new frontier for multidisciplinary research. *Journal Aerosol Science*, v.28, n. 4, p. 539 – 554, 1997.
- PUI, D.Y.H.; KIM, S.C. Experimental study of nanoparticle penetration through various filter media. *NNIN REU Research Accomplishments*, p.42-43, 2005.
- RICKERBY, D.G; MORRISON, M. Nanotechnology and the environment: a European perspective. *Science and Technology of Advanced Materials*, n.8, p. 19-24, 2006.
- RODRIGUES, A.C.M. *Estudo da formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos de polipropileno e de algodão*. 2004.p 123. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- SILVA, G.M.C. *Desempenho de filtros cerâmicos na filtração de gases a altas temperaturas*. 2008. p.175. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- SPURNY, K.R. *Advances in aerosol filtration*. Florida: CRC Press LLC, 1998, p.533.
- STEFFENS, J. *Desempenho de filtros fibrosos operando na remoção de partículas nanométricas de aerossóis*.2007. p.206. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- STEFFENS, J.; COURY, J.R. Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles: I—Homogeneous fibers. *Separation and Purification Technology*, n.58, p. 99-105, 2007a.
- STEFFENS, J.; COURY, J.R. Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles II. Heterogeneous fibers. *Separation and Purification Technology*, n.58, p. 106-112, 2007b.
- TIEN, C. *Granular Filtration of Aerosols and Hydrosols*, Butterworths, USA, 2007.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Disponível em <www.epa.gov>. Acesso em 15/11/2008.

WILLEKE, K.; BARON, P.A. *Aerosol Measurementet*: principles, techniques, and applications. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. p.876.

WAKEMAN, R.J.; TARLETON, E.S. *Filtration*: Equipment selection, modelling and process simulation. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 1999. p.446.

YUN, K.M.; HOGAN JR., C.J.; MATSUBAYASCHI, Y.; KAWABE, M.;ISKANDAR, F.; OKUYAMA, K. Nanoparticle filtration by electrospun polymer fibers. *Chemical Engineering Science*, n. 62, p. 4751-4759, 2007.

APÊNDICE A

Testes de avaliação do uso da fonte de Amerício-241 disposto na entrada do espectrômetro SMPS.

O princípio de funcionamento do espectrômetro SMPS se baseia em uma técnica de detecção de partículas por mobilidade elétrica, como mencionado anteriormente. Para garantir uma análise precisa do aerossol amostrado, tal que permita caracterizar verdadeiramente o aerossol produzido, torna-se necessário que o mesmo seja neutralizado, antes de ser submetido à análise no espectrômetro. Ainda que o aerossol tenha sido subjugado à neutralização antes de sua amostragem (fonte de Kriptônio), é muito provável que o mesmo, durante o percurso pelo duto e pelas mangueiras, possa vir a adquirir cargas eletrostáticas. Por tal motivo, foi avaliado o uso da fonte de Amerício na entrada do espectrômetro SMPS (vide Figura 3.1 da Unidade Experimental) e verificada a magnitude do seu efeito sobre as análises das concentrações de partículas na corrente gasosa.

Desta forma, durante os ensaios de filtração de nanopartículas utilizando-se os meios filtrantes avaliados, foi possível averiguar o emprego da fonte de Amerício. Os procedimentos que descrevem os testes de filtração são exibidos na seção 3.2.2 do capítulo Materiais e Métodos. Para cada situação de amostragem antes e depois do meio filtrante, as partículas coletadas pela sonda seguiam para o espectrômetro SMPS fazendo uso, ou não, da fonte em etapas alternadas.

Os resultados deste procedimento são apresentados nas Figuras A.1 a A.3.

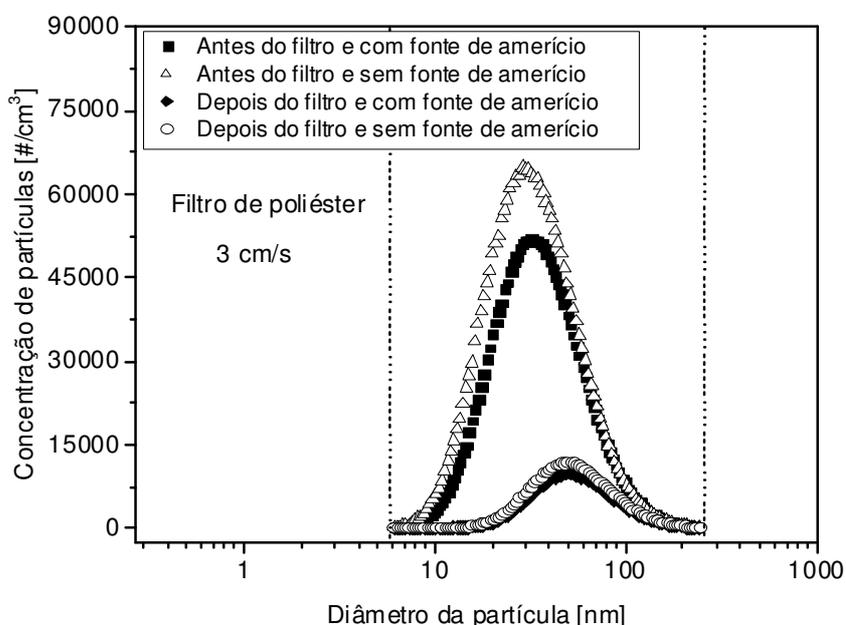


Figura A.1 – Concentração de partículas para cada diâmetro, para a velocidade de 3 cm/s

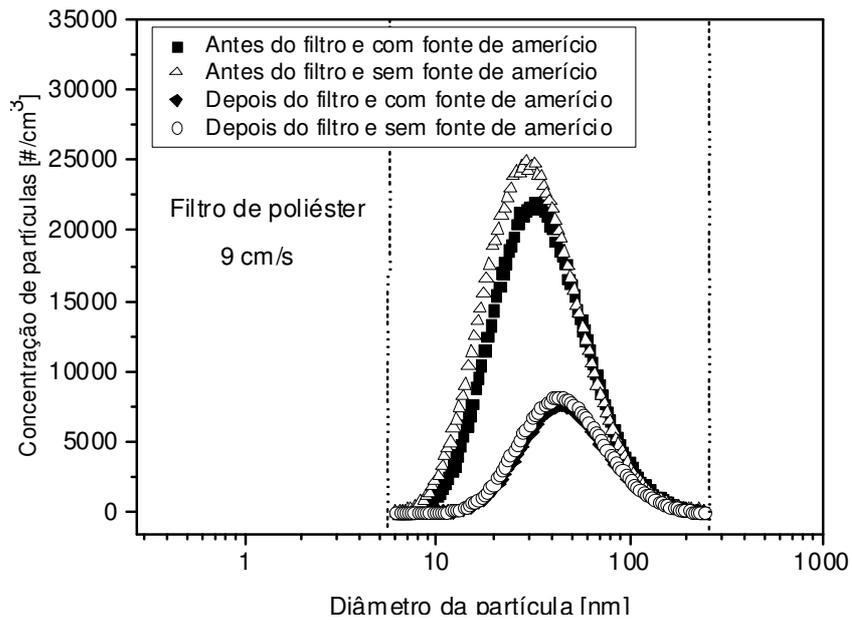


Figura A.2 – Concentração de partículas para cada diâmetro, para a velocidade de 9 cm/s.

Nota-se que as curvas de distribuição de partículas que representam os ensaios nos quais o aerossol amostrado conduziu-se até a fonte de Amerício antes de ser submetido à análise no SMPS manifestam-se menores que as curvas que representam a análise do aerossol encaminhado diretamente ao espectrômetro, quando amostrado.

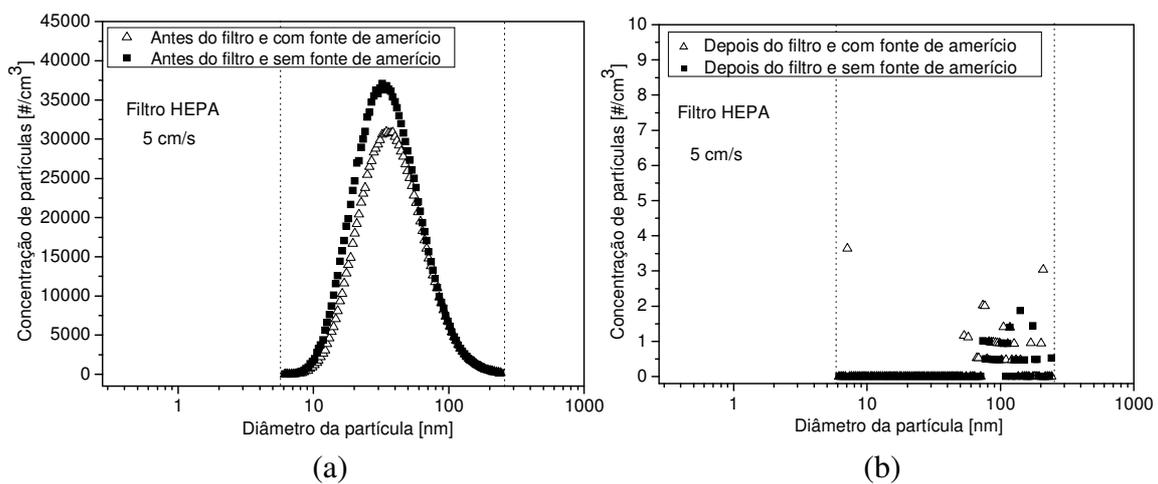


Figura A.3 – Concentração de partículas para cada diâmetro, para a velocidade de 5 cm/s: (a) antes do filtro HEPA e (b) depois do filtro HEPA.

