

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

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM PRECIPITADOR**  
**ELETROSTÁTICO OPERANDO NA CAPTURA DE PARTÍCULAS**  
**SUBMICROMÉTRICAS E NANOMÉTRICAS**

Maria Carolina Ribeiro Falaguasta

São Carlos - SP  
Maio – 2005

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

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM PRECIPITADOR  
ELETROSTÁTICO OPERANDO NA CAPTURA DE PARTÍCULAS  
SUBMICROMÉTRICAS E NANOMÉTRICAS**

Maria Carolina Ribeiro Falaguasta

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Renato Coury

São Carlos – SP  
Maio – 2005

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

F177ed

Falaguasta, Maria Carolina Ribeiro.

Estudo do desempenho de um precipitador eletrostático operando na captura de partículas submicrométricas e nanométricas / Maria Carolina Ribeiro Falaguasta. -- São Carlos : UFSCar, 2005.

305 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2005.

1. Aerossois. 2. Ar - poluição. 3. Limpeza de gases. 4. Precipitador eletrostático. 5. PM2,5. Nanopartículas.I. Título.

CDD: 660.294515 (20<sup>a</sup>)

Ao Neto,  
com todo meu amor

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Zezão por sempre ter me incentivado e acreditado neste trabalho, bem como por todo o apoio pessoal recebido durante estes anos.

À Juliana, por ter dividido os momentos de angústia, quando o equipamento insistia em não funcionar, assim como os de realização, quando conseguimos coletar os dados.

Aos meus pais, irmãs, à minha avó e ao meu namorado que me acolheram nos períodos difíceis e sempre torceram pela realização e conclusão deste estudo. Fico extremamente feliz por estarem sempre ao meu lado.

Agradeço a todos, que não foram poucos, que participaram direta ou indiretamente deste trabalho, de forma tão solícita, sempre prontos a colaborar. Zé Antônio, Mônica, Gubulin, Tininho, Dilson, Everaldo, Lúcia, Oscar, Valter, Dorival, Alcione, Lu, Espanhol, Tomazi, Rodrigo, Sidney, Conrado, Helena, Militão, Emerson, Eliezer, Bota, Marcelo, Paulo, Luciene, Virgílio, Valter Mariano, Fernando, Andreia, Yves, Goro, Bressiani, Ademir, Karina, Edmundo, Lissandra, Marquinho, Gisele, Felicetti, Érica, Wânia, Ana Paula, Ricardo, Simone, Vádila, Marina, Milena, Edinalda, Selêude, Normanda, Guto, Sandro, Juan, Ana Cláudia, Benê, Sânia, Biguá, Giancarlo, Rosilene, Roger, Fabiana, Olímpio, Bete, Leandro, Paula, Karina, Camila, Janete, Douglas, D. Maria, Sr. Antônio, a todos vocês o meu mais sincero obrigada.

À Alcoa Alumínio S.A. por doar o material polidisperso para realização deste estudo.

Ao CNPq e à FAPESP pelo apoio financeiro e ao DEQ, UFSCar, pelo apoio e pelas instalações.

## RESUMO

A remoção de partículas submicrométricas de correntes gasosas tem-se constituído numa operação cada vez mais importante, tanto em aplicações industriais (nanotecnologia) quanto ocupacionais (inalação de material particulado). Dentre os equipamentos comumente empregados para a remoção de material particulado da corrente gasosa, o precipitador eletrostático é o que se apresenta mais apto a remover partículas de tal tamanho com alta eficiência. Desse modo, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a influência dos parâmetros de operação e de projeto na eficiência de remoção de um precipitador eletrostático do tipo placa-fio, operando na remoção de partículas sub e nanométricas. O precipitador foi construído em acrílico e possui placas coletoras de cobre e eletrodos de descarga de aço inox. O estudo foi dividido em duas etapas: a primeira estudou a coleta de  $PM_{2,5}$  (material inalável de alto risco), utilizando alumina, com diâmetro mediano de  $0,6 \mu m$  e diâmetro máximo de  $2,5 \mu m$ , enquanto a etapa 2 focou a faixa nanométrica, utilizando partículas de cloreto de sódio, com diâmetros entre  $8$  e  $100 nm$ . Na etapa 1, os parâmetros de projeto analisados foram comprimento do duto ( $L_{ne}$ ), diâmetro dos eletrodos de descarga ( $2r$ ) e espaçamento entre os mesmos ( $2c$ ) e as variáveis de operação foram o campo elétrico ( $E$ ) e a velocidade de escoamento do ar ( $v$ ). Cada variável foi avaliada em dois níveis, cujos valores foram  $L_{ne} = 15$  e  $30 cm$ ;  $2r = 0,045$  e  $0,025 cm$ ;  $2c = 4$  e  $2 cm$ ;  $E = 5$  e  $8 kV/cm$  e, finalmente,  $v = 0,5$  e  $1,0 m/s$ . O desempenho do processo foi avaliado através da análise da eficiência global de remoção do material particulado, obtida através de amostragem isocinética. Na etapa 2, os parâmetros de projeto analisados foram  $L$ , relação  $s/2c$  e distância entre as placas de coleta ( $2s$ ) e as variáveis de operação foram  $v$  e densidade de corrente ( $j$ ). Cada variável de operação foi avaliada em três níveis, cujos valores são  $v = 0,125$ ,  $0,25$  e  $0,50 m/s$  e  $j_{ne} = 1,8$ ,  $2,8$  e  $3,8 mA/m^2$ . Já os parâmetros de projeto foram estudados em dois níveis,  $L_{ne} = 15$  e  $30 cm$  e  $2s = 0,04$  e  $0,06 m$ . O desempenho do processo foi avaliado através da análise da eficiência de remoção do material particulado, obtida através da contagem de partículas. Observou-se que o precipitador possui grande capacidade de coletar partículas até mesmo na faixa nanométrica, obtendo eficiências para alguns casos maiores que 99%, dependendo da configuração utilizada. Como esperado, o aumento da velocidade do gás, bem como a diminuição do comprimento das placas coletoras e da corrente gerada, causaram uma diminuição da eficiência. Em contrapartida, o maior espaçamento entre as placas acarretou um incremento na eficiência, fenômeno também observado por alguns outros pesquisadores para partículas maiores. A relação  $s/2c$  não apresentou uma tendência clara na remoção do material particulado. Quando avaliados os modelos presentes na literatura, aquele que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o modelo clássico de Deutsch, quando utilizado o coeficiente de arraste dado por uma versão modificada da equação de Li e Wang (2003a e b).

Palavras-chave: Precipitador eletrostático,  $PM_{2,5}$ , nanopartículas, eficiência de remoção.

## ABSTRACT

The removal of submicron particles from gaseous streams is becoming an increasingly important operation, both in industrial (nanotechnology) as well as in occupational (inhalation of particulate matter) applications. Among the equipments commonly employed for the removal of particulates of the gaseous stream, the electrostatic precipitator, ESP, is the one capable of removing particles of such size with high efficiency. Furthermore, it has other advantages as the low pressure drop and the flexibility of working at higher temperatures. Therefore, the objective of this research was to evaluate the influence of operational and design parameters in the efficiency of particle removal of a plate-wire ESP operating in the removal of submicron particles. The precipitator was built in acrylic, with copper plates as collecting electrodes and stainless steel wires as discharge electrodes. The study was divided in two stages: the first studied the collection of PM<sub>2.5</sub> (high risk particle matter), using alumina, with median diameter of 0.6  $\mu\text{m}$  and maximum diameter of 2.5  $\mu\text{m}$  as test powder, while the stage 2 focused the nanometric range, utilizing particles of sodium chloride, with diameters between 8 and 100 nm. In stage 1, the project parameters analyzed were duct length (L), diameter of the discharge electrodes (2r) and spacing between them (2c); the operational variables were the electric field (E) and the air velocity (v). Each variable was evaluated in two levels, whose values were  $L_{ne} = 15$  and 30 cm;  $2r = 0.045$  and 0.025 cm;  $2c = 4$  and 2 cm;  $E = 5$  and 8 kV/cm and, finally,  $v = 0.5$  and 1.0 m/s. The process performance was evaluated through the analysis of the global efficiency of removal of the particulate matter, obtained through isokinetic sampling. In stage 2, the project parameter analyzed were the duct length ( $L_{ne}$ ), the ratio  $s/2c$  and the distance between the collection plates (2s) and the operational variables were the air velocity (v) and current density (j). Each operation variable was evaluated in three levels, whose values were  $v = 0.125$ , 0.25 and 0.50 m/s and  $j = 1.8$ , 2.8 and 3.8 mA/m<sup>2</sup>. The project parameters were studied in two levels,  $L_{ne} = 15$  and 30 cm and  $2s = 0.04$  and 0.06 m. The process performance was evaluated through the analysis of the removal efficiency of the particulates obtained by particle counting, with the use of the Condensation Particle Counter 3007, from TSI. It was observed that the precipitator possesses high collection efficiency, even in the nanometric size range, were efficiencies larger than 99% were obtained, depending on the used configuration. As expected, the increase in air velocity, as well as the decrease of the collecting plate length and of the generated current caused a decrease in the efficiency. Conversely, larger spacing between plates resulted in an increment in the efficiency, phenomenon also observed by some other researchers for larger particles. The ratio  $s/2c$  did not show a clear tendency in particle removal. When compared to models from the literature, the one that offered the better adjustment to the experimental data was the classic Deutsch model when used with a drag coefficient given by a modified version of the Li and Wang (2003a e b) equation.

*Keywords:* Electrostatic precipitator, PM<sub>2.5</sub>, nanoparticles, collection efficiency.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XXI
NOTAÇÃO.....	XXIII
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1 MATERIAL PARTICULADO.....	6
2.1.1 Material particulado de alto risco ( $PM_{2,5}$ ).....	6
2.1.2 Definição de Nanopartículas .....	9
2.1.3 Aplicações das Partículas Ultrafinas .....	11
2.1.4 Efeitos Nocivos.....	13
2.1.5 Remoção das Partículas da Corrente Gasosa.....	19
2.1.6 Avaliação da Continuidade do Meio .....	22
2.1.7 Correção para escoamento em meio não contínuo .....	24
2.2 PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO.....	28
2.2.1 Processo de Precipitação das Partículas .....	29
2.2.2 Tipos de Precipitadores Eletrostáticos .....	29
2.2.3 Ionização do Gás .....	32
2.2.3.1 Variáveis Elétricas de Operação .....	35
2.2.4 Carregamento Elétrico das Partículas .....	41
2.2.5 Coleta das Partículas.....	48
2.2.5.1 Velocidade de migração das partículas.....	48
2.2.5.2 Modelos para a determinação da eficiência de remoção das partículas .....	49
2.2.5.3 Outros fatores que influenciam a remoção das partículas .....	54
2.3 LINHA DE PESQUISA EM PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA DA UFSCAR.....	55
2.4 REMOÇÃO DE PARTÍCULAS FINAS PELO PRECIPITADOR.....	56
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>63</b>
3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL .....	63
3.1.1 Equipamentos empregados nas duas etapas do trabalho.....	63
3.1.1.1 Precipitador eletrostático .....	63
3.1.1.2 Fonte de alta tensão .....	70
3.1.1.3 Medidor de velocidade .....	71
3.1.1.4 Medidor de temperatura.....	71
3.1.1.5 Medidor de umidade .....	72
3.2 ETAPA 1: DESEMPENHO DO PRECIPITADOR OPERANDO NA REMOÇÃO DE PARTÍCULAS FINAS ( $PM_{2,5}$ ).....	72
3.2.1 Unidade experimental.....	72
3.2.1.1 Unidade experimental para remoção de partículas finas .....	72



3.2.1.2	Alimentador de material particulado .....	75
3.2.1.3	Soprador.....	76
3.2.1.4	Configuração final do equipamento.....	76
3.2.2	<i>Material Utilizado</i> .....	78
3.2.3	<i>Procedimento Experimental</i> .....	79
3.2.3.1	Determinação das curvas corrente-tensão para o precipitador .....	79
3.2.3.2	Calibração do alimentador de partículas do prato rotativo .....	80
3.2.3.3	Determinação da eficiência do precipitador eletrostático.....	81
3.2.4	<i>Condições de Operação</i> .....	82
<b>3.3</b>	<b>ETAPA 2: DESEMPENHO DO PRECIPITADOR OPERANDO NA REMOÇÃO DE</b>	
	<b>NANOPARTÍCULAS</b> .....	<b>83</b>
3.3.1	<i>Unidade experimental</i> .....	83
3.3.1.1	Gerador de partículas .....	85
3.3.1.2	Contador de Partículas .....	88
3.3.1.3	Gases .....	89
3.3.2	<i>Material Utilizado</i> .....	92
3.3.3	<i>Determinação do diâmetro das partículas geradas</i> .....	95
3.3.4	<i>Procedimento Experimental</i> .....	96
3.3.4.1	Determinação das curvas de corrente-tensão para o gerador.....	96
3.3.4.2	Determinação do diâmetro das partículas geradas para cada concentração de solução.....	97
3.3.4.3	Determinação da eficiência do precipitador eletrostático.....	98
3.3.5	<i>Condições de operação</i> .....	99
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>101</b>
4.1	<b>ETAPA 1: DESEMPENHO DO PRECIPITADOR NA REMOÇÃO DE PM<sub>2,5</sub></b> .....	<b>101</b>
4.1.1	<i>Determinação da curva corrente-tensão do precipitador eletrostático</i> .....	<b>101</b>
4.1.2	<i>Eficiência global de remoção para PM<sub>2,5</sub></i> .....	<b>108</b>
4.1.2.1	Observação visual do desempenho do precipitador.....	110
4.1.2.2	Eficiência global de coleta do precipitador .....	115
4.1.2.3	Avaliação do desempenho .....	130
4.1.3	<i>Comparação com os modelos</i> .....	<b>131</b>
4.2	<b>ETAPA 2: DESEMPENHO DO PRECIPITADOR NA REMOÇÃO DE NANOPARTÍCULAS</b> ...	<b>140</b>
4.2.1	<i>Calibração do Gerador de Partículas</i> .....	<b>140</b>
4.2.2	<i>Determinação da curva corrente-tensão</i> .....	<b>145</b>
4.2.3	<i>Resultados de eficiência</i> .....	<b>150</b>
4.2.3.1	Eficiência fracionária .....	170
4.2.3.2	Carga da partícula .....	172
4.2.3.3	Comparação com os modelos presentes na literatura .....	177
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	<b>183</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>186</b>
	<b>APÊNDICE A – Diferentes configurações testadas para a Unidade Experimental da Etapa 1</b> .....	<b>199</b>
	<b>APÊNDICE B – Determinação da Resistividade</b> .....	<b>205</b>
	<b>APÊNDICE C – Detalhes do gerador de partículas</b> .....	<b>212</b>