Este comportamento se manifestou em todos os testes realizados. Em vista disto, torna-se evidente que esta discrepância entre as curvas de concentração de partículas esteja sujeita ao emprego de tal fonte. O fato pode estar associado à própria neutralização visto que a

classificação de partículas no DMA está relacionada à habilidade das mesmas em atravessar um campo elétrico que, por sua vez, depende do número de cargas presentes nas partículas. Portanto, era de se esperar que houvesse disparidades entre os resultados das análises de um mesmo aerossol que, em certa situação, tenha sido previamente neutralizado ou que, depois de amostrado, tenha sido conduzido diretamente à classificação de partículas no DMA.

Contudo, não se pode rejeitar a conjectura de que esta diferença nas distribuições das partículas entre ambos procedimentos (usando ou não a fonte de amerício) também esteja relacionada às perdas das partículas por difusão ao desviar a trajetória do aerossol e conduzi-lo até a fonte neutralizadora. Porém, a discrepância entre os resultados é tão nítida que se torna pouco provável que tal decorrência esteja atribuída somente a isto.

Pela análise da Figura A.4, verifica-se que há diferença entre as curvas de eficiência fracionária do filtro de poliéster nos casos em que o aerossol amostrado é neutralizado pela fonte de Américio e quando não se fez o uso da mesma. Nota-se que as curvas da Figura A.4-a estão ligeiramente deslocadas para baixo quando comparadas às curvas da Figura A.4-b. Devido a isto, a avaliação do desempenho do filtro fica comprometida.

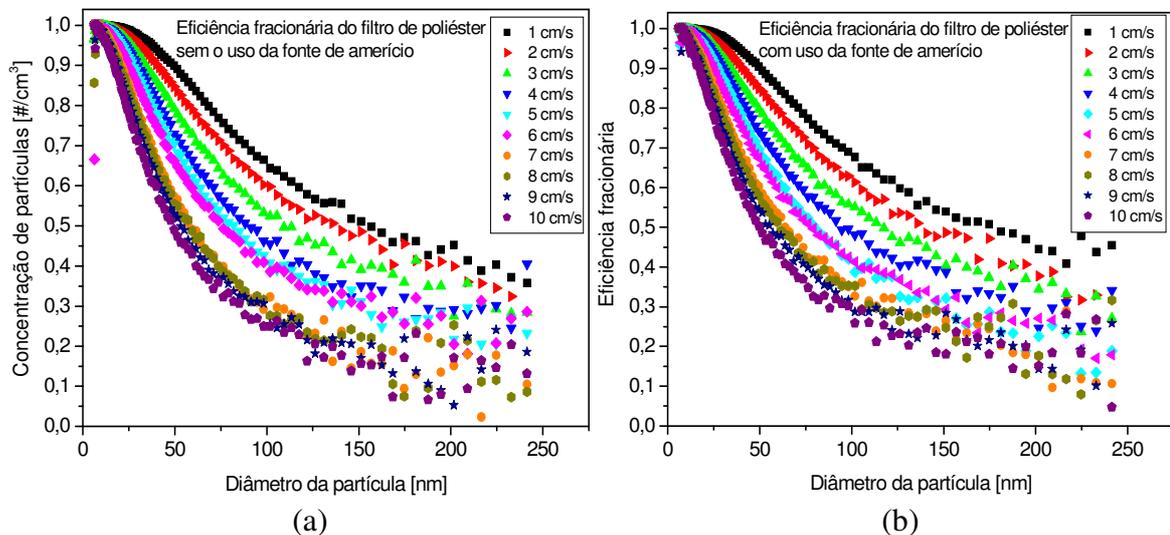


Figura A.4 – Eficiência fracionária do filtro de poliéster: (a) sem uso da fonte de Américio e (b) com uso da fonte de Américio.

De acordo com este contexto, chegou-se à conclusão de que era imprescindível utilizar a fonte de Américio para neutralizar o aerossol amostrado antes de conduzi-lo para análise no SMPS, uma vez que, não adotando tal procedimento, o diagnóstico final do aerossol analisado não equivaleria a uma amostra representativa do aerossol produzido. Assim, medidas errôneas de concentração de partículas implicariam em conclusões erradas

quanto à caracterização do aerossol e, até mesmo, quanto ao desempenho de meios filtrantes, como pôde ser observado na Figura A.4.

APÊNDICE B

Verificação da penetração de partículas nos filtros HEPA e de microfibras de quartzo.

De acordo com os resultados apresentados nas seções referentes à eficiência experimental dos filtros HEPA e de microfibras de quartzo, constata-se que a penetração de partículas ocorre continuamente em uma faixa intermediária na escala de diâmetros analisados. O espectrômetro SMPS foi configurado para analisar partículas com diâmetros compreendidos entre 6,15 e 241,4 nm. As partículas que penetravam ambos os filtros possuíam diâmetros de 45 a 160 nm, aproximadamente. Além disso, a penetração nesta faixa era aumentada, à medida que a velocidade de filtração era acrescida. Verificou-se também que a penetração de partículas era incidida em outras faixas de tamanho, porém a ocorrência não foi tendenciosa.

Com a finalidade de consubstanciar tal comportamento, foram investigados os procedimentos utilizados de forma a eliminar prováveis erros que pudessem estar atribuídos a estes resultados.

Como primeiro passo, foi verificado se os resultados indicados como penetração poderiam estar correlacionados a desprendimentos de partículas durante a operação de filtração e a análise do aerossol amostrado. Os testes foram iniciados com o propósito de limpar as tubulações da unidade experimental, de forma a remover as partículas ali presentes. Para tanto, apenas ar puro proveniente dos filtros de purificação era escoado no sistema a uma velocidade de filtração de 7 cm/s. Ao passo que o ar escoava, amostras do mesmo eram conduzidas ao SMPS para serem analisadas. Este procedimento possibilitou acompanhar a limpeza da unidade, de tal maneira que as medidas de concentração de partículas ainda presentes no sistema fossem monitoradas até um momento em que não se verificasse mais sua presença nas análises. Foram realizadas nove varreduras nas quais o *scan up* estava estabelecido em 300s, totalizando, portanto, um tempo de limpeza de 45 minutos. Ainda, o sistema não possuía nenhum meio filtrante acoplado.

Em decorrência deste processo, verificou-se que não havia partículas presas às tubulações, visto que foram constatadas apenas seis partículas, em baixas concentrações por unidade de volume, no total das análises. Ainda, em três das nove análises, não foi observada qualquer presença de partículas. A partir destes resultados, iniciaram-se os próximos testes.

O segundo passo consistiu em colocar o filtro HEPA na unidade e, por conseguinte, gerar partículas nanométricas de NaCl utilizando-se o atomizador da TSI. O espectrômetro SMPS estava configurado igualmente aos testes de desempenho dos meios filtrantes (impactador 0,0710 cm, Long-DMA, *scan up* 300s, *retrace* 15s, *break* 0s e vazão do aerossol requerida pelo SMPS 1,4 L/min), sendo que a velocidade de filtração estava estabelecida em 7

cm/s. Assim, foram realizadas amostragens do aerossol somente depois do dispositivo de filtração, de modo a efetuar sete análises no total.

As primeiras três análises corresponderam às amostragens do aerossol quando o gerador de partículas estava em funcionamento e, conseqüentemente, o aerossol era produzido. Os resultados destes ensaios apresentaram o mesmo comportamento que os testes de eficiência experimental do filtro HEPA, ou seja, foi percebida a ocorrência de penetração de partículas apenas na faixa previamente mencionada. No instante em que a terceira varredura chegou ao fim, o gerador de partículas foi imediatamente desligado e, no mesmo momento, foi dado início a uma nova análise do aerossol. Neste ponto, apenas ar puro escoava no sistema e qualquer partícula acusada no analisador seria considerada partícula remanescente no sistema ou provida de desprendimentos de dutos e mangueiras. A Figura B.1 apresenta as medidas de concentração de partículas para a terceira e quarta análises do aerossol amostrado após o meio filtrante, respectivamente.

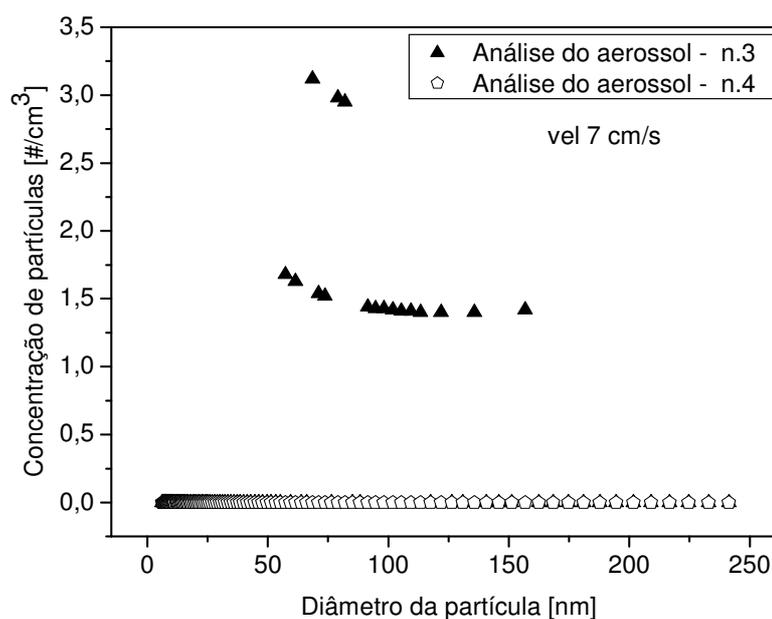


Figura B.1 – Concentração de partículas para cada diâmetro após o filtro HEPA.