<b>APÊNDICE D – Determinação do Método de Análise.....</b>	<b>214</b>
<b>APÊNDICE E – Descrição do Microscópio Eletrônico de Transmissão .....</b>	<b>219</b>
<b>APÊNDICE F – Calibração do alimentador de material particulado do tipo prato rotativo.....</b>	<b>224</b>
<b>APÊNDICE G – Ensaio de reprodutibilidade .....</b>	<b>226</b>
<b>APÊNDICE H – Resultados experimentais .....</b>	<b>228</b>
<b>APÊNDICE I – Determinação das condições de operação do gerador .....</b>	<b>235</b>
<b>APÊNDICE J – Calibração do gerador utilizando o capilar de 25 mm de diâmetro .....</b>	<b>243</b>
<b>APÊNDICE L – Obtenção dos valores das condições elétricas de operação .....</b>	<b>262</b>
<b>APÊNDICE M – Avaliação do desempenho do gerador.....</b>	<b>270</b>
<b>APÊNDICE N – Resultados não apresentados na Etapa 2 .....</b>	<b>287</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Comparação entre as definições de material particulado (Coury et al., 2004).....	7
Figura 2.2 – Esquema do Sistema Respiratório (Handbook of Air Pollution USPHS, 1968 apud Hinds, 1982).....	15
Figura 2.3 – Esquema do processo de separação nos precipitadores eletrostáticos (Riehle, 1997).....	30
Figura 2.4 – Representação de um precipitador do tipo placa-fio (www.powerspan.com) .....	31
Figura 2.5 – Precipitador tipo placa-fio com suas principais características geométricas (Riehle, 1997). .....	32
Figura 2.6 – Princípio do efeito corona (Riehle, 1997). .....	34
Figura 2.7 – Relação típica corrente-tensão (Riehle, 1997).....	40
Figura 2.8 – Representação das dimensões características da configuração .....	40
Figura 2.9 – Representação da remoção da partícula da corrente gasosa (www.powerspancorp.com). .....	49
Figura 2.10 – Eficiência fracionária em função do diâmetro das partículas (Mizuno, 2000). .....	50
Figura 2.11 – Curva típica de eficiência para precipitador eletrostático (Parker, 2000).....	62
Figura 3.1 – Foto do precipitador.....	64
Figura 3.2 – Precipitador eletrostático a) Vista lateral e superior com cotas ( cm ) de uma das unidades utilizadas b) Corte axial .....	65
Figura 3.3 – Precipitador eletrostático sem os seus periféricos. ....	66
Figura 3.4 – Eletrodos de descarga: a) série de eletrodos no duto, b) vista do conector dos eletrodos ao cabo de alta tensão e dos fios de aterramento.....	67
Figura 3.5 – Distribuidor de gás: a) vista lateral e b) vista front al. ....	69
Figura 3.6 – Fonte de alta tensão. ....	71
Figura 3.7 – Sonda de amostragem. ....	73
Figura 3.8 –Aparato para filtração. ....	73
Figura 3.9– Suporte do filtro.....	74
Figura 3.10 – Alimentador de material particulado. ....	75
Figura 3.11 – Configuração final do equipamento. ....	77
Figura 3.12 – Distribuição granulométrica acumulada da alumina utilizada neste trabalho e obtida no SediGraph 5000 D da Micromeritics.....	78
Figura 3.13 – Vista geral da unidade experimental. ....	84
Figura 3.14 – Foto do gerador de partícula. ....	85
Figura 3.15 – Esquema de funcionamento do gerador de partículas (manual de funcionamento do gerador modelo 3480, da TSI).....	86
Figura 3.16 – Detalhe: a) Porta-amostra , b) Câmara de acrílico com o capilar e o fio de alta tensão.....	87
Figura 3.17 – Fonte de Polônio.....	88
Figura 3.18 - Foto do contador de partículas. ....	89
Figura 3.19 - Esquema de funcionamento do contador de partículas. ....	90
Figura 3.20 – Filtros para purificação de ar. ....	91

Figura 3.21 – Concentração de partículas na corrente gasosa gerada pelo compressor. ....	94
Figura 4.1 - Comparação das curvas corrente-tensão para $L_{ne} = 0,15$ m, $v = 0,5$ m/s. ....	102
Figura 4.2 – Comparação das curvas corrente-tensão para $L_{ne} = 0,30$ m, $v = 0,5$ m/s. ....	102
Figura 4.3 – Influência da umidade do ar na relação entre a corrente e a tensão aplicada para $L_{ne} = 0,15$ m, $2r_{se} = 0,45$ mm e $s/2c = 1,0$ , $v = 0,5$ m/s. ....	105
Figura 4.4 – Influência da umidade do ar na relação entre a corrente e a tensão aplicada para $L_{ne} = 0,30$ m, $2r_{se} = 0,45$ mm e $s/2c = 1,0$ , $v = 0,5$ m/s. ....	105
Figura 4.5 – Influência das partículas na relação entre a corrente e a tensão aplicada para $L_{ne} = 0,15$ m, $2r_{se} = 0,45$ mm e $s/2c = 0,5$ , $v = 0,5$ m/s. ....	107
Figura 4.6 – Influência da presença de partículas na relação entre a corrente e a tensão aplicada para $L_{ne} = 0,30$ m, $2r_{se} = 0,45$ mm e $s/2c = 0,5$ , $v = 0,5$ m/s. ....	107
Figura 4.7 - Entrada do precipitador com $L_{ne} = 0,15$ cm, com ênfase para a espessura da camada de pó coletada. ....	111
Figura 4.8 - Saída do precipitador com $L_{ne} = 0,15$ cm. ....	112
Figura 4.9 - Entrada do precipitador com $L_{ne} = 0,30$ cm, com ênfase para a espessura da camada de pó coletada. ....	113
Figura 4.10 - Saída do precipitador com $L_{ne} = 0,30$ cm. ....	114
Figura 4.11 – Comparação da eficiência global de remoção para $E_{ps} = 6$ kV/cm, $2r_{se} = 0,25$ m e $s/2c = 0,5$ . ....	116
Figura 4.12 – Comparação da eficiência global de remoção para $E_{ps} = 8$ kV/cm, $2r_{se} = 0,25$ m e $s/2c = 0,5$ . ....	117
Figura 4.13 – Comparação da eficiência global de remoção para $E_{ps} = 6$ kV/cm, $2r_{se} = 0,45$ m e $s/2c = 0,5$ . ....	117
Figura 4.14 – Comparação da eficiência global de remoção para $E_{ps} = 8$ kV/cm, $2r_{se} = 0,45$ m e $s/2c = 0,5$ . ....	117
Figura 4.15 – Comparação da eficiência global de remoção para $E_{ps} = 6$ kV/cm, $2r_{se} = 0,25$ mm e $s/2c = 1,0$ . ....	118
Figura 4.16 – Comparação da eficiência global de remoção para $E_{ps} = 6$ kV/cm, $2r_{se} = 0,45$ mm e $s/2c = 1,0$ . ....	118
Figura 4.17 – Comparação da eficiência global de remoção para $E_{ps} = 8$ kV/cm, $2r_{se} = 0,45$ mm e $s/2c = 1,0$ . ....	118
Figura 4.18– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,15$ m, $2r_{se} = 0,25$ mm e $s/2c = 0,5$ . ....	120
Figura 4.19– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,30$ m, $2r_{se} = 0,25$ mm e $s/2c = 0,5$ . ....	120
Figura 4.20 – Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,15$ m, $2r_{se} = 0,45$ mm e $s/2c = 0,5$ . ....	120
Figura 4.21– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,30$ m, $2r_{se} = 0,45$ mm e $s/2c = 0,5$ . ....	121
Figura 4.22– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,15$ m, $2r_{se} = 0,25$ mm e $s/2c = 1,0$ . ....	121
Figura 4.23– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,15$ m, $2r_{se} = 0,45$ mm e $s/2c = 1,0$ . ....	121

Figura 4.24– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,30$ m, $2r_{se} = 0,45$ mm e $s/2c = 1,0$ .	122
Figura 4.25– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,15$ m, $s/2c = 0,5$ e $E_{ps} = 6$ kV/cm.	123
Figura 4.26– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,15$ m, $s/2c = 0,5$ e $E_{ps} = 8$ kV/cm.	124
Figura 4.27– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,15$ m, $s/2c = 1,0$ e $E_{ps} = 6$ kV/cm.	124
Figura 4.28– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,15$ m, $s/2c = 1,0$ e $E_{ps} = 8$ kV/cm.	124
Figura 4.29– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,30$ m, $s/2c = 0,5$ e $E_{ps} = 6$ kV/cm.	125
Figura 4.30– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,30$ m, $s/2c = 0,5$ e $E_{ps} = 8$ kV/cm.	125
Figura 4.31– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,30$ m, $s/2c = 1,0$ e $E_{ps} = 6$ kV/cm.	125
Figura 4.32– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,15$ m, $2r_{se} = 0,25$ mm e $E_{ps} = 6$ kV/cm.	126
Figura 4.33– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,15$ m, $2r_{se} = 0,25$ mm e $E_{ps} = 8$ kV/cm.	126
Figura 4.34– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,15$ m, $2r_{se} = 0,45$ mm e $E_{ps} = 6$ kV/cm.	127
Figura 4.35– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,15$ m, $2r_{se} = 0,45$ mm e $E_{ps} = 8$ kV/cm.	127
Figura 4.36– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,30$ m, $2r_{se} = 0,25$ mm e $E_{ps} = 6$ kV/cm.	127
Figura 4.37– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,30$ m, $2r_{se} = 0,45$ mm e $E_{ps} = 6$ kV/cm.	128
Figura 4.38– Comparação da eficiência global de remoção para $L_{ne} = 0,30$ m, $2r_{se}$ $= 0,45$ mm e $E_{ps} = 8$ kV/cm.	128
Figura 4.39 – Comparação com o modelo de Deutsch para $L = 0,15$ m.	132
Figura 4.40 - Comparação com o modelo de Deutsch para $L = 0,30$ m.	132
Figura 4.41 - Comparação com o modelo de Zhibin e Guoquan para $L = 0,15$ m.	133
Figura 4.42 - Comparação com o modelo de Zhibin e Guoquan para $L = 0,30$ m.	133
Figura 4.43 - Comparação com o modelo de Nóbrega para $L = 0,15$ m.	134
Figura 4.44 - Comparação com o modelo de Nóbrega para $L = 0,30$ m.	134
Figura 4.45 - Comparação com o modelo de Deutsch para $L = 0,15$ m para o novo valor de campo elétrico.	137
Figura 4.46 - Comparação com o modelo de Deutsch para $L = 0,30$ m para o novo valor de campo elétrico.	137
Figura 4.47 - Comparação com o modelo de Zhibin e Guoquan para $L = 0,15$ m para o novo valor de campo elétrico.	138
Figura 4.48 - Comparação com o modelo de Zhibin e Guoquan para $L = 0,30$ m para o novo valor de campo elétrico.	138
Figura 4.49- Comparação com o modelo de Nóbrega para $L = 0,15$ m para o novo valor de campo elétrico.	139

Figura 4.50 - Comparação com o modelo de Nóbrega para $L = 0,30$ m para o novo valor de campo elétrico. ....	139
Figura 4.51 – Partículas obtidas com a solução salina de concentração igual a $5,0$ g/l.....	142
Figura 4.52 - Microanálise para a amostra com concentração igual a $5,0$ g/l. ....	143
Figura 4.53 - Determinação do diâmetro em função da concentração de NaCl na solução. ....	144
Figura 4.54 – Influência da umidade do ar na relação entre a corrente e a tensão aplicada para $L_{ne} = 0,15$ m, $2r_{se} = 0,45$ mm e $s/2c = 1,0$ , $v = 0,5$ m/s.....	146
Figura 4.55 – Influência da umidade do ar na relação entre a corrente e a tensão aplicada para $L_{ne} = 0,30$ m, $2s = 0,04$ m, $2r_{se} = 0,45$ mm e $s/2c = 1,0$ , $v = 0,5$ m/s. ....	147
Figura 4.56 - Comparação das curvas corrente-tensão para $L_{ne} = 0,15$ m, $2s = 0,04$ m, $v = 0,5$ m/s para $T = 27^\circ$ C e $H_r = 6\%$ . ....	147
Figura 4.57 - Comparação das curvas corrente-tensão para $L_{ne} = 0,30$ m, $2s = 0,04$ m, $v = 0,5$ m/s para $T = 27^\circ$ C e $H_r = 7\%$ . ....	148
Figura 4.58 - Comparação das curvas corrente-tensão para $L_{ne} = 0,30$ m, $2s = 0,06$ m para $T = 25^\circ$ C e $H_r = 12\%$ . ....	148
Figura 4.59 - Eficiência em função da velocidade para $L = 15$ cm, $s/2c = 0,25$ , e $d_p = 8,6$ nm. ....	152
Figura 4.60 - Eficiência em função da velocidade para $L = 15$ cm, $s/2c = 0,5$ e $d_p = 8,6$ nm. ....	153
Figura 4.61 - Eficiência em função da velocidade para $L = 15$ cm, $s/2c = 1,0$ , e $d_p = 8,6$ nm. ....	153
Figura 4.62 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30$ cm, $2s = 4$ cm, $s/2c = 0,25$ e $d_p = 8,6$ nm.....	153
Figura 4.63 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30$ cm, $2s = 4$ cm, $s/2c = 0,5$ e $d_p = 8,6$ nm.....	154
Figura 4.64 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30$ cm, $2s = 4$ cm, $s/2c = 1,0$ e $d_p = 8,6$ nm.....	154
Figura 4.65 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30$ cm, $2s = 6$ cm, $s/2c = 0,25$ e $d_p = 8,6$ nm.....	154
Figura 4.66 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30$ cm, $2s = 6$ cm, $s/2c = 0,5$ e $d_p = 8,6$ nm.....	155
Figura 4.67 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30$ cm, $2s = 6$ cm, $s/2c = 1,0$ e $d_p = 8,6$ nm.....	155
Figura 4.68 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=15$ cm, $j = 1,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	158
Figura 4.69 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=15$ cm, $j = 2,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	158
Figura 4.70 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=15$ cm, $j = 3,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	158
Figura 4.71 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30$ cm, $2s = 4$ cm, $j = 1,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	159
Figura 4.72 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30$ cm, $2s = 4$ cm, $j = 2,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	159
Figura 4.73 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30$ cm, $2s = 4$ cm, $j = 3,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	159

Figura 4.74 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30$ cm, $2s = 6$ cm, $j = 1,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	160
Figura 4.75 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30$ cm, $2s = 6$ cm, $j = 2,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	160
Figura 4.76 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30$ cm, $2s = 6$ cm, $j = 3,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	160
Figura 4.77 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,25$ , $j=1,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	161
Figura 4.78 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,25$ , $j=2,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	162
Figura 4.79 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,25$ , $j=3,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	162
Figura 4.80 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,5$ , $j=1,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	162
Figura 4.81 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,5$ , $j=2,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	163
Figura 4.82 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,5$ , $j=3,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	163
Figura 4.83 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 1,0$ , $j=1,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	163
Figura 4.84 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 1,0$ , $j=2,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	164
Figura 4.85 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 1,0$ , $j=3,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	164
Figura 4.86 - Área específica de coleta para $j=1,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	167
Figura 4.87 - Área específica de coleta para $j=2,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	167
Figura 4.88 - Área específica de coleta para $j=3,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	168
Figura 4.89 - Potência consumida por unidade de vazão para $j=1,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	169
Figura 4.90 - Potência consumida por unidade de vazão para $j=2,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	169
Figura 4.91 - Potência consumida por unidade de vazão para $j=3,8$ mA/m <sup>2</sup> e $d_p = 8,6$ nm. ....	169
Figura 4.92 - Eficiência fracionária para $L = 0,15$ m, $s/2c = 1$ e $v = 0,5$ m/s. ....	171
Figura 4.93 - Variação de $b$ com $r_a$ .....	174
Figura 4.94 - Coeficiente de combinação entre o íon e a partículas para as condições estudadas. ....	174
Figura 4.95 - Probabilidade de carregamento para a condição $L=0,15$ m, $s/2c=1,0$ e $j=3,8$ mA/m <sup>2</sup> . ....	175
Figura 4.96 - Comparação dos dados experimentais obtidos para as nanopartículas com o modelo de Deutsch. ....	177
Figura 4.97 - Comparação dos dados experimentais obtidos para as nanopartículas com o modelo de Zhibin e Guoquan. ....	177
Figura 4.98 - Comparação dos dados experimentais obtidos para as nanopartículas com o modelo de Nóbrega. ....	178
Figura 4.99 - Comparação dos dados experimentais obtidos para as nanopartículas com o modelo laminar. ....	178

Figura 4.100 - Comparação dos dados da literatura e deste estudo com o modelo de Deutsch. ....	180
Figura 4.101 - Comparação dos dados experimentais com o modelo de Deutsch, utilizando a equação de Li e Wang. ....	181
Figura 4.102 - Comparação dos dados experimentais com o modelo de Deutsch, utilizando a equação de Li e Wang modificada. ....	182
Figura A.1– Esquema da unidade experimental: a) suporte do filtro em linha e b) detalhe do suporte.....	199
Figura A.2 – Vista do corte transversal do alimentador de partículas do tipo leito fluidizado.....	200
Figura A.3 – Variação da vazão mássica com o tempo para uma certa quantidade de material particulado inserida no reservatório no tempo inicial. ....	202
Figura A.4 – Calibração do alimentador do tipo leito fluidizado. ....	203
Figura A.5 – Pontos experimentais representando a estabilidade da geração de material particulado para a velocidade de referência igual a 100. ....	204
Figura B.1– Célula para determinação da resistividade.....	206
Figura B.2 – Determinação da resistência elétrica à passagem de corrente para uma camada de cloreto de sódio. ....	206
Figura B.3– Resistência da alumina sem ter sido seca em estufa. ....	208
Figura B.4 – Resistência da alumina após 2 horas em estufa. ....	208
Figura B.5 – Resistência da alumina após 1 dia em estufa. ....	208
Figura B.6 – Resistência da alumina após 7 dias em estufa. ....	209
Figura B.7 – Resistência da alumina após 7 dias em estufa e preenchida com o emprego de um êmbolo. ....	209
Figura C.1 – Representação dos modos de operação do gerador: 1) sem escoamento de líquido, 2) modo gotejante e 3) modo jato cônico (Manual da TSI).....	212
Figura D.1 – Foto obtida com o força atômica. ....	214
Figura D.2 – Imagem de contaminantes obtida com o MEV. ....	215
Figura D.3 – Primeiras partículas observadas como emprego do MET. ....	216
Figura D.4 – Difratoograma da amostra. ....	217
Figura E.1 – Fotografia do microscópio eletrônico de transmissão (Williams e Carter 1996).....	219
Figura F.1- Calibração do alimentador do tipo prato rotativo. ....	225
Figura I.1 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 0,5 g/l.....	236
Figura I.2 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 1,0 g/l.....	237
Figura I.3 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 1,5 g/l.....	237
Figura I.4 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 2,0 g/l.....	237
Figura I.5 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 2,5 g/l.....	238
Figura I.6 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 3,0 g/l.....	238
Figura I.7 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 3,5 g/l.....	238



Figura I.8 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 4,0 g/l.....	239
Figura I.9 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 4,5 g/l.....	239
Figura I.10 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 5,0 g/l.....	239
Figura J.1 – Partículas de NaCl geradas com solução igual a 2,5 g/l e aumento igual a 13k.....	245
Figura J.2 – Partículas de NaCl geradas com solução de 2,5 g/l e aumento igual a 60k.....	245
Figura J.3 – Partículas de NaCl geradas com solução de 2,5 g/l e aumento igual a 125k.....	246
Figura J.4 – Partículas de NaCl geradas com solução de 1 g/l e aumento igual a 13k.....	246
Figura J.5 – Partículas de NaCl geradas com solução de 1 g/l e aumento igual a 60k.....	247
Figura J.6 – Partículas de NaCl geradas com solução de 1 g/l e aumento igual a 125k.....	247
Figura J.7 – Partículas de NaCl geradas com solução de 0,5 g/l e aumento igual a 60k.....	248
Figura J.8 – Partículas de NaCl geradas com solução de 0,5 g/l e aumento igual a 125k.....	248
Figura J.9 – Microanálise para a amostra com concentração igual a 2,5 g/l. ....	249
Figura J.10 – Aumento dos picos obtidos durante a microanálise da amostra com concentração igual a 2,5 g/l. ....	250
Figura J.11 – Microanálise para a amostra com concentração igual a 1,0 g/l. ....	250
Figura J.12 – Aumento dos picos obtidos durante a microanálise da amostra com concentração igual a 1,0 g/l. ....	250
Figura J.13 – Contaminação presente no porta amostra. ....	251
Figura J.14 – Partículas obtidas com a solução salina de concentração igual a 0,5 g/l.....	254
Figura J.15 – Partículas obtidas com a solução salina de concentração igual a 1,0 g/l.....	254
Figura J.16 – Partículas obtidas com a solução salina de concentração igual a 1,5 g/l.....	255
Figura J.17 - Microanálise para a amostra com concentração igual a 0,5 g/l. ....	256
Figura J.18 - Microanálise para a amostra com concentração igual a 1,0 g/l. ....	256
Figura J.19 - Microanálise para a amostra com concentração igual a 1,5 g/l. ....	256
Figura J.20 – Várias formas do cristal de cloreto de sódio (Birmingham et al. 2002).....	260
Figura L.1 – Eficiência em função da tensão aplicada, obtida com o emprego do precipitador mais largo. ....	263
Figura L.2– Equação de correlação entre os valores de corrente e tensão para o precipitador com $2s = 0,04$ m e $s/2c = 0,25$ . ....	264
Figura L.3– Equação de correlação entre os valores de corrente e tensão para o precipitador com $2s = 0,04$ m e $s/2c = 0,50$ . ....	264
Figura L.4 – Equação de correlação entre os valores de corrente e tensão para o precipitador com $2s = 0,04$ m e $s/2c = 1,0$ . ....	264

Figura L.5– Equação de correlação entre os valores de corrente e tensão para o precipitador com $2s = 0,06$ m e $s/2c = 0,25$ . .....	265
Figura L.6– Equação de correlação entre os valores de corrente e tensão para o precipitador com $2s = 0,06$ m e $s/2c = 0,50$ . .....	265
Figura L.7 – Equação de correlação entre os valores de corrente e tensão para o precipitador com $2s = 0,06$ m e $s/2c = 0,25$ . .....	265
Figura L.8– Valores de corrente e tensão para $s/2c = 0,25$ . .....	267
Figura L.9 – Valores de corrente e tensão para $s/2c = 0,50$ . .....	267
Figura L.10 – Valores de corrente e tensão para $s/2c = 1,00$ . .....	267
Figura L.11 – Calibração da fonte para $s/2c = 0,25$ . .....	268
Figura L.12 – Calibração da fonte para $s/2c = 0,50$ . .....	268
Figura L.13 – Calibração da fonte para $s/2c = 1,00$ . .....	269
Figura M.1 – Vazão de 0,1 l/min com concentração média igual a $1,06.10^4$ #/cm <sup>3</sup> .....	270
Figura M.2 – Vazão de 0,2 l/min com concentração média igual a $5,76.10^3$ #/cm <sup>3</sup> . .....	271
Figura M.3 - Efeito do acúmulo de sal para os primeiros 2 min. ....	272
Figura M.4 - Efeito do acúmulo de sal após 2 min. ....	272
Figura M.5 - Efeito do acúmulo de sal após 4 min. ....	272
Figura M.6 - Ensaio sem acúmulo (concentração igual a $1,80.10^4$ #/cm <sup>3</sup> ). ....	273
Figura M.7 - Ensaio sem acúmulo (concentração igual a $1,81.10^4$ #/cm <sup>3</sup> ). ....	273
Figura M.8 - Ensaio sem acúmulo (concentração igual a $1,81.10^4$ #/cm <sup>3</sup> ). ....	274
Figura M.9 - Concentração de sal igual 0,5 g/l e concentração de partículas igual a $1,70.10^4$ #/cm <sup>3</sup> . .....	275
Figura M.10 - Concentração de sal igual 1,0 g/l e concentração de partículas igual a $3,58.10^4$ #/cm <sup>3</sup> . .....	275
Figura M.11 - Concentração de sal igual 1,5 g/l e concentração de partículas igual a $9,17.10^4$ #/cm <sup>3</sup> . .....	275
Figura M.12 - Ensaio com a fonte antiga (concentração = $2,77.10^3$ #/cm <sup>3</sup> ). ....	276
Figura M.13 - Ensaio com a fonte nova (concentração = $3,21.10^3$ #/cm <sup>3</sup> ). ....	277
Figura M.14 - Ensaio sem o emprego da fonte (concentração = $0,433$ #/cm <sup>3</sup> ). ....	278
Figura M.15 - Concentração na entrada do precipitador igual a $1,01.10^4$ #/cm <sup>3</sup> . ....	279
Figura M.16 - Concentração na saída do precipitador igual a $2,88.10^3$ #/cm <sup>3</sup> . ....	281
Figura M.17 - Concentração na entrada do precipitador $1,94.10^3$ #/cm <sup>3</sup> . ....	281
Figura M.18 - Concentração na saída do precipitador sem a presença de tensão igual a $1,59.10^3$ #/cm <sup>3</sup> . .....	282
Figura M.19 - Concentração na entrada do precipitador limpo igual a $5,13.10^3$ #/cm <sup>3</sup> . .....	283
Figura M.20 - Concentração na saída do precipitador limpo igual a $5,60$ #/cm <sup>3</sup> . ....	283
Figura M.21 - Concentração na entrada do precipitador sujo igual a $5,06.10^3$ #/cm <sup>3</sup> . .....	284
Figura M.22 - Concentração na saída do precipitador sujo igual a $5,05$ #/cm <sup>3</sup> . ....	284
Figura M.23 - Concentração na saída do precipitador mais largo operando com $v=0,5$ m/s e $U=10,3$ kV e sem a presença do difusor igual a $135$ #/cm <sup>3</sup> . ....	285
Figura M.24 - Concentração na saída do precipitador mais largo operando com $v=0,5$ m/s e $U=10,3$ kV e com a presença do difusor igual a $22$ #/cm <sup>3</sup> . ....	285
Figura N.1 - Eficiência em função da velocidade para $L = 0,15$ m e $s/2c = 0,25$ . .....	287