Nota-se que as partículas penetradas através do filtro HEPA compreendem diâmetros entre 50 e 160 nm, aproximadamente. Ainda, verifica-se que tal comportamento é verdadeiramente válido uma vez que não houve penetração de partículas na quarta análise, que corresponde à corrente de ar puro sem alimentação de partículas do gerador. A mesma decorrência foi constatada nas últimas três análises. Isto comprova que a presença de partículas no aerossol após o meio filtrante não está atribuída a desprendimentos das mesmas

na linha de escoamento do gás. Além disto, observa-se que o tempo de residência das partículas dentro do equipamento é baixo, já que não houve medidas de concentração das mesmas na quarta análise.

Em seguida, foram realizados ensaios similares ao anterior. Para melhor avaliar a faixa de tamanhos de partículas que são penetradas através do filtro HEPA, realizaram-se testes nos quais a faixa de ocorrência foi segmentada em diversas partes, permitindo, então, uma análise mais criteriosa das mesmas.

Desta forma, o SMPS foi configurado para classificar partículas em quatro faixas de tamanho, tal como a de 40 a 71 nm; 68,5 a 140,7 nm; 140,7 a 181,1 nm e a de 187,7 a 241,4 nm. Para cada faixa de tamanho analisada, a varredura foi ajustada em 300s (*scan up*) e a velocidade de filtração foi definida em 7 cm/s. Da mesma forma que os testes anteriores, somente as amostragens do aerossol após o filtro HEPA foram conduzidas para o espectrômetro. A Figura B.2 apresenta o resultado das medidas de concentração do aerossol em que a faixa de diâmetro estipulada para análise foi ajustada entre 40 e 71 nm.

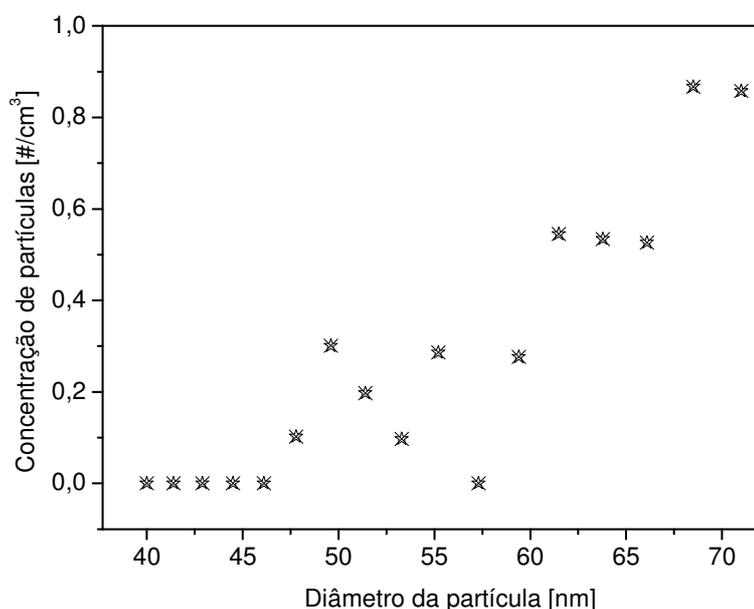


Figura B.2 – Concentração de partículas para cada diâmetro após o filtro HEPA.

Nota-se que não houve penetração de partículas com diâmetros compreendidos entre 40 e 46 nm. Por outro lado, a penetração é incidida para partículas de maiores diâmetros. Entretanto, a concentração de partículas que atravessaram o filtro HEPA é muito baixa, de tal forma que a eficiência do mesmo se mantém elevada.

A Figura B.3 mostra o resultado da caracterização, em termos de medidas de concentração, das quatro faixas de tamanho de partículas analisadas.

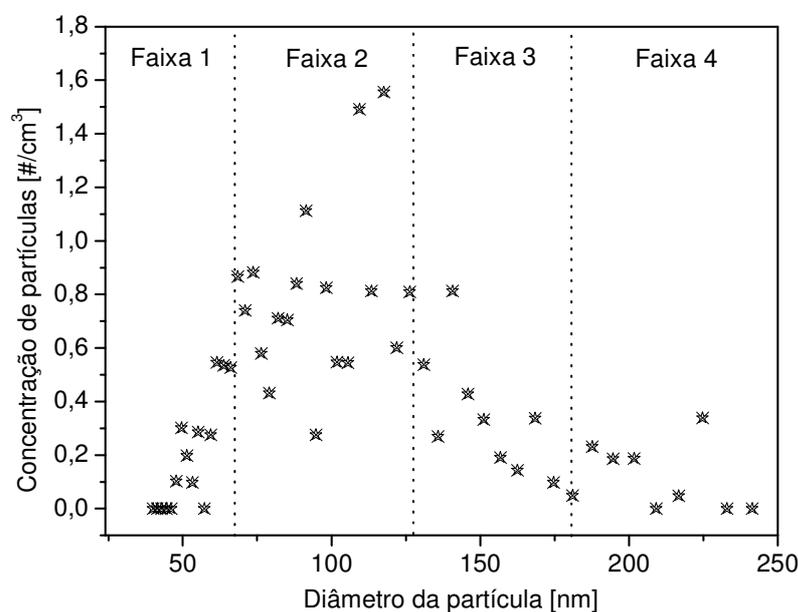


Figura B.3 – Concentração de partículas para cada diâmetro após o filtro HEPA.

Pela análise da Figura B.3, verifica-se que ao estabelecer um valor de *scan up* relativamente alto (no caso, 300s) para analisar uma estreita faixa de partículas, constata-se que a análise do aerossol apresenta um comportamento distinto, uma vez que foram observadas, após a passagem do aerossol pelo meio filtrante, medidas de concentração para todas as partículas cujos diâmetros estão compreendidos na faixa de ocorrência de penetração (45 a 160 nm). Adicionalmente, observa-se que a penetração é mais incidida na faixa 2 da Figura B.3, que corresponde à tamanhos de partículas entre 70 e 140 nm. Do mesmo modo, nota-se que a penetração é menor para partículas maiores que 170 nm e para partículas menores que 50 nm, aproximadamente. Este comportamento é mais bem observado na curva de eficiência fracionária do filtro.

A Figura B.4 ilustra a curva de eficiência fracionária do filtro HEPA para a velocidade de 9 cm/s. É de se destacar que os dados de eficiência apresentados em tal figura não correspondem aos ensaios realizados para este estudo de verificação da penetração de partículas. Tais dados se referem aos testes relacionados ao desempenho dos meios filtrantes apresentados na seção 4.2.2, do Capítulo Resultados e Discussão.

Como observado na Figura B.4, a eficiência do filtro decai para partículas cujos diâmetros compreendem a faixa entre 45 e 150 nm. No entanto, e como já aludido, este filtro apresentou altos valores de eficiência na remoção de partículas nanométricas.

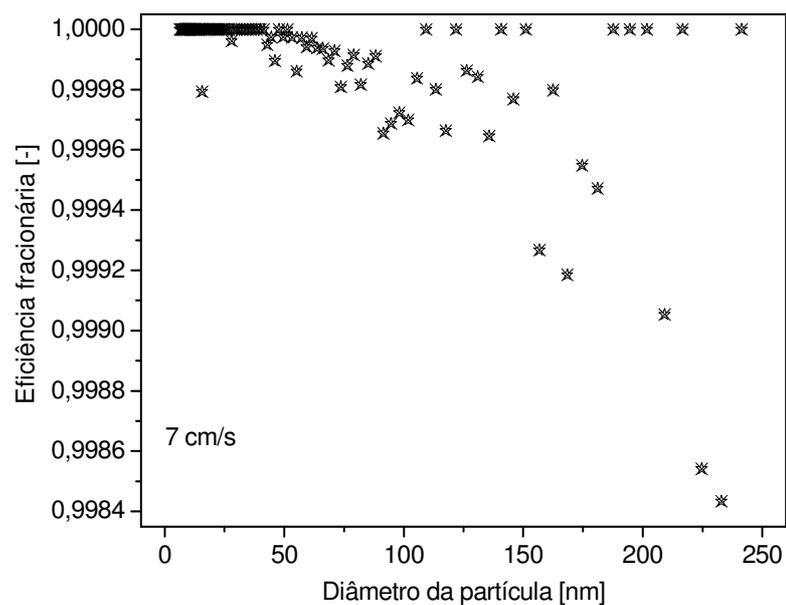


Figura B.4 – Eficiência fracionária do filtro HEPA, para a velocidade de 7 cm/s.

A partir dos testes apresentados nesta seção, pôde-se constatar que a presença de partículas no aerossol após a passagem pelo meio filtrante é devido, exclusivamente, à penetração. Além disso, verificou-se que tal ocorrência sempre acontece na mesma faixa de tamanho de partículas, fato este que precisa ser mais bem investigado para entender a sua causa. Os ensaios realizados para comprovar esta ocorrência também podem ser atribuídos ao desempenho do filtro de microfibras de quartzo, já que este meio filtrante apresentou o mesmo comportamento que o filtro HEPA, embora tenha se mostrado mais eficiente na remoção de partículas nanométricas na faixa estudada.

APÊNDICE C

Medidas de concentração de partículas antes e após a passagem do aerossol pelo meio filtrante.

C.1 – Filtro de poliéster

As Figuras C.1 e C.2 apresentam, para todas as velocidades estudadas, as curvas de distribuição de partículas para cada diâmetro antes e após a passagem do aerossol pelo filtro de poliéster.