Figura N.2 - Eficiência em função da velocidade para $L = 0,15 \text{ m}$ e $s/2c = 0,5$ .	287
Figura N.3 - Eficiência em função da velocidade para $L = 0,15 \text{ m}$ e $s/2c = 1,0$ .	288
Figura N.4 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30 \text{ cm}$ , $2s = 4 \text{ cm}$ e $s/2c = 0,25$ .	288
Figura N.5 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30 \text{ cm}$ , $2s = 4 \text{ cm}$ e $s/2c = 0,5$ .	288
Figura N.6 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30 \text{ cm}$ , $2s = 4 \text{ cm}$ e $s/2c = 1,0$ .	289
Figura N.7 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30 \text{ cm}$ , $2s = 6 \text{ cm}$ e $s/2c = 0,25$ .	289
Figura N.8 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30 \text{ cm}$ , $2s = 6 \text{ cm}$ e $s/2c = 0,5$ .	289
Figura N.9 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30 \text{ cm}$ , $2s = 6 \text{ cm}$ e $s/2c = 1,0$ .	290
Figura N.10 - Eficiência em função da velocidade para $L = 15 \text{ cm}$ e $s/2c = 0,25$ .	290
Figura N.11 - Eficiência em função da velocidade para $L = 15 \text{ cm}$ e $s/2c = 0,5$ .	290
Figura N.12 - Eficiência em função da velocidade para $L = 15 \text{ cm}$ e $s/2c = 1,0$ .	291
Figura N.13 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30 \text{ cm}$ , $2s = 4 \text{ cm}$ e $s/2c = 0,25$ .	291
Figura N.14 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30 \text{ cm}$ , $2s = 4 \text{ cm}$ e $s/2c = 0,5$ .	291
Figura N.15 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30 \text{ cm}$ , $2s = 4 \text{ cm}$ e $s/2c = 1,0$ .	292
Figura N.16 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30 \text{ cm}$ , $2s = 6 \text{ cm}$ e $s/2c = 0,25$ .	292
Figura N.17 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30 \text{ cm}$ , $2s = 6 \text{ cm}$ e $s/2c = 0,5$ .	292
Figura N.18 - Eficiência em função da velocidade para $L = 30 \text{ cm}$ , $2s = 6 \text{ cm}$ e $s/2c = 1,0$ .	293
Figura N.19 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=15 \text{ cm}$ e $j = 1,8 \text{ mA/m}^2$ .	293
Figura N.20 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=15 \text{ cm}$ e $j = 2,8 \text{ mA/m}^2$ .	294
Figura N.21 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=15 \text{ cm}$ e $j = 3,8 \text{ mA/m}^2$ .	294
Figura N.22 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30 \text{ cm}$ , $2s = 4 \text{ cm}$ e $j = 1,8 \text{ mA/m}^2$ .	294
Figura N.23 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30 \text{ cm}$ , $2s = 4 \text{ cm}$ e $j = 2,8 \text{ mA/m}^2$ .	295
Figura N.24 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30 \text{ cm}$ , $2s = 4 \text{ cm}$ e $j = 3,8 \text{ mA/m}^2$ .	295
Figura N.25 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30 \text{ cm}$ , $2s = 6 \text{ cm}$ e $j = 1,8 \text{ mA/m}^2$ .	295
Figura N.26 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30 \text{ cm}$ , $2s = 6 \text{ cm}$ e $j = 2,8 \text{ mA/m}^2$ .	296
Figura N.27 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30 \text{ cm}$ , $2s = 6 \text{ cm}$ e $j = 3,8 \text{ mA/m}^2$ .	296

Figura N.28 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=15$ cm e $j = 1,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	296
Figura N.29 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=15$ cm e $j = 2,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	297
Figura N.30 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=15$ cm e $j = 3,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	297
Figura N.31 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30$ cm, $2s = 4$ cm e $j = 1,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	297
Figura N.32 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30$ cm, $2s = 4$ cm e $j = 2,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	298
Figura N.33 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30$ cm, $2s = 4$ cm e $j = 3,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	298
Figura N.34 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30$ cm, $2s = 6$ cm e $j = 1,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	298
Figura N.35 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30$ cm, $2s = 6$ cm e $j = 2,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	299
Figura N.36 - Eficiência em função da relação $s/2c$ para $L=30$ cm, $2s = 6$ cm e $j = 3,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	299
Figura N.37 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,25$ e $j=1,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	300
Figura N.38 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,25$ e $j=2,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	300
Figura N.39 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,25$ e $j=3,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	300
Figura N.40 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,5$ e $j=1,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	301
Figura N.41 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,5$ e $j=2,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	301
Figura N.42 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,5$ e $j=3,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	301
Figura N.43 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 1,0$ e $j=1,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	302
Figura N.44 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 1,0$ e $j=2,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	302
Figura N.45 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 1,0$ e $j=3,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	302
Figura N.46 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,25$ e $j=1,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	303
Figura N.47 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,25$ e $j=2,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	303
Figura N.48 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,25$ e $j=3,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	303
Figura N.49 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,5$ e $j=1,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	304
Figura N.50 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,5$ e $j=2,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	304
Figura N.51 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 0,5$ e $j=3,8$ mA/m <sup>2</sup> .....	304

Figura N.52 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 1,0$ e $j=1,8 \text{ mA/m}^2$ .....	305
Figura N.53 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 1,0$ e $j=2,8 \text{ mA/m}^2$ .....	305
Figura N.54 - Comparação para os diferentes precipitadores para $s/2c = 1,0$ e $j=3,8 \text{ mA/m}^2$ .....	305

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dimensões do precipitador eletrostático. ....	70
Tabela 3.2 – Constantes da alumina. ....	79
Tabela 3.3 – Constantes do cloreto de sódio. ....	92
Tabela 3.4 - Características da água utilizada. ....	93
Tabela 4.1– Valores da corrente elétrica em mA no início de cada ensaio para $L_{ne}$ = 0,15 cm, sendo $v_1=1,0$ m/s e $v_2=1,5$ m/s. ....	109
Tabela 4.2 – Valores da corrente elétrica em mA no início de cada ensaio para $L_{ne}$ = 0,30 cm, sendo $v_1=1,0$ m/s e $v_2=1,5$ m/s. ....	110
Tabela 4.3– Valores do campo elétrico médio em kV/cm. ....	136
Tabela 4.4 – Diâmetro das partículas para diferentes concentrações seus referentes números de Knudsen. ....	145
Tabela 4.5 – Campo elétrico para os precipitadores com $2s=0,04$ e $0,06$ m. ....	166
Tabela 4.6 – $E_{médio}$ em kV/cm para $L=0,15$ m e $s/2c = 1,0$ e diferentes valores de densidade de corrente. ....	176
Tabela B.1 – Resistividade da alumina. ....	210
Tabela F.1– Períodos de rotação do prato rotativo. ....	225
Tabela G.1– Ensaio de reprodutibilidade para a alumina. ....	226
Tabela G.2– Ensaio de reprodutibilidade para o cloreto de sódio. ....	227
Tabela H.1– Valores da eficiência global para $L_{ne} = 0,15$ cm, sendo $v_1=1,0$ m/s e $v_2=1,5$ m/s. ....	228
Tabela H.2– Valores da eficiência global para $L_{ne} = 0,30$ cm, sendo $v_1=1,0$ m/s e $v_2=1,5$ m/s. ....	228
Tabela H.3 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com $L=0,15$ m e concentração de sal = $0,5$ g/l. ....	229
Tabela H.4 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com $L=0,30$ m, $2s=0,04$ m e concentração de sal = $0,5$ g/l. ....	229
Tabela H.5 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com $L=0,30$ m, $2s=0,06$ m e concentração de sal = $0,5$ g/l. ....	230
Tabela H.6 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com $L=0,15$ m e concentração de sal = $1,5$ g/l. ....	231
Tabela H.7 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com $L=0,30$ m, $2s=0,04$ m e concentração de sal = $1,5$ g/l. ....	231
Tabela H.8 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com $L=0,30$ m, $2s=0,06$ m e concentração de sal = $1,5$ g/l. ....	232
Tabela H.9 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com $L=0,15$ m e concentração de sal = $2,5$ g/l. ....	232
Tabela H.10 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com $L=0,30$ m, $2s=0,04$ m e concentração de sal = $2,5$ g/l. ....	233
Tabela H.11 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com $L=0,30$ m, $2s=0,06$ m e concentração de sal = $2,5$ g/l. ....	234
Tabela H.12 - Eficiência, concentração de entrada e saída para o precipitador com $L=0,15$ m, $s/2c = 1,0$ e $v = 0,5$ m/s. ....	234
Tabela I.1 - Condutividade das soluções de diversas concentrações de NaCl. ....	236
Tabela I.2 – Tensões aplicadas para as diversas concentrações de NaCl. ....	242

Tabela L.1 – Valores de corrente elétrica em mA para os precipitadores com 0,15 e 0,30 m de comprimento. ....	263
Tabela L.2 – Valores de tensão em kV correspondentes as correntes mencionadas para os precipitadores maiores e com largura de 0,04 e 0,06 m. ....	266
Tabela L.3 – Valores de tensão em kV correspondentes às correntes mencionadas para o precipitador com comprimento igual a 0,15 m. ....	269
Tabela M.1 – Concentração de partículas antes e depois do precipitador determinadas com o contador Hiac/Royco. ....	280

## NOTAÇÃO

$A_{ne}$	-	área de coleta do precipitador [ $L^2$ ]
$b_i$	-	mobilidade elétrica dos íons [ $t I M^{-1}$ ]
$b_{min}$	-	trajetória mínima que evita a captura do íon pela partícula [L]
$c_i$	-	velocidade térmica do íon [ $L t^{-1}$ ]
$D$	-	coeficiente de difusão do íon [ $L^2 t^{-1}$ ]
$D_{ae}$	-	diâmetro aerodinâmico da partícula [L]
$D_b$	-	difusividade Browniana [ $L^2 t^{-1}$ ]
$De$	-	número de Deutsch [-]
$d_p$	-	diâmetro da partícula [L]
$D_{pi}$	-	difusividade da partícula [ $L^2 t^{-1}$ ]
$D_t$	-	difusividade turbulenta [ $L^2 t^{-1}$ ]
$E$	-	campo elétrico [ $M L I^{-1} t^{-3}$ ]
$e$	-	carga elementar [I t]
$E_f$	-	campo elétrico devido a tensão aplicada e a carga espacial [ $M L I^{-1} t^{-3}$ ]
$E_{ps}$	-	campo pseudo-homogêneo [ $M L I^{-1} t^{-3}$ ]
$E_x$	-	campo elétrico na direção x [ $M L I^{-1} t^{-3}$ ]
$E_y$	-	campo elétrico na direção y [ $M L I^{-1} t^{-3}$ ]
$f_f$	-	fator de atrito [-]
$\dot{F}$	-	vazão mássica de material particulado [ $M t^{-1}$ ]
$F_s$	-	fator de escorregamento de Cunningham [-]
$F_w$	-	força de arraste [ $M L t^{-2}$ ]
$i$	-	corrente elétrica [I]
$j$	-	densidade de corrente [ $I L^{-2}$ ]
$k$	-	constante de Boltzmann [ $M t^{-2} T^{-1}$ ]
$k_d$	-	coeficiente de arraste [ $M t^{-1}$ ]
$Kn$	-	número de Knudsen [-]
$L_{ne}$	-	comprimento do equipamento [L]
$M$	-	massa molar do íon [M]
$\bar{M}$	-	massa molar da partícula [M]
$m_{ar}$	-	massa molar do ar [M]
$m_e$	-	massa do filtro no início do experimento [M]
$m_g$	-	massa do gás [M]
$m_p$	-	massa partícula [M]
$m_s$	-	massa no filtro final do experimento [M]
$N$	-	concentração de íons [ $M L^3$ ]
$n_0$	-	concentração das partículas neutras [ $M L^3$ ]



$N_a$	número de Avogadro [-]
$n_p$	concentração das partículas carregadas [ $M L^3$ ]
$n_T$	concentração total de partículas [ $M L^3$ ]
$P$	Pressão [ $M L^{-1} t^{-2}$ ]
$Pe$	número de Peclet [-]
$q^*$	carga de saturação para o carregamento por difusão [I t]
$q_{pd}$	carga da partícula adquirida por carregamento por difusão [I t]
$q_{pf}$	carga da partícula adquirida por carregamento por campo [I t]
$q_s$	carga de saturação para o carregamento por campo [I t]
$r$	distância entre o íon e o centro da partícula [L]
$r_a$	representa a órbita crítica do íon para ser capturado ou não pela partícula (raio apsoidal) [L]
$r_p$	raio da partícula [L]
$2r_{se}$	diâmetro do eletrodo de descarga [L]
$Re$	número de Reynolds [-]
$2s$	largura entre as placas de coleta [L]
$s$	distância entre o eletrodo de descarga e o de coleta [L]
$s/2c$	relação distância da placa de coleta ao fio à distância entre os fios [-]
$T$	temperatura do gás [T]
$t$	Tempo [t]
$T_m$	temperatura de fusão [T]
$V$	tensão aplicada [ $M L^2 I^{-1} t^{-3}$ ]
$V_0$	tensão na qual se inicia a corrente corona [ $M L^2 I^{-1} t^{-3}$ ]
$\dot{V}$	vazão volumétrica [ $L^3 t$ ]
$v$	velocidade de escoamento do gás [ $L t^{-1}$ ]
$V_{cr}$	tensão na qual ocorre o rompimento elétrico do gás [ $M L^2 I^{-1} t^{-3}$ ]
$V_m$	volume específico do sólido no ponto de fusão [ $L^3 mol^{-1}$ ]
$v_t$	velocidade de fricção [ $L t^{-1}$ ]
$x$	igual a razão entre $r_p$ e $r$ [-]
$w_{th}$	velocidade de migração teórica [ $L t^{-1}$ ]

#### Letras Gregas:

$\alpha$	fração de íons atingindo a partícula [-]
$\delta$	raio da esfera limitante [L]
$\Delta t$	tempo de amostragem [t]
$\epsilon$	energia característica para o potencial de Lennard-Jones 12-6 [T]
$\epsilon_0$	permissividade elétrica do vácuo [t L]
$\epsilon_r$	constante dielétrica do material [-]
$\eta_0$	coeficiente de não combinação entre o íon e a partícula [ $L^3 t^{-1}$ ]

$\eta_{d_{pi}}$ -	eficiência de remoção da partícula de diâmetro $d_{pi}$ [-]
$\eta_p$ -	coeficiente de combinação entre o íon e a partícula [ $L^3 t^{-1}$ ]
$\lambda$ -	caminho livre médio do gás [L]
$\lambda_i$ -	caminho livre médio do íon [L]
$\mu$ -	viscosidade do gás [ $M L^{-1} t^{-1}$ ]
$\rho$ -	resistividade elétrica do material [ $M L^3 I^{-2} t^{-3}$ ]
$\rho_p$ -	densidade da partícula [ $M L^{-3}$ ]
$\sigma$ -	diâmetro característico para o potencial de Lennard-Jones 12-6 [L]
$\tau_d$ -	constante de tempo para o carregamento por difusão [t]
$\tau_f$ -	constante de tempo para o carregamento por campo [t]
$\varphi$ -	potencial eletrostático [ $M L^2 I^{-1} t^{-3}$ ]

## 1 INTRODUÇÃO

A poluição, resultante da modificação do meio ambiente, tornou-se uma das grandes preocupações humanas desde meados do século XX. Esta questão foi devidamente ressaltada no trabalho pioneiro de Carson, em 1962. Em seu livro, a autora aponta os grandes danos causados ao meio ambiente e, conseqüentemente, à humanidade, devido ao uso indiscriminado de várias substâncias, bem como ao menosprezo do seu efeito. Isso levou à contaminação do ar, do solo, da água e ainda, ao acúmulo de substâncias tóxicas na cadeia alimentar, causando doenças e várias alterações genéticas nos seres vivos.

Naquela data, as maiores preocupações eram os inseticidas e herbicidas. Porém, com o passar dos anos, foram sendo descobertas outras fontes de contaminação, criadas pelo homem, e até então não imaginadas, que fazem extremo mal à humanidade. Pesquisas recentes apontam que as partículas denominadas respiráveis são absorvidas pelo sistema respiratório, podendo ser a causa de inúmeras doenças no organismo humano e, até mesmo, serem responsáveis pela diminuição da expectativa de vida em algumas regiões (Donaldson et al., 1998 e Seaton et al., 1995 apud Preining, 1998).

Estas partículas têm grande impacto sobre a qualidade do ar, questão que tem sua importância cada vez mais ressaltada, em função da gigantesca proporção que alcançou a ação do homem sobre o meio ambiente.

Os problemas que tangem a água e o solo, cada vez mais contaminados, são um desafio. Contudo, é relativamente mais fácil para cada cidadão selecionar água de melhor qualidade para a ingestão humana e encontrar alimentos

produzidos sem agrotóxicos, ou com teor reduzido dos mesmos, do que separar uma porção de ar não contaminada, para respirar.

Infelizmente, algumas fontes de poluição estão intimamente relacionadas à organização da vida na sociedade moderna, e seria inconcebível para muitas pessoas abrir mão de determinadas comodidades ou fontes de renda, apesar das mesmas possuírem, como subproduto, algo nocivo à própria sociedade. Neste contexto, é imprescindível ao homem que se questione quanto aos ganhos agregados por cada atividade, frente ao aumento de doenças vinculadas à poluição. Uma vez constatada ser a atividade necessária, que esforços sejam dirigidos à minimização de seus resíduos e ao controle eficaz dos mesmos.

Assim, em função de serem os efluentes produzidos, de forma voluntária ou não, necessária ou não, pela atividade industrial, na maioria das vezes, nocivos, danosos ou custosos, o seu controle faz-se necessário (Walters e Ayres, 1996).

O controle da emissão de material particulado está inserido no conceito de desenvolvimento sustentável, definido pela World Commission on Environmental and Development (WCED) apud Turner (1995), como aquele que supre as necessidades atuais, sem comprometer as das gerações futuras. Este conceito está sendo trabalhado no sentido de que os cidadãos e empresas, sem deixar de se preocuparem com seu desenvolvimento, se conscientizem acerca do problema ambiental e se posicionem quanto à conservação dos bens naturais, levando sempre em consideração que o controle do material particulado está relacionado à qualidade de vida tanto das atuais gerações quanto das futuras.

À medida que vão tornando-se claras as correlações entre poluição atmosférica e qualidade de vida, a legislação referente à contaminação do ar

torna-se cada vez mais rigorosa. Novas regulamentações prevêm o controle das chamadas partículas respiráveis de alto risco ( $PM_{2,5}$ ), que dizem respeito a material particulado com diâmetro menor que  $2,5 \mu m$ , o que certamente levará à aceleração da tecnologia de medida de partículas ultrafinas (Alley, 1998).

As partículas nesta faixa estão sendo alvo de várias pesquisas, uma vez percebida a vasta gama de novas aplicações e aperfeiçoamentos obtidos com o seu emprego, principalmente daquelas situadas na faixa nanométrica, o que acarreta maior geração, em escala industrial, de partículas com esta distribuição granulométrica. Assim, o estudo da coleta desta faixa faz-se necessário, não só pelos danos que podem causar como por, muitas vezes, serem um produto de alto valor agregado, gerado na forma de aerossóis em muitos processos.

Em virtude da exigência e necessidade de um controle mais rigoroso sobre os padrões de coleta, o precipitador eletrostático destaca-se entre os demais equipamentos de remoção de material particulado, apresentando a grande vantagem de atingir alta eficiência de remoção para uma larga faixa granulométrica, incluindo as partículas mais finas. Além disso, segundo Parker (1997), o precipitador eletrostático, quando comparado aos demais sistemas de limpeza de gases, pode operar a temperaturas de até  $850^{\circ}C$  e oferece baixa perda de carga ao escoamento do gás.

Este equipamento está inserido nos mais modernos processos de controle de emissão propostos atualmente, que visam, quando financeiramente atrativo, o reaproveitamento da matéria-prima e a remoção do material particulado emitido, evitando ou minimizando a contaminação atmosférica. Devido as suas vantagens, ele é encontrado associado a plasmas que convertem compostos orgânicos voláteis

e gases tóxicos em compostos atóxicos, a filtros de manga para que seja obtida maior eficiência sem sobrecarregar o filtro, a reatores catalíticos e a lavadores venturi (Chang, 2003).

Considerando-se a importância do conhecimento a respeito do comportamento de partículas finas, com destaque para as nanométricas, e, mais particularmente, o que diz respeito à sua remoção de meios gasosos, o presente trabalho, inserido em uma linha de pesquisa que vem desenvolvendo estudos relacionados com a precipitação eletrostática, teve por objetivo montar um laboratório, com instrumentação necessária, que permitisse a geração e detecção de nanopartículas, bem como o domínio de uma metodologia para o estudo das mesmas. Em continuidade, o estudo visou projetar e construir um precipitador eletrostático do tipo placa-fio em estágio simples para estudar o seu comportamento em relação a esta faixa granulométrica, com o intuito de maximizar a sua eficiência de remoção para o tamanho de material particulado em questão.

O estudo foi dividido em duas etapas, na primeira, foi verificado o desempenho do precipitador eletrostático em remover, da corrente gasosa, o  $PM_{2.5}$ . Os testes foram realizados com o emprego de tensão contínua, gerando corrente corona com polaridade negativa. A performance foi avaliada através do comportamento do precipitador em relação a alguns parâmetros, sendo estes as variáveis de projeto: comprimento do equipamento ( $L_{ne}$ ), diâmetro do eletrodo de descarga ( $2r_{se}$ ) e relação entre a distância da placa de coleta ao fio e a distância entre os fios ( $s/2c$ ), além das variáveis de operação: velocidade de escoamento do

gás (v) e campo elétrico pseudo-homogêneo ( $E_{ps}$ ). A comparação foi realizada por meio da eficiência global de remoção do equipamento.

Na segunda etapa, foram realizados os mesmos testes, empregando, porém partículas monodispersas muito menores, enquadradas na faixa nanométrica. Foram avaliados os parâmetros mencionados anteriormente, à exceção do diâmetro do eletrodo e do campo pseudo-homogêneo, sendo estes últimos substituídos pela largura entre as placas de coleta (2s) e a densidade de corrente (j).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Material Particulado

#### 2.1.1 Material particulado de alto risco (PM<sub>2,5</sub>)

A poluição atmosférica é causada por vários contaminantes, como os gases que causam a chuva ácida, aqueles que contribuem para a degradação da camada de ozônio, para o efeito estufa, os compostos orgânicos voláteis, os furanos e dioxinas, formados, geralmente, pela incineração de resíduos sólidos, o ozônio troposférico e os materiais particulados, PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>.

As frações de material particulado, dentre elas o PM<sub>2,5</sub> são definidas a partir de pré-coletores que atuam como parte do sistema respiratório humano. Porém, de uma forma mais simplificada, pode-se definir o termo PM<sub>2,5</sub> como o material particulado cujo diâmetro aerodinâmico é menor que 2,5 µm. Uma definição mais precisa desta faixa de partículas, também conhecida como material particulado de alto risco (HRPM), é apresentada por Coury et al. (2004), de acordo com a American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), como uma fração do material particulado inalável (IPM). Segundo os autores, esta faixa de partículas pode ser definida pela Equação 2.1, sendo função implícita do diâmetro aerodinâmico da partícula (D<sub>ae</sub>) em micrômetros, ou seja, o diâmetro de uma esfera de densidade unitária com a mesma velocidade terminal da partícula em questão.

$$\text{HRPM} = \text{IPM} \cdot [1 - F(x)] \quad (2.1)$$

$$\text{IPM} = 0,5 \cdot [1 + e^{-0,06D_{ae}}] \quad (2.2)$$



Na Equação 2.1, o termo  $F(x)$  é a função probabilidade acumulada de  $x$ , que por sua vez é uma variável padronizada, definida pela Equação 2.3.

$$x = \frac{\ln\left(\frac{D_{ae}}{\Gamma}\right)}{\ln s} \quad (2.3)$$

na qual,

$\Gamma$  é igual a 2,5  $\mu\text{m}$ ;

$\sigma$  é igual a 1,5.

Uma comparação entre a definição do HRPM, dada pelas equações acima, com a do  $\text{PM}_{2,5}$  proposta pela EPA, é mostrada na Figura 2.1, a partir da qual pode-se observar que as definições são bastante próximas.