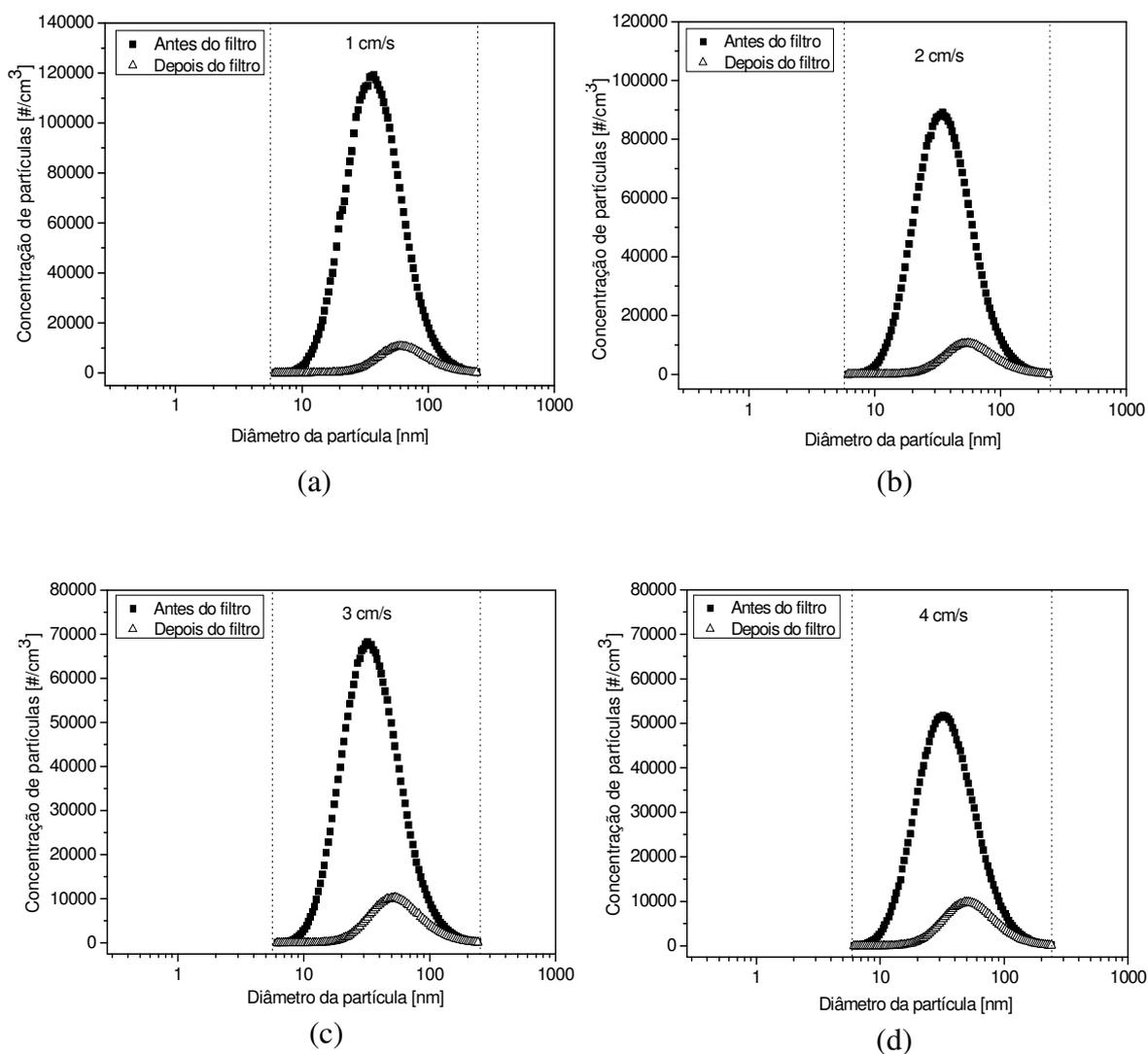


Figura C.1 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) 1 cm/s; (b) 2cm/s; (c) 3 cm/s e (d) 4cm/s.

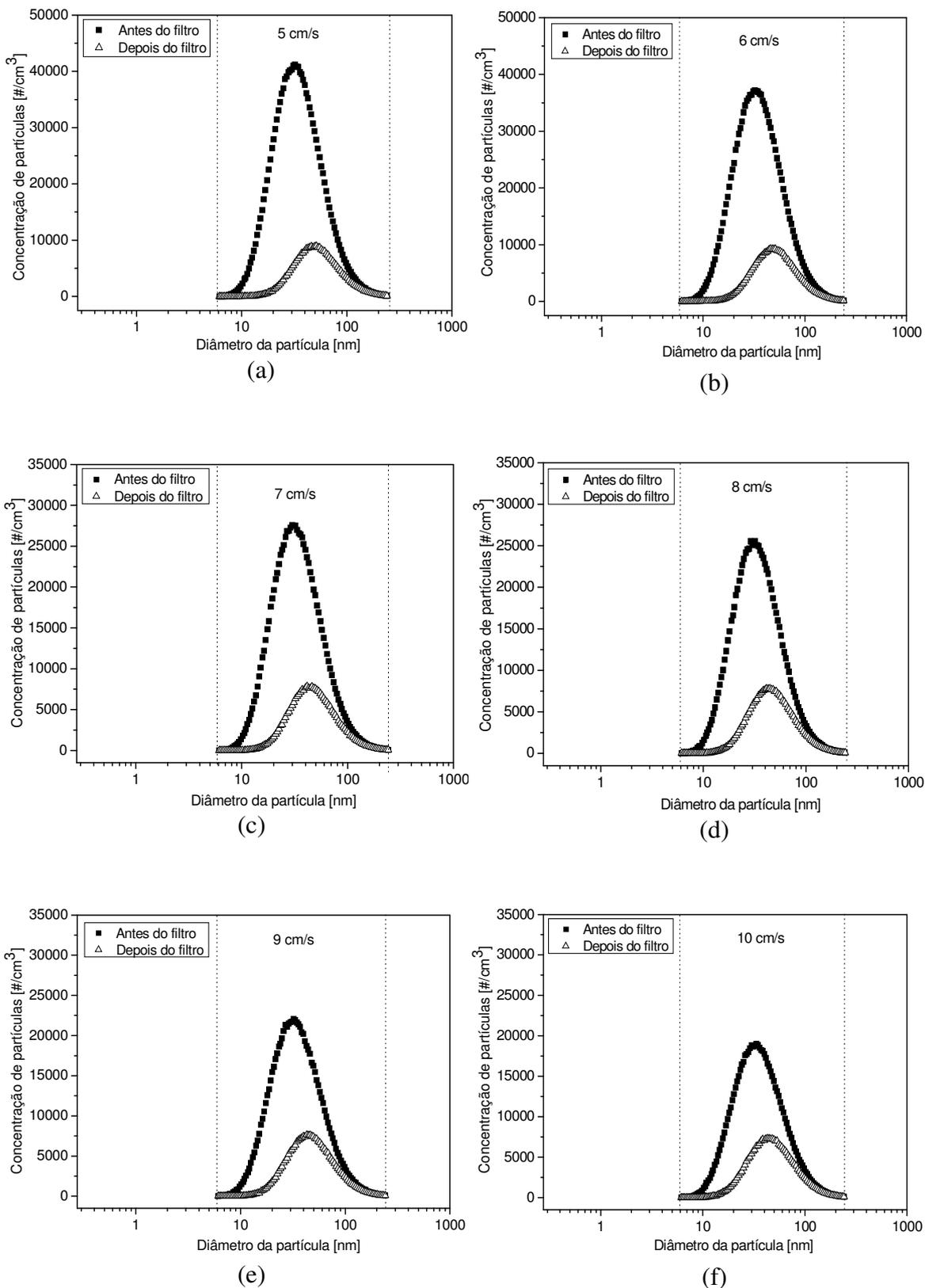


Figura C.2 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) 5 cm/s; (b) 6cm/s; (c) 7 cm/s; (d) 8cm/s; (e) 9 cm/s e (f) 10 cm/s.

C.2 - Filtro HEPA

As Figuras C.3 a C.4 apresentam, para todas as velocidades estudadas, as curvas de distribuição de partículas para cada diâmetro antes e após a passagem do aerossol pelo filtro HEPA.

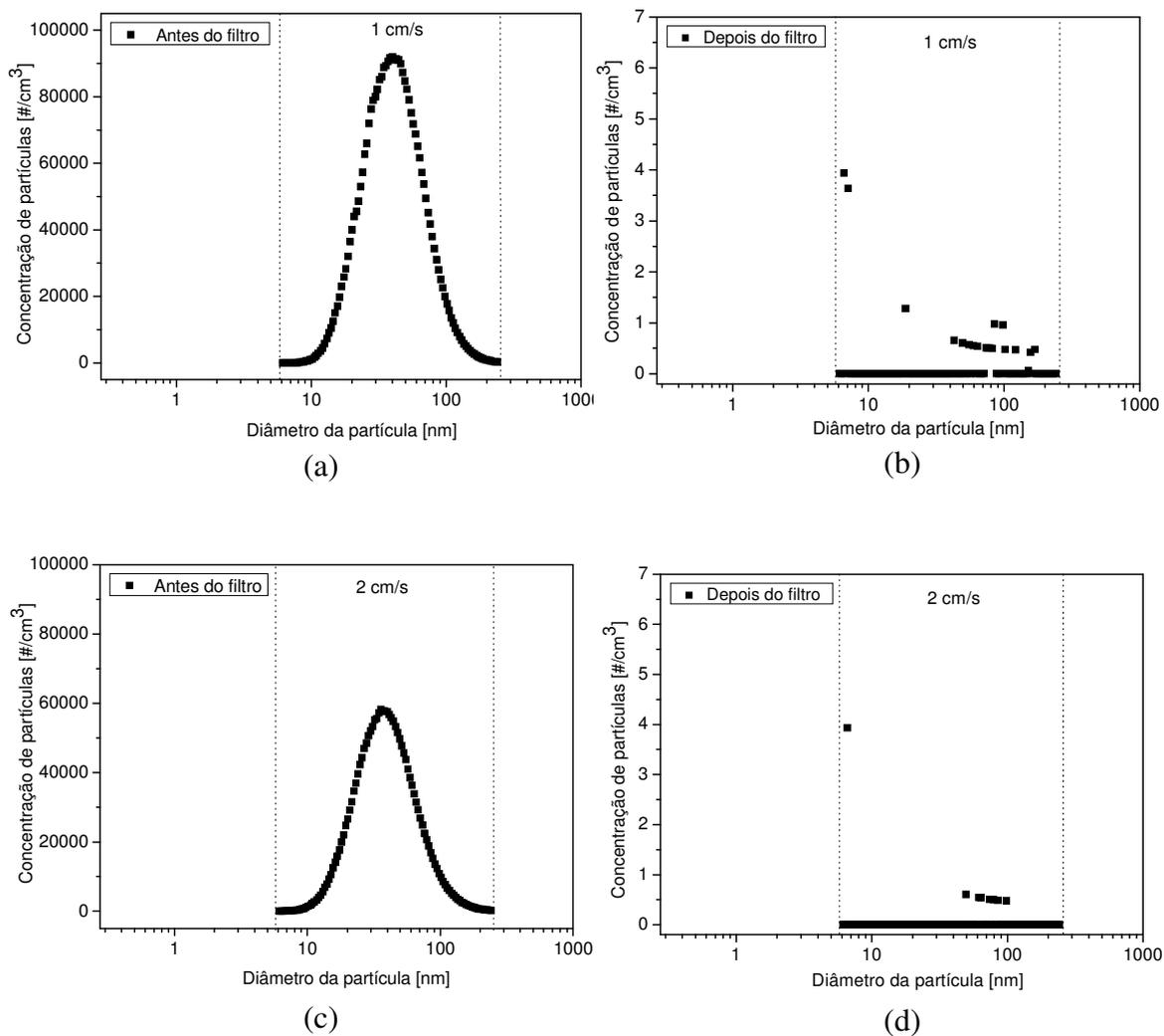


Figura C.3 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 1 cm/s; (c) e (d) 2 cm/s.

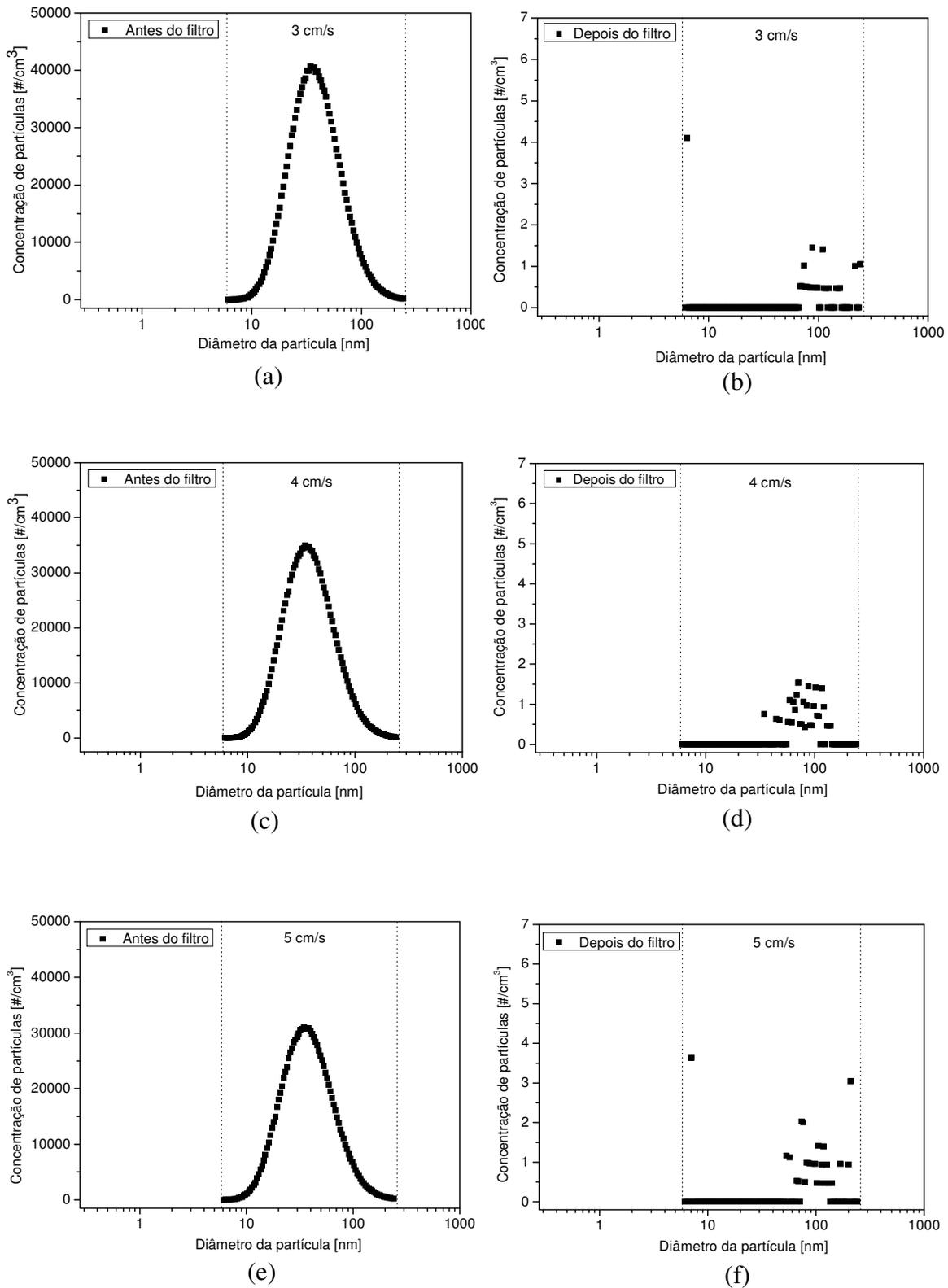


Figura C.4 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 3 cm/s; (c) e (d) 4 cm/s; (e) e (f) 5 cm/s.

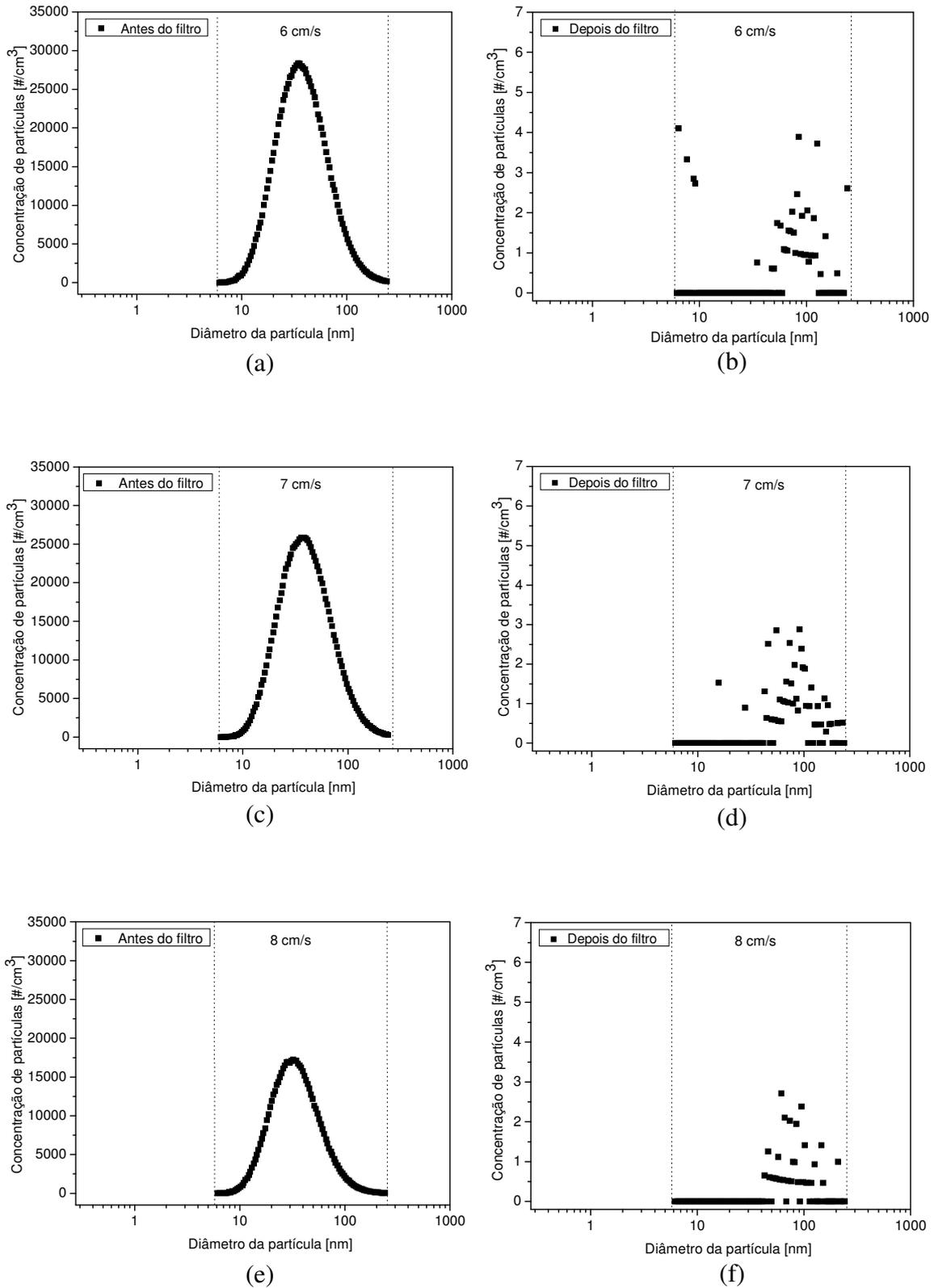


Figura C.5 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 6 cm/s; (c) e (d) 7 cm/s; (e) e (f) 8 cm/s.