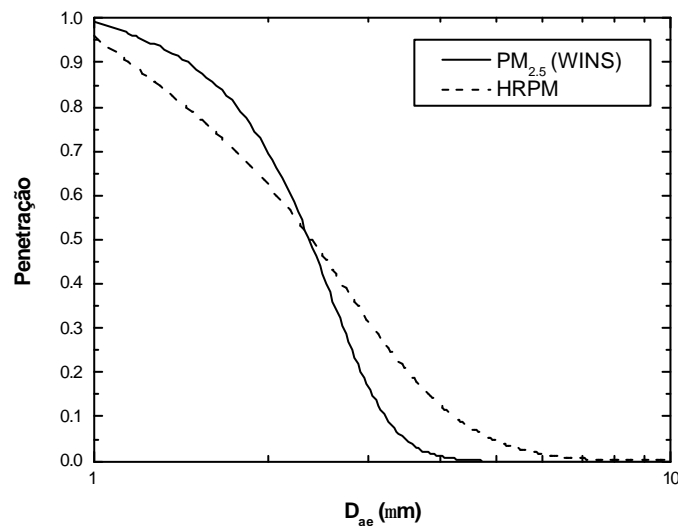


Figura 2.1 - Comparação entre as definições de material particulado (Cory et al., 2004).

Atualmente, esta faixa de partículas é alvo de inúmeras pesquisas, devido aos potenciais danos que podem causar à saúde humana.

Existem várias fontes geradoras de material com esta granulometria, entre elas destacam-se a queima de carvão, para a produção de energia; o uso de combustível pelos automóveis; as queimadas de cana-de-açúcar e de florestas, além de compostos orgânicos oriundos de processos industriais. Estas podem, ainda, ser formadas por reações químicas entre gases, como dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, presentes na atmosfera, ressaltando-se assim a importância do controle da emissão dos mesmos (Sloss e Smith (2000), Castanho e Artaxo (2001) e Friedlander (2000)).

Este conjunto de partículas é apontado como o provável responsável por muitos casos de asma, bronquite e, em alguns casos, até de morte prematura. As maiores vítimas são os idosos e as crianças, devido ao falho sistema imunológico dos primeiros e por apresentarem, muitas vezes, doenças cardiopulmonares, e os últimos são suscetíveis por causa da sensibilidade do sistema respiratório e imunológico, ainda em formação ([www.epa.com](http://www.epa.com)).

O meio ambiente também sofre por causa destas pequenas partículas, uma vez que causam a diminuição da visibilidade e participam na formação da chuva ácida, além de contribuírem para a alteração do clima, como o aquecimento global. Elas podem, ainda, afetar regiões muito distantes da área de emissão, devido ao elevado tempo de residência na atmosfera ([www.epa.com](http://www.epa.com)). John et al. (2001) ressaltam que, devido a esta alta permanência, os danos causados por elas não são somente locais, mas regionais e até nacionais, em relação ao ponto emissor.

Preocupados com os efeitos causados à saúde da população, os Estados Unidos criaram padrões preliminares para a emissão de  $PM_{2,5}$  à atmosfera, baseados no National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). De acordo com estes padrões, as emissões de partículas nesta faixa não devem exceder a concentração média de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  por ano e  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  por dia (U.S.EPA., 2000). Assim como os Estados Unidos, a União Européia está considerando propor uma legislação referente ao controle do  $PM_{2,5}$  (Sloss e Smith, 2000).

No Brasil, a legislação ainda não abrange esta faixa de partículas, estabelecendo como padrão de qualidade do ar. De acordo com a Resolução CONAMA nº 3, de 28 de julho de 1990, o monitoramento das partículas inaláveis ( $PM_{10}$ ), permite como máxima concentração  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para um tempo de amostragem de 24 horas, limite que não deve ser excedido mais de uma vez ao ano. Contudo, frente à conscientização e à comprovação dos males causados pelas partículas mais finas, certamente o controle da emissão destas no Brasil é uma questão de tempo.

Parte integrante dos materiais particulados  $PM_{2,5}$  são as partículas ultrafinas, que abrangem, por sua vez, as nanométricas, compreendidas como a faixa mais fina desta denominação e que apresentam, portanto, os mesmos males ou piores, à saúde humana e ao meio ambiente.

### **2.1.2 Definição de Nanopartículas**

Nos últimos anos, têm sido intensificadas as pesquisas relacionadas às nanopartículas. Todavia a determinação da faixa de tamanho na qual estas estão

compreendidas ainda não está bem definida e é motivo de contradição entre vários trabalhos presentes na literatura.

Davies (2001) define nanopartículas como aquelas que possuem diâmetro menor que 100 nm ou 0,1  $\mu\text{m}$ , definição que está de acordo com a proposta por El Shall e Edelstein (1996) apud Kruis, et al. (1998).

Entretanto, Zhiqiang et al. (2000) determinam que as nanopartículas são aquelas menores que 1  $\mu\text{m}$ . Esta definição baseia-se nas características de que elas, diferentemente das micropartículas, não são visíveis, devido ao fato de espalharem mal a luz e dificilmente poderem ser removidas das correntes gasosas por impactação, uma vez que acompanham o movimento do gás, quando escoando próximo a um obstáculo.

Para Preining (1998), as partículas recebem esta denominação quando menores que 20 nm. O autor ainda apresenta um limite inferior para as mesmas, igual a 1 nm, sendo que, abaixo deste valor elas passariam a ser consideradas moléculas.

Já Pui e Chen (1997) e Kittelson (1998) caracterizaram como nanopartículas aquelas cujo diâmetro está abaixo de 50 nm. Segundo os autores, bem como para Hughes et al. (1998) e Hinds (1999), as partículas chamadas ultrafinas ou aerossóis ultrafinos são aquelas que apresentam diâmetro menor que 100 nm, de acordo com a denominação utilizada pela United States Environmental Protection Agency.

Em virtude das várias denominações presentes na literatura, será adotado neste estudo a denominação de partículas ultrafinas para aquelas abaixo de 100 nm e de nanopartículas para as que estejam abaixo de 50 nm. Portanto, serão

apresentados estudos referentes a toda a faixa, sem deixar de focar a faixa mais fina, mesmo porque os pesquisadores apresentam definições contraditórias e muitas vezes explanam sobre o mesmo tema, utilizando denominações diversas.

### **2.1.3 Aplicações das Partículas Ultrafinas**

O reduzido tamanho das partículas ultrafinas faz com que apresentem propriedades físicas, químicas e biológicas diferentes daquelas obtidas com o mesmo material porém com maior diâmetro, por exemplo diminuição do ponto de fusão (Goldstein et al., 1992 apud Kruis et al., 1998), maior coeficiente de difusão (Horvath et al., 1987 apud Kruis et al., 1998) e maior atividade catalítica (Sarkas et al., 1993 apud Kruis et al., 1998).

Estas diferenças de propriedade possibilitam seu emprego em novas áreas ou a melhoria de algumas aplicações já existentes. Kruis et al. (1998) realizaram um levantamento bibliográfico das várias aplicações em estudo das nanopartículas, tais como o emprego na melhoria da performance de LEDs (diodos emissores de luz), resistores e varistores; nas memórias de acesso randômico dinâmico (DRAMs); na atenuação dos raios UV, na fabricação de filtros solares e na proteção de materiais plásticos para que não haja descoloração, bem como em supercondutores de altas temperaturas e em células solares.

Para Davies (2001) e Castle (2001), a nanotecnologia é a ciência do futuro. O primeiro cita várias utilizações não descritas por Kruis et al. (1998) muitas já em aplicação. Como exemplo, o uso de nanopartículas na composição de filmes, impressão e fotografia, o que, impulsionará a qualidade dos produtos, mercado que movimenta, de acordo com James Stoffel da Kodak (1999) apud Davies

(2001), grande capital (~70 milhões de dólares/ano). Segundo Main (1999) apud Davies (2001), já está em uso na indústria mundial de papel uma solução coloidal contendo partículas micro e nanométricas, com uma produção total de 22 milhões de toneladas por ano. Na área de catalisadores e membranas, William Powers da Ford Motors (1999 apud Davies, 2001) enfatiza os progressos nas pesquisas para desenvolvimento de uma célula combustível, de forma que os veículos poluam e consumam menos. Há inúmeras outras aplicações, como os biopolímeros (Jelinski, 1999 apud Davies, 2001) e a encapsulação de remédios que possam ser injetados no sistema circulatório, liberando o princípio ativo em pequenas doses (Lysaght, 1999 apud Davies, 2001).

As nanopartículas também podem ser aplicadas na composição de sensores para determinação da concentração de gases poluentes como  $\text{NO}_x$ , CO e  $\text{O}_3$ . Os sensores feitos de semicondutores destas partículas possuem maior precisão devido ao aumento da área superficial dos mesmos. Estudos já comprovam a viabilidade econômica e de produção destes sensores (Carotta et al., 2001).

No Brasil, o estudo com nanopartículas também tem avançado. A revista Pesquisa Fapesp de agosto de 2003 realizou um levantamento da abrangência de tal assunto nas pesquisas brasileiras e encontrou alguns estudos interessantes e de grande aplicabilidade como a peneira molecular de carbono desenvolvida por Coutinho, na Unimep, podendo ser empregada na limpeza de gases, recuperação de solventes, além de adsorção de gás natural veicular, de modo a diminuir o volume ocupado pelo gás e possibilitando a construção de tanques menores, aumentando a possibilidade do uso deste combustível em carros menores. Os nanocatalisadores desenvolvidos por Edson Leite, na UFSCar, utilizados em

processos de geração de hidrogênio e para a diminuição da concentração de compostos aromáticos durante o refino do petróleo para a obtenção de gasolina de melhor qualidade e com menos poluente. Uma pesquisa feita pela Embrapa resultou em uma língua eletrônica feita à base de polímeros condutores nanoestruturados que reagem com algumas substâncias, detectando sabores salgados, doces, amargos e ácidos, propriedade que possibilita o uso como degustadora de bebidas, definindo com eficiência a composição de cafés e vinhos (Riul Jr. et al., 2003).

Além destas inúmeras aplicações, em potencial e em uso, muitas outras ainda devem ser desenvolvidas, dado o grande volume de pesquisas relacionadas a estas partículas atualmente em desenvolvimento.

Contudo, Davies (2001) ressalta que, para que se obtenha sucesso na área de nanotecnologia, além de pesquisas relacionadas às partículas, avanços devem ocorrer no desenvolvimento de modelos e programas computacionais, além da evolução dos hardwares. Ressalta também a importância da capacitação de pessoas e do desenvolvimento de trabalhos em equipes multidisciplinares.

#### **2.1.4 Efeitos Nocivos**

As partículas abaixo de 1  $\mu\text{m}$  são nocivas ao meio ambiente e ao organismo humano, por se depositarem nos alvéolos pulmonares, por reduzirem a visibilidade. Os danos causados aos seres vivos podem, ainda, serem intensificados pela adesão de metais pesados à superfície das mesmas (Watanabe et al., 1995).

Atualmente, houve um aumento das evidências do efeito tóxico das partículas ultrafinas à saúde humana, que podem causar doenças e até mesmo a diminuição da expectativa de vida, como observado por Seaton et al. (1995 apud Preining, 1998).

Um dos males do século XXI, segundo D'Amato (2000), é a alergia respiratória que está se tornando epidêmica nas regiões industrializadas. As manifestações mais frequentes são as rinites e bronquites, causadas principalmente por pólen de flores. Seu efeito é potencializado pela ação de ozônio no organismo e materiais particulados finos, que carregam o agente causador da alergia até a zona mais profunda do sistema respiratório. Desse modo, a alergia atinge maior número de pessoas nas áreas urbanas do que nas rurais.

No processo de inalação das partículas presentes no ar pelo ser humano, segundo Hinds (1982), o ar é inalado pelo sistema respiratório (representado na Figura 2.2) e durante o seu percurso muda várias vezes de direção e velocidade, em função da geometria do organismo humano. As partículas suspensas no ar seguem esse escoamento e uma significativa parcela das maiores é depositada, principalmente nas vias respiratórias superiores, sendo expelidas para o sistema gastrointestinal pela mucosa.

Já as partículas mais finas atingem as partes mais profundas do pulmão, os brônquios e alvéolos, de onde são removidas pela ação dos macrófagos. Estes fagocitam as partículas, limpando o pulmão, após o que são expelidos com o muco formado, minimizando a interação das mesmas com o organismo humano. Porém, quando as partículas entram em grandes concentrações, elas não são removidas efetivamente, entrando em contato com o epitélio e sendo absorvidas



rapidamente, em função do seu pequeno diâmetro. Por possuírem elevada área superficial, facilitam a liberação de metais e radicais livres que estejam a elas adsorvidos, os quais possuem ação oxidante sobre os macrófagos e o epitélio, causando danos às células em questão e o aumento da permeabilidade das partículas pelo tecido pulmonar (Donaldson et al., 1998). A diminuição da capacidade de fagocitar partículas é potencializada pelas partículas ultrafinas, conforme estudos de Renwick et al. (2001).