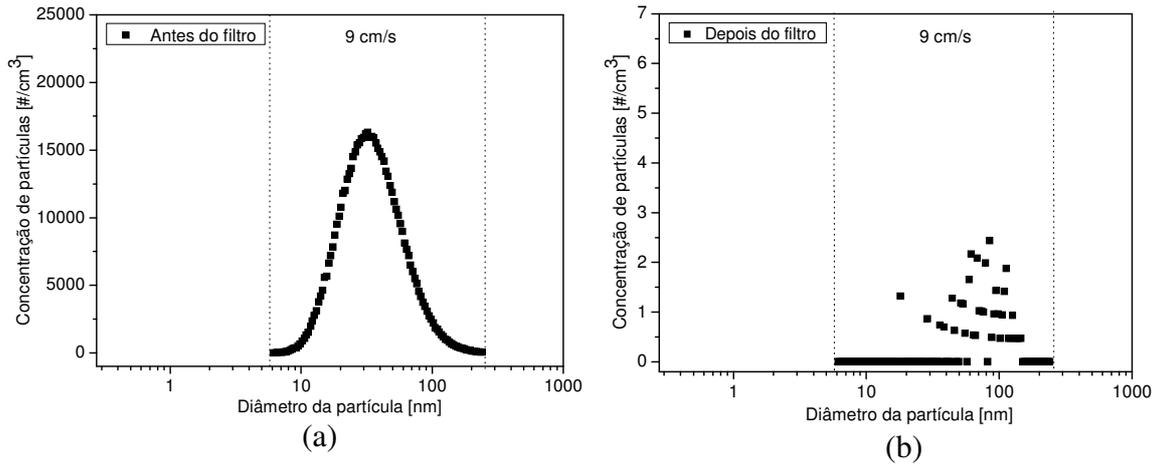


Figura C.6 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 9 cm/s .

C.3 – Filtro de microfibras de quartzo

As Figuras C.7 a C.10 ilustram, para todas as velocidades estudadas, as curvas de distribuição de partículas para cada diâmetro antes e após a passagem do aerossol pelo filtro de microfibras de quartzo.

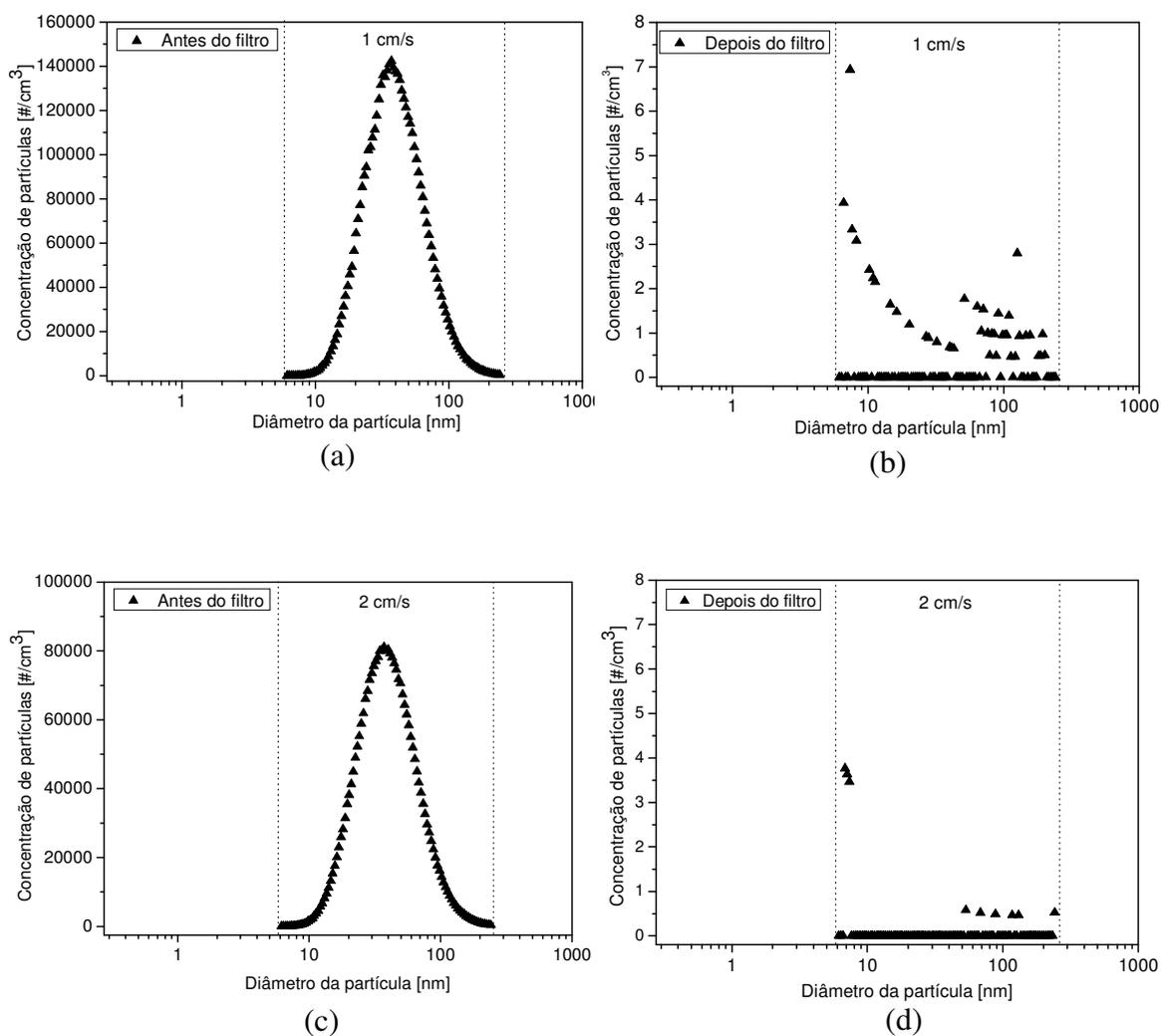


Figura C.7 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 1 cm/s; (c) e (d) 2 cm/s.

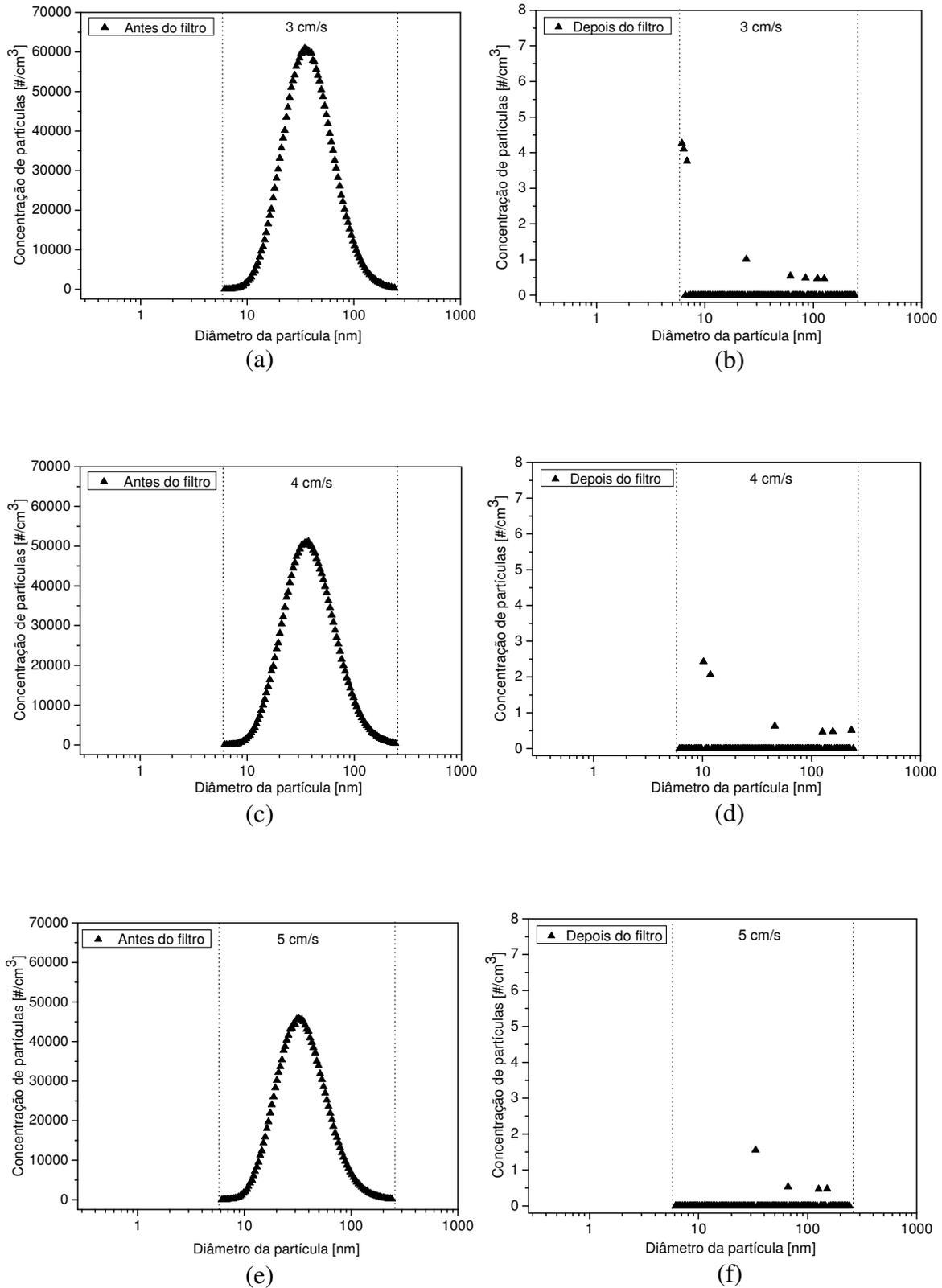


Figura C.8 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 3 cm/s; (c) e (d) 4 cm/s; (e) e (f) 5 cm/s.

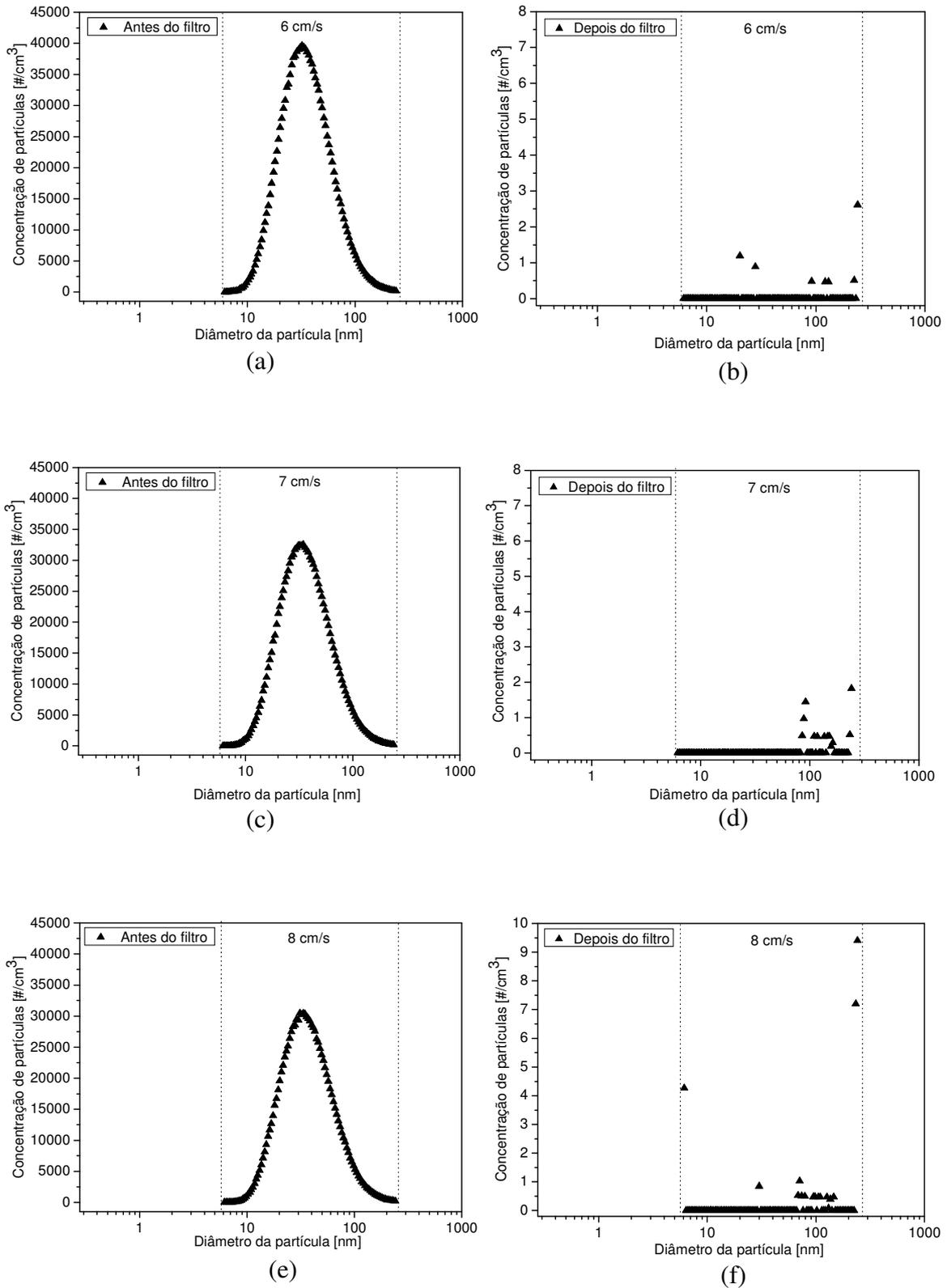


Figura C.9 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 6 cm/s; (c) e (d) 7 cm/s; (e) e (f) 8 cm/s.

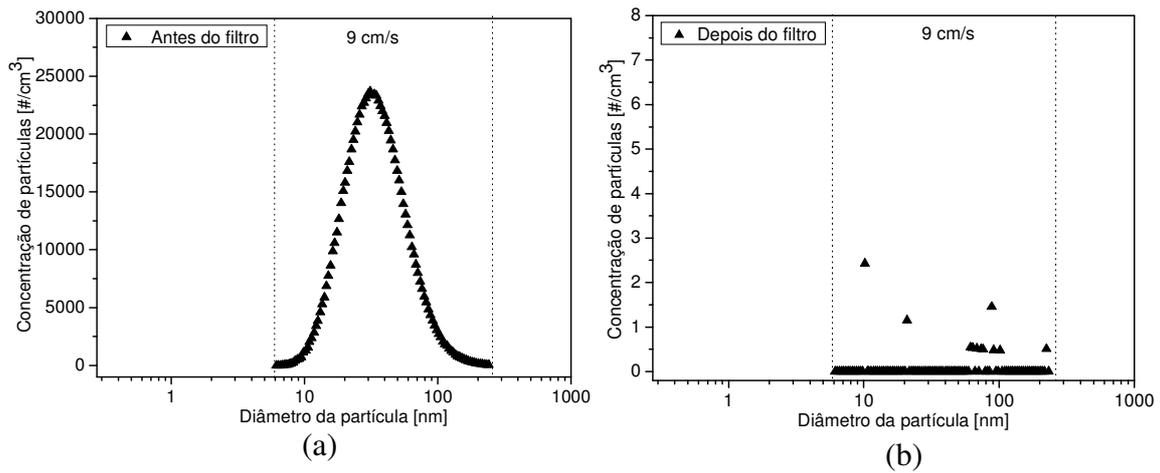


Figura C.10 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 9 cm/s .

C.3 – Membranas

As Figuras C.11 a C.13 ilustram, para todas as velocidades estudadas, as curvas de distribuição de partículas para cada diâmetro antes e após a passagem do aerossol pelas membranas.