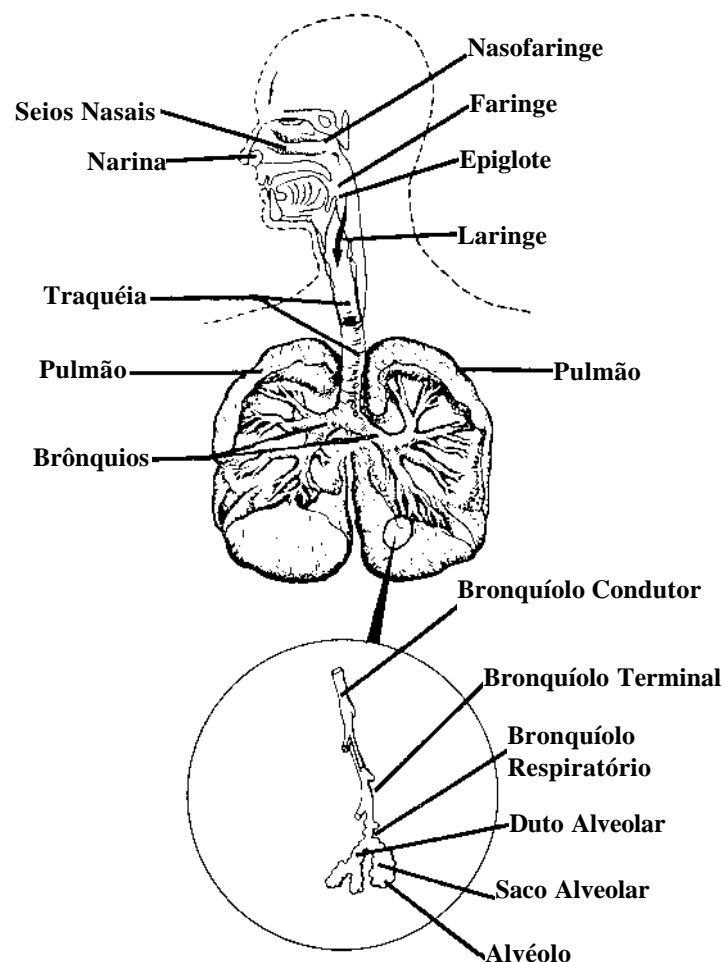


Figura 2.2 – Esquema do Sistema Respiratório (Handbook of Air Pollution USPHS, 1968 apud Hinds, 1982).

As partículas nesta faixa são depositadas no sistema respiratório pelo efeito do movimento Browniano. Assim, quanto maior o tempo entre uma captação de ar e outra, maior o tempo de residência das partículas, aumentando a sua coleta pelo organismo humano (Hinds, 1999). O sistema respiratório possui 75 m<sup>2</sup> de área de troca e processa de 10 a 25 m<sup>3</sup> de ar/dia, segundo Hinds, o que acarreta uma grande área para contato com as partículas, que são inspiradas em grande quantidade.

As partículas causam um processo inflamatório das células, que pode levar a alterações fibrosas no pulmão, fazendo com que o mesmo enrijeça, o que causa uma perda da capacidade respiratória. Este fator é intensificado quando as partículas são muito pequenas, como as estudadas por Oberdörster et al. (1990) com diâmetro de 20 a 30 nm, proporcionando o aumento da produção de colágeno e tecido fibroso na região pulmonar.

Assim, as partículas finas podem ficar retidas no pulmão por longos períodos ou ainda penetrar na membrana celular, proporcionando, segundo Pui e Chen (1997), que materiais relativamente insolúveis adsorvidos a elas, atravessem o sistema respiratório.

Este fato, bem como estudos toxicológicos, foi o motivo a partir do qual Oberdörster et al. (1990) concluíram que as partículas abaixo de 100 nm apresentam maiores danos à saúde humana do que a mesma quantidade do material, porém em tamanhos maiores. Isto também foi observado por Donaldson, (1996 apud Pui e Chen, 1997), que mostrou que partículas ultrafinas, relativamente inertes e atóxicas no tamanho de microns, podem causar inflamações quando em tamanhos menores e por Ferin et al. (1990) que avaliaram

o efeito do aumento da toxicidade do  $\text{TiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em tamanhos menores, bem como sua maior penetração no organismo em estudo. Os pesquisadores afirmam que, mesmo quando estas partículas estão na forma de aglomerados, elas se dissociam quando depositadas, sendo rapidamente absorvidas.

Donaldson et al. (1997 apud Preining, 1997) demonstraram que as partículas menores liberam mais radicais hidroxil, agentes oxidantes, precursores de várias doenças.

Oberdörster (1995 apud Shi et al., 2001) realizou experimentos com politetrafluoretileno em ratos e observou que estas partículas danificam o pulmão, chegando a causar a morte de muitas cobaias.

As doenças pulmonares podem, ainda, ser causadas pela absorção de bactérias ( $< 2 \mu\text{m}$ ), vírus e esporos de fungos, que variam de  $0,05$  a  $0,5 \mu\text{m}$ , ou até mesmo por substâncias produzidas por tais organismos, que causam reações nos pulmões (Lau et al., 1996; Vogelzang et al., 1998 apud Neas, 2000).

Neas (2000) acrescenta que, além das doenças pulmonares, a inalação de partículas pequenas provoca problemas de coração. Um dos meios de causar tais danos, segundo Oberdörster et al. (1996 apud Neas, 2000) é através da absorção das partículas pela corrente sanguínea e sua deposição nos tecidos do coração, o que pode causar arritmia e morte.

A absorção das partículas pela corrente sanguínea também pode causar trombose, segundo as pesquisas de Nemmar et al. (2003). Este efeito foi observado quando trabalhando com partículas de  $60 \text{ nm}$  carregadas positivamente. As partículas maiores, com  $400 \text{ nm}$ , não apresentaram o mesmo resultado, apesar de causarem inflamações no pulmão.

O efeito das ultrafinas é agravado pela adsorção de metais pesados à superfície das mesmas, o que foi constatado por alguns pesquisadores. John et al. (2001) determinaram a presença de metais nas partículas menores que 1  $\mu\text{m}$ , dispersas no ar da cidade de Dusseldorf na Alemanha, sendo estes: Cu, Pb, Sb, Cr, K, Mn, Ti, Ni e Zn. Liang et al. (2002) também realizaram o mesmo estudo, analisando as cinzas de um incinerador municipal, e concluíram que de 30 a 50 % do material adsorvido era Zn e que existiam ainda, em menor quantidade, Ca, Si, Na, K, Cl, Ps, S e Al e traços de mercúrio.

Wilson et al. (2000) observaram que partículas de carbono inorgânico em tamanho menor que 100 nm interagem com metais de transição, tornando-se potencialmente tóxicas. Eles observaram, em estudos com cobaias, que o carbono com elevada concentração de ferro causa inflamação do pulmão, quando os macrófagos não desempenham suas funções. Ferin et al. (1990) expõem que já foi detectada a presença de carbono inorgânico em vários órgãos e que o mesmo tem grande facilidade de se acumular no sistema linfático.

Harrison e Yin (2000) questionam-se se é a composição química ou o tamanho das partículas que causam seu efeito tóxico ao organismo humano. Suas pesquisas apontaram que as substâncias tóxicas não estão em concentração suficientes para causarem tantos males. Contudo, os autores apresentam algumas pesquisas que associam doenças com compostos específicos, como a morte de ratos devido à presença de sulfato (Pope et al., 1995 apud Harrison e Yin, 2000) e a inflamação de tecidos por radicais livres associados aos metais pesados. Quanto ao tamanho das partículas, é mais difícil de ser analisada devido à escassez de dados, segundo estes pesquisadores.

Com os resultados promissores de aplicação das nanopartículas em novas áreas, o que certamente provocará um aumento ainda maior de sua produção, justifica-se a preocupação com os efeitos que as mesmas causam à saúde humana e em métodos para a sua remoção do ar atmosférico.

### **2.1.5 Remoção das Partículas da Corrente Gasosa**

A Organização Mundial da Saúde (OMS) está se mobilizando para que aumente a conscientização sobre a problemática relacionada às partículas finas (menores que 2 micras), e, conseqüentemente, a remoção das mesmas da atmosfera, uma vez que estas são nocivas à saúde e permanecem por muito tempo em suspensão (Parker, 2000).

Hinds (1999) apresenta algumas fontes de partículas ultrafinas como a fumaça de óleo, o núcleo de sal marinho, o pó de metais, o óleo diesel e os vírus.

Kittelson (1998) aponta, contudo que o tempo de residência das partículas menores que 0,1  $\mu\text{m}$  na atmosfera é reduzido, em função dos efeitos de coagulação, o que causa um aumento de tamanho das mesmas.

A preocupação em relação aos efeitos das partículas ultrafinas motivou pesquisas que quantificaram a presença das mesmas no meio ambiente. Trabalhos como os de Hughes et al. (1998), Shi et al. (2001) e Ruuskanen et al. (2001) mediram a concentração de partículas em cidades da Europa e dos Estados Unidos. Obtiveram medidas que demonstram que as ultrafinas estão presentes no ar em números significativos. Hughes et al (1998) determinaram que este número é, para as partículas de 0,017 a 0,1  $\mu\text{m}$ , de aproximadamente  $10^4 \pm 10^3$

partículas/cm<sup>3</sup> e que, em média, uma pessoa respira  $2.10^{11}$  partículas/dia nesta faixa granulométrica.

Shi et al. (2001) obtiveram resultados que demonstram uma quantidade considerável de partículas na faixa de 3 a 7 nm. Os autores constataram que os maiores contribuintes para essa emissão são as reações de combustão, nas quais os veículos têm um importante papel, sendo que a concentração aumenta nos horários de pico e períodos de ventos.

No Brasil, medidas foram realizadas na cidade de São Paulo, grande centro industrial e urbano, por Castanho e Artaxo (2001) que detectaram altas concentrações, em média de 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , para partículas abaixo de 2,5  $\mu\text{m}$ . Estas amostragens foram realizadas durante o inverno, época que apresenta os índices mais elevados de poluição. Os resultados também alertam para a grande quantidade de partículas presentes na atmosfera e para a significativa parcela de influência do setor de transporte da cidade, que chega a ser responsável por até 30% de toda a emissão de partículas nesta faixa. Os contaminantes que mais se destacam são o carvão inorgânico, emissão esta atribuída principalmente à queima de óleo diesel, e os sulfatos. Na cidade de São Carlos, interior de São Paulo, também foi realizado o monitoramento da qualidade do ar no centro da cidade. Bruno (2005) e Pozza (2005) mediram concentrações de aproximadamente 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante o ano, com picos de até 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante o inverno. Assim como em São Paulo, no interior, os veículos também são uma grande fonte emissora de material particulado. Contudo, na cidade de São Carlos, os pesquisadores detectaram uma nova fonte poluidora, a queimada sazonal da cana-de-açúcar.

Já Parker (2000) aponta como principal fonte de partículas submicrométricas, a volatilização e a condensação de materiais produzidos durante processos industriais, e que, por este motivo, são geralmente esféricas.

A remoção das partículas da corrente gasosa torna-se mais difícil com a drástica redução do tamanho das mesmas. Entretanto, trabalhos presentes na literatura comprovam sucesso na remoção de partículas finas em alguns dos equipamentos de separação comumente utilizados na indústria. Isto foi obtido com a aplicação do efeito eletrostático em ciclones (Wadenpohl, 1994 apud Peukert e Wadenpohl, 2001), em lavadores (Jaworek et al., 1996) e em filtros (Inculet et al., 2002), além do precipitador eletrostático propriamente dito (Zukeran et al., 1999).

Parker (2000) enfatiza que, dentre os equipamentos comumente utilizados na limpeza de gases, o precipitador é o equipamento mais apto para a remoção de partículas finas, uma vez que consegue capturar uma gama maior de partículas do que o lavador venturi e o filtro de manga, além de que o primeiro possui alto custo e o segundo limitações operacionais. O autor aponta ainda a importância de estudos dirigidos para o desenvolvimento de precipitadores que coletem especificamente as partículas desta faixa.

Maineles et al. (2002) ressaltam a importância dos precipitadores na remoção de bactérias e fungos presentes no ambiente, eliminando ou minimizando doenças causadas por estes aos seres humanos, principalmente a pessoas mais suscetíveis, como idosos e alérgicos, o que se enquadra na área de controle de ambientes internos.

### 2.1.6 Avaliação da Continuidade do Meio

No desenvolvimento de equipamentos de limpeza de gases mais eficientes no que se refere à remoção das nanopartículas, bem como no seu emprego na recuperação de materiais para aplicações da nanotecnologia, Davies (2001) aponta as dificuldades e desafios que deverão ser enfrentadas pelos pesquisadores. Dentre eles estão a dificuldade em classificar as partículas, o baixo entendimento do seu escoamento e a tendência à aglomeração.

Um dos fatores importantes envolvendo a engenharia, relacionado ao estudo das nanopartículas, é a determinação dos processos de transferência de massa e movimento das mesmas. Contudo, nesta faixa, a teoria não está bem consolidada, devido à perda de continuidade do meio. Assim como a faixa de diâmetro pode influenciar as propriedades das partículas, ela também tem efeito sobre o comportamento do aerossol (sua interação com o meio que o cerca) e as leis que governam as propriedades do mesmo (Hinds, 1999). Estas são também dificuldades ligadas a esta tecnologia e devem ser vencidas.

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

Uma forma de definir como será a relação entre elas e o fluido que as cerca, de acordo com Seinfeld (1986), é através do número de Knudsen ( $Kn$ ), um adimensional determinado pela Equação 2.4, que relaciona o caminho livre médio



do gás, ou seja, a distância que uma molécula do gás percorre antes de se chocar com outra, com o diâmetro da partícula do aerossol.

$$Kn = \frac{2l}{d_p} \quad (2.4)$$

na qual,

$\lambda$  é o caminho livre médio do gás;

$d_p$  é o diâmetro da partícula.