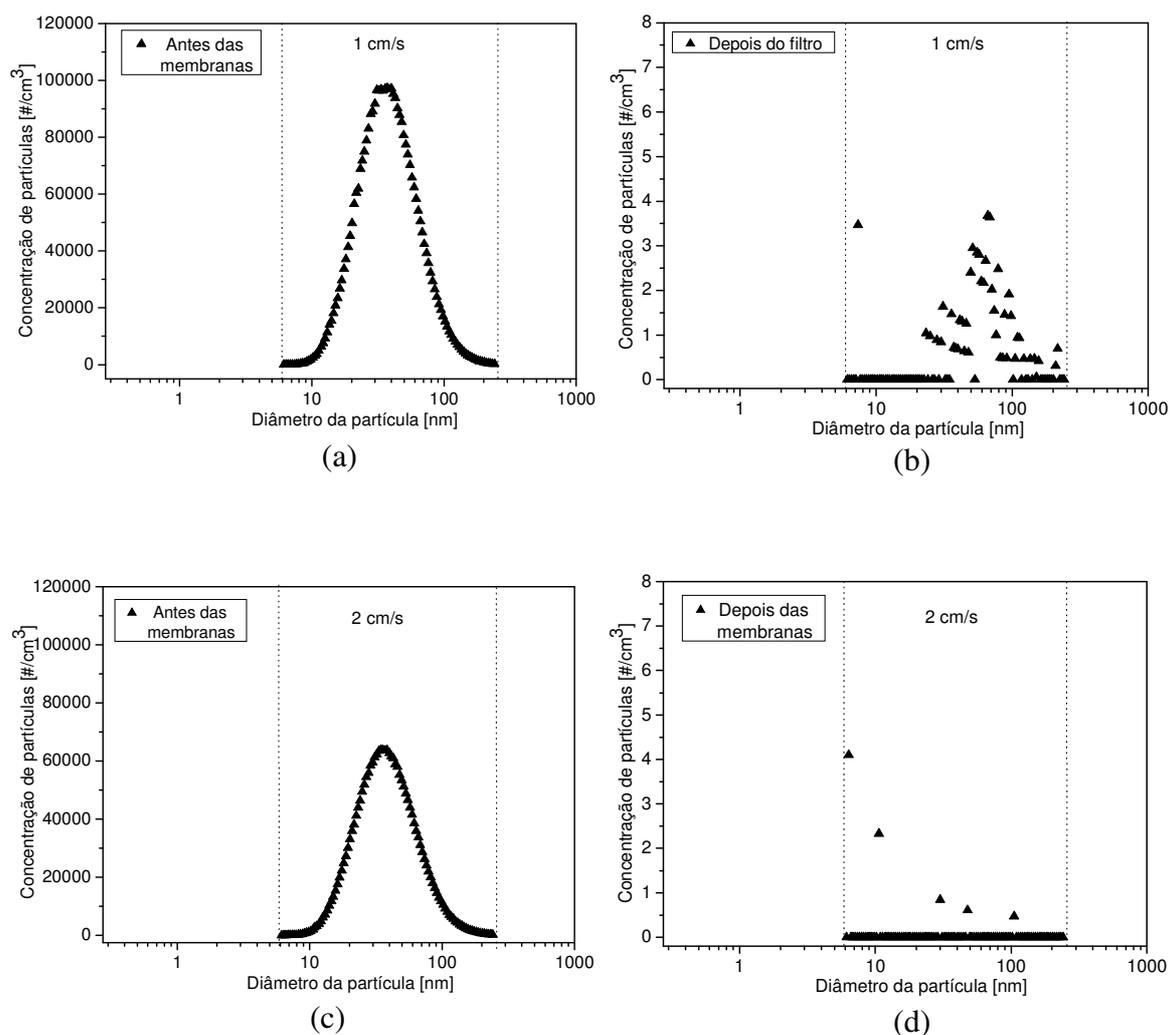


Figura C.11 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 1 cm/s; (c) e (d) 2 cm/s.

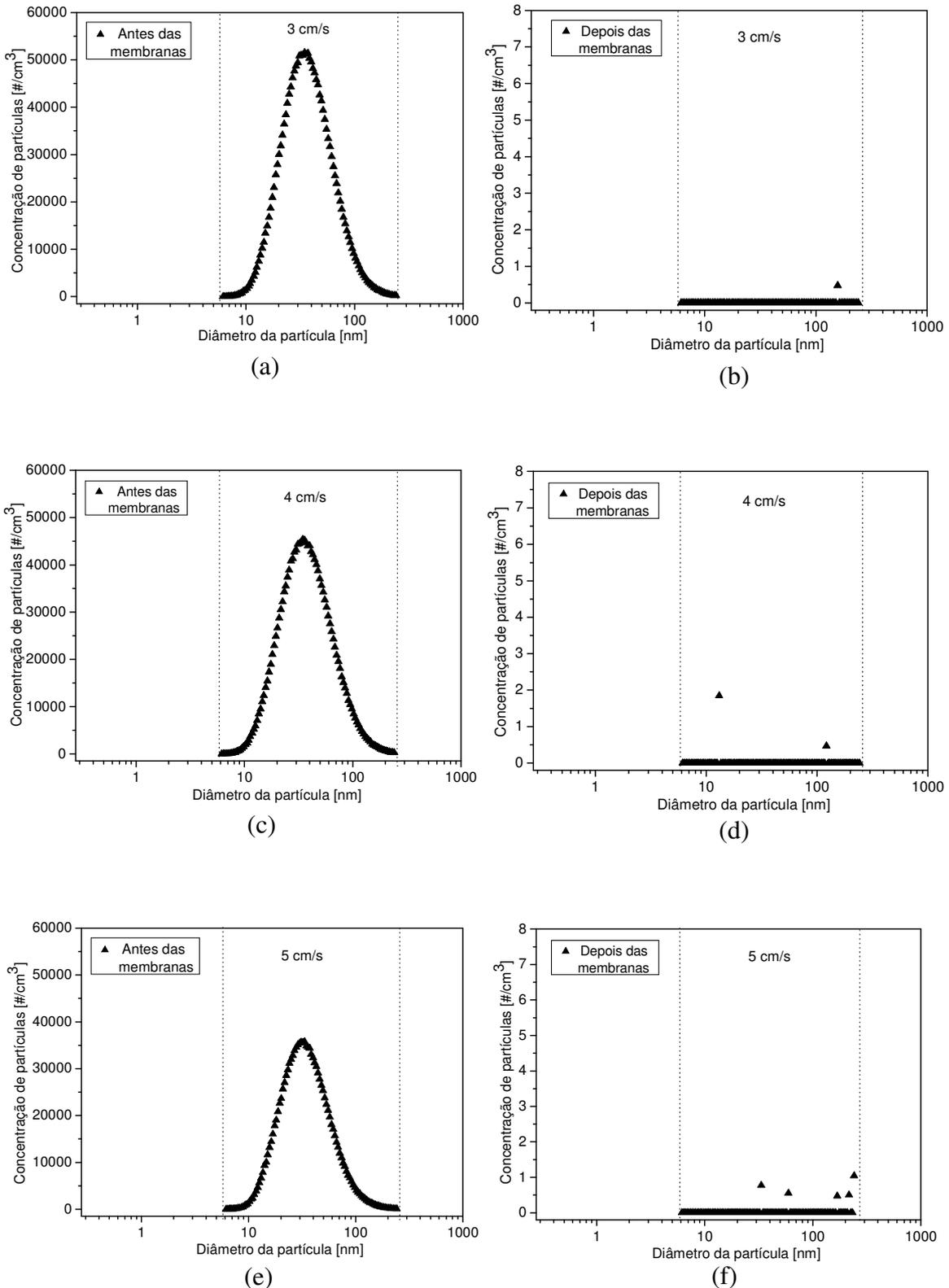


Figura C.12 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 3 cm/s; (c) e (d) 4 cm/s; (e) e (f) 5 cm/s.

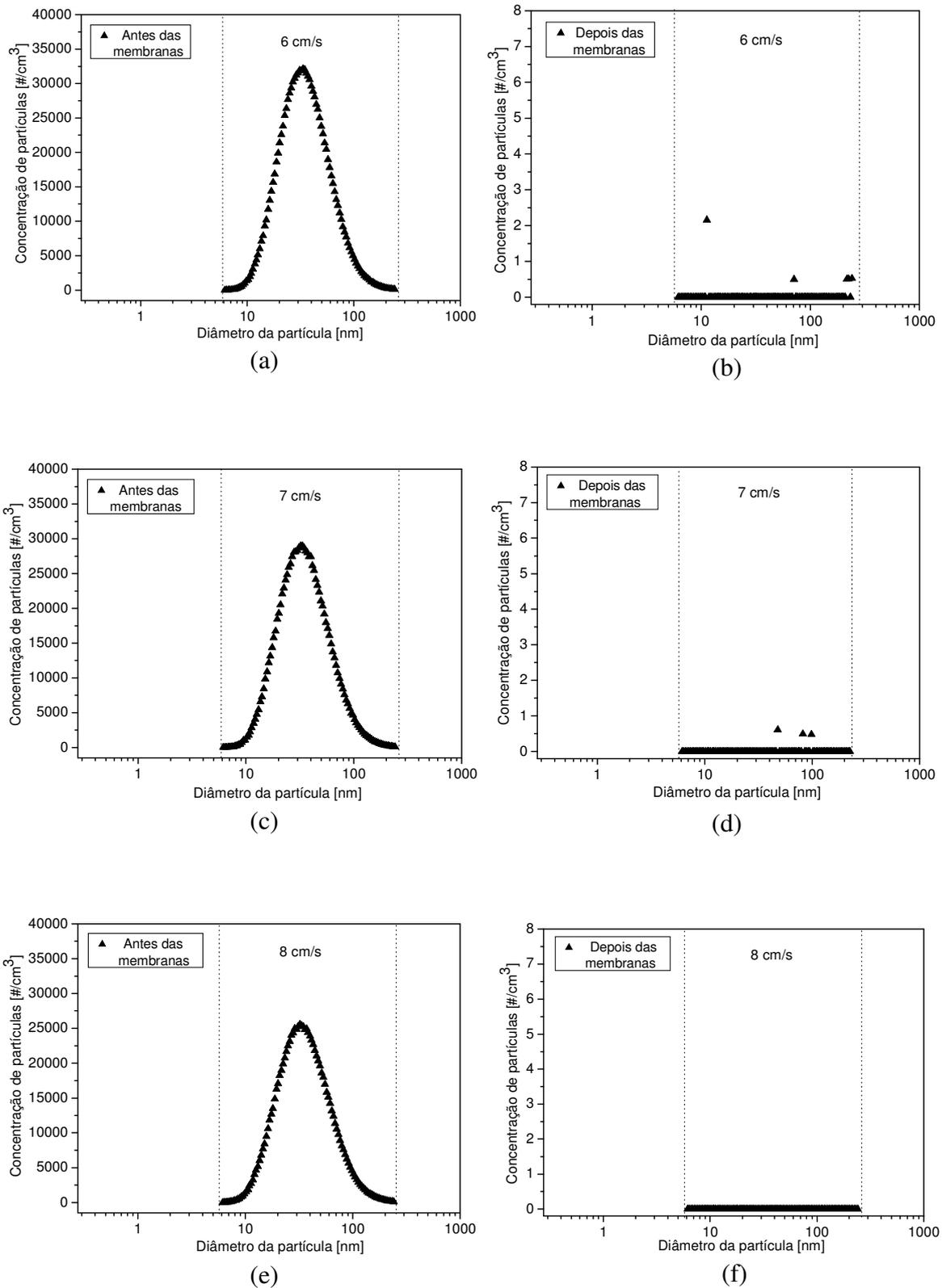


Figura C.13 – Concentração de partículas por diâmetro para as velocidades de filtração: (a) e (b) 6 cm/s; (c) e (d) 7 cm/s; (e) e (f) 8 cm/s.