A caracterização do comportamento da partícula em relação ao gás ocorre através da análise do valor do número de Knudsen. Se  $Kn \ll 1$ , a partícula será muito maior que o caminho livre médio e enxergará o gás como um meio contínuo. Por outro lado, se  $Kn \gg 1$ , a partícula possui tamanho da mesma ordem de grandeza das moléculas do gás ou está num meio muito rarefeito. Neste caso o regime é denominado de moléculas livres, seguindo a teoria cinética dos gases.

Quanto à condição de  $Kn \cong 1$ , denominada região de transição, ainda existem dificuldades para a caracterização do comportamento da partícula e os resultados obtidos não são tão confiáveis (Pui e Chen, 1997).

O caminho livre médio dos gases utilizado na equação de obtenção do número de Knudsen pode ser calculado através da Equação 2.5, determinada a partir da teoria cinética dos gases (Flagan e Seinfeld, 1988).

$$l = \frac{m}{0,499 \cdot P \cdot \left( \frac{8 \cdot M}{p \cdot R \cdot T} \right)^{0,5}} \quad (2.5)$$

na qual,

$\lambda$  é o caminho livre médio (m);

P é a pressão (Pa);

M é a peso molecular;

$\mu$  é a viscosidade (kg/ms) e

T é a temperatura (K).

O caminho livre médio do ar é comumente determinado como se o mesmo fosse composto apenas por moléculas de uma única espécie química e seu valor nas condições normais de temperatura e pressão, determinado através da Equação 2.5 é igual a 0,0651  $\mu\text{m}$ .

### **2.1.7 Correção para escoamento em meio não contínuo**

O transporte de partículas através de um fluido está intimamente ligado à interação entre as duas partes, que se altera com a diminuição do tamanho da partícula ou aumento do número de Knudsen. Conforme o Kn se distancia de 0, as equações válidas para o regime contínuo perdem a sua validade e seu emprego incorre em grande erro.

Com o intuito de corrigir o efeito de interações a nível molecular quando as partículas que escoam no fluido são pequenas, Cunningham propôs uma equação, modificada por Knudsen e Weber. Esta equação é amplamente usada para corrigir a equação de Stokes que define a força de arraste para baixos valores de Reynolds (Equação 2.6), na qual  $k_d$  é o coeficiente de arraste (Fuchs, 1964).

$$F_w = k_d \cdot v \quad (2.6)$$

onde:

$$k_d = \frac{6 \cdot p \cdot \mu \cdot r_p}{F_s} \quad (2.7)$$

na qual,

$r_p$  é o raio da partícula.

O termo  $F_s$  é conhecido como o fator de escorregamento de Cunningham, representado pela Equação 2.8 (Fuchs, 1964).

$$F_s = 1 + 1,246 \cdot \frac{2 \cdot ?}{d_p} + 0,42 \cdot \frac{2 \cdot ?}{d_p} \cdot \exp\left(-0,87 \cdot \frac{d_p}{2 \cdot ?}\right) \quad (2.8)$$

Esta equação apresenta um bom desempenho de acordo com Hidy e Brock (1970) quando os valores de Kn são baixos, o que caracteriza o escoamento como do tipo “escorregamento”. Contudo, para valores mais altos de Kn, que caracterizam o regime de moléculas livres, a correção de Cunningham não é mais satisfatória.

Ao longo dos anos algumas equações foram propostas com o intuito de definir a interação fluido partícula para altos valores de Knudsen. A mais recente é a equação de Li e Wang (2003a, b) que examinaram as correlações existentes e desenvolveram uma nova equação para o coeficiente de arraste baseada na teoria de Chapman-Eskog e nos modelos de espalhamento difuso e especular. O resultado obtido está apresentado nas Equações 2.9 a 2.19.

$$k_{d\infty} = \frac{8}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot p \cdot m_r \cdot k \cdot T \cdot N \cdot r_p^2} \cdot O_{med}^{(1,1)*} \quad (2.9)$$

onde:

$$O_{med}^{(1,1)*} = \mathbf{j} \cdot O_d^{(1,1)*} + (1 - \mathbf{j}) \cdot O_s^{(1,1)*} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{j} = \frac{1 + 0,9 \cdot Kn \cdot \left( 1 - \frac{1}{1 + \left( \frac{r_p}{2,5} \right)^{15}} \right)}{1 + Kn} \quad (2.11)$$

$$O_d^{(1,1)*} = 1 + \frac{p}{8} + \left[ 1,072 + \frac{2,078}{T^{*1/4}} + \frac{1,261}{T^{*1/2}} \right] \cdot \left( \frac{s}{r_p} \right) + \left[ 3,285 - \frac{8,872}{T^{*1/4}} + \frac{5,225}{T^{*1/2}} \right] \cdot \left( \frac{s}{r_p} \right)^2 \quad (2.12)$$

$$O_s^{(1,1)*} = 1 + \frac{p}{8} + \left[ 0,316 + \frac{1,47}{T^{*1/4}} + \frac{0,476}{T^{*1/2}} \right] \cdot \left( \frac{s}{r_p} \right) + \left[ 1,53 - \frac{5,013}{T^{*1/4}} + \frac{4,025}{T^{*1/2}} \right] \cdot \left( \frac{s}{r_p} \right)^2 \quad (2.13)$$

$$T^* = \frac{k \cdot T}{e'} \quad (2.14)$$

$$e' = 2 \cdot p \cdot e \cdot \frac{s^3}{3 \cdot V} \quad (2.15)$$

$$e = \sqrt{e_g \cdot e_p} \quad (2.16)$$

$$s = \frac{s_g + s_p}{2} \quad (2.17)$$

$$V = \frac{\bar{M}}{?_p} \quad (2.18)$$

$$m_r = \frac{m_g \cdot m_p}{(m_g + m_p)} \quad (2.19)$$

nas quais,

$m_g$  é a massa do gás;

$m_p$  é a massa partícula;

$k$  é a constante de Boltzmann;

$\sigma$  é o diâmetro característico para o potencial de Lennard-Jones 12-6;

$\varepsilon$  é a energia característica para o potencial de Lennard-Jones 12-6;

$\bar{M}$  é a massa atômica da partícula;

T é a temperatura;

N densidade do gás em número.

O diâmetro característico da molécula ( $\sigma$ ) (diâmetro de colisão) e a energia característica de interação entre as moléculas ( $\epsilon$ ) (energia máxima de atração entre um par de moléculas) pode ser obtido, de acordo com Bird et al. (1960), a partir das Equações 2.20 a 2.21

$$s = 1,222 \cdot \dot{V}_m^{\frac{1}{3}} \quad (2.20)$$

$$e = 1,92 \cdot T_m \quad (2.21)$$

nas quais,

$\sigma$  é dado em Angström;

$\epsilon$  é dado em K;

$T_m$  é a temperatura de fusão em K;

$\dot{V}_m$  é o volume específico do sólido no ponto de fusão, dado em  $\text{cm}^3/\text{mol}$ .

A equação obtida por Li e Wang (2003a, b) é válida apenas para o regime de moléculas livres. Para a região de transição entre este regime e o do contínuo ( $0,25 \leq \text{Kn} \leq 10$ , de acordo com Hidy e Brock, 1970), os autores propõem uma aproximação semi-empírica, inserindo uma função na equação anterior de modo que, para baixos valores de Knudsen (Equação 2.22 a 2.23)  $\alpha'$  tende a zero e a equação se torna igual a de Stokes. Por outro lado, para altos valores de Kn,  $\alpha'$  tende a infinito e a equação se torna a equação original proposta pelos autores. Na

determinação de  $\alpha'$  foi empregada uma constante  $w$  igual a 1,143, determinada a partir de um ajuste da equação aos dados de Millikan.

$$k_d = \frac{a'}{(1 + a'^w)^{1/w}} \cdot k_{d\infty} \quad (2.22)$$

$$a' = \frac{9 \cdot \sqrt{2} \cdot p \cdot \mu}{8 \cdot O_{med}^{(1,1)*} \cdot \sqrt{m_r \cdot k \cdot T \cdot N \cdot r}} \quad (2.23)$$

## 2.2 Precipitador Eletrostático

O efeito eletrostático já é conhecido de longa data. Foi observado pela primeira vez na Grécia Antiga. Entretanto, o precipitador eletrostático só foi empregado com sucesso por Cottrell, nos Estados Unidos, no começo do século XX (White, 1963; Oglesby e Nichols, 1978; Parker, 1997).

O equipamento é aplicado principalmente no controle da poluição atmosférica, de forma que a emissão de material particulado esteja de acordo com a legislação em vigor, tanto nos processos industriais, como na incineração de resíduos, atividade que vem sendo cada vez mais empregada (Lind et al., 2003). Outra importante aplicação é na recuperação de produtos de alto valor agregado que são perdidos na corrente gasosa.

No Brasil, o precipitador faz parte do processo de várias empresas, principalmente com o intuito de remover partículas que poderiam ser emitidas à atmosfera, como no caso da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), a Companhia Siderúrgica Paulista (Cosipa), a Santa Marina, a Cebrace Cristal Plano, a Aracruz Papel e Celulose, a Klabin, a Suzano, entre outras.

### **2.2.1 Processo de Precipitação das Partículas**

O precipitador eletrostático é muito empregado industrialmente, principalmente por possuir altas eficiências de remoção, mesmo para partículas mais finas, além de operar a elevadas temperaturas, possuir baixa perda de carga, baixo custo de operação e longa vida útil (Parker, 1997). Outra vantagem dos precipitadores, apontada por Masuda e Hosokawa (1995), é que eles não consomem muita energia elétrica, ponto importante no contexto atual de redução no consumo deste bem, devido à limitação da quantidade de energia gerada frente ao aumento da população mundial.

O princípio de seu funcionamento está detalhado na Figura 2.3, e consiste no fornecimento de carga elétrica às partículas, através da ionização do gás pelo efeito corona e posterior migração destas, causada por um alto campo elétrico, em direção às placas aterradas. Depois de coletadas, a camada de partículas formada é removida, para posterior descarte.

### **2.2.2 Tipos de Precipitadores Eletrostáticos**

Os precipitadores eletrostáticos podem promover a remoção da camada de material particulado coletada tanto por via úmida quanto por via seca. Entretanto, esta última é mais empregada, por não gerar uma lama que precisará de tratamento para posterior descarte e por possuir um menor custo (U.S.EPA, 1996).

As configurações comumente encontradas ainda se subdividem em estágio simples ou duplo. No estágio duplo as partículas são carregadas na primeira seção, coletadas e removidas na seguinte, sendo empregado no tratamento de baixas vazões de gás, como por exemplo, na tecnologia de limpeza de ambientes de

trabalho (Riehle e Löffler, 1992b). A U.S.EPA. (1996) apresenta as vantagens do duplo estágio, que são: maior tempo de carregamento da partícula e menor propensão ao acontecimento do fenômeno denominado corona reversa. Já no estágio simples, o processo de carregamento e coleta ocorre em uma única etapa, em grande escala, sendo esta configuração melhor por minimizar a ressuspensão das partículas já coletadas (Mizuno, 2000).

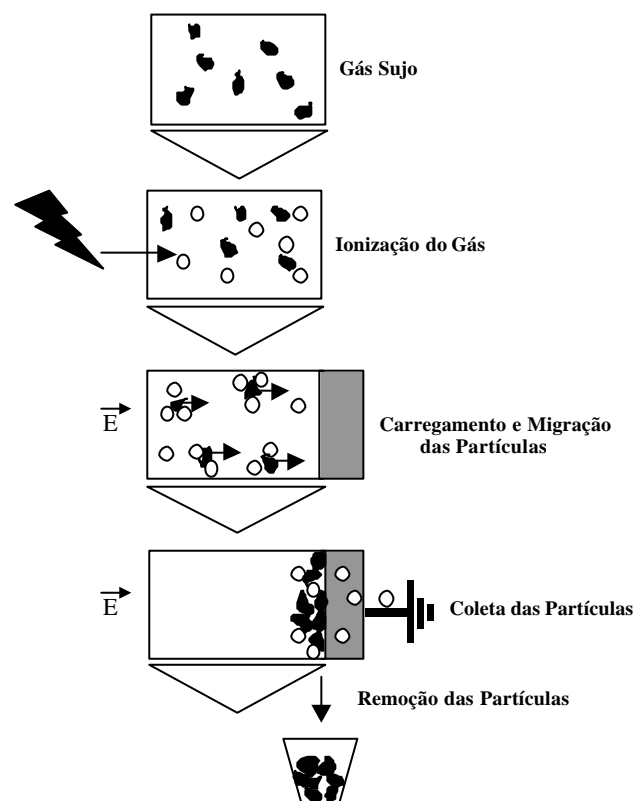


Figura 2.3 – Esquema do processo de separação nos precipitadores eletrostáticos (Riehle, 1997).

O precipitador de estágio único pode ser construído em diversas formas, sendo as principais a configuração tubo-fio e a placa-fio. O tipo tubo foi o precipitador originalmente desenvolvido e consistia em um eletrodo de descarga,



dentro de um tubo aterrado. A vazão é concorrente ao fio e a diferença de potencial é a mesma em toda a extensão do precipitador.

A configuração placa-fio, apresentada na Figura 2.4, é a mais utilizada industrialmente.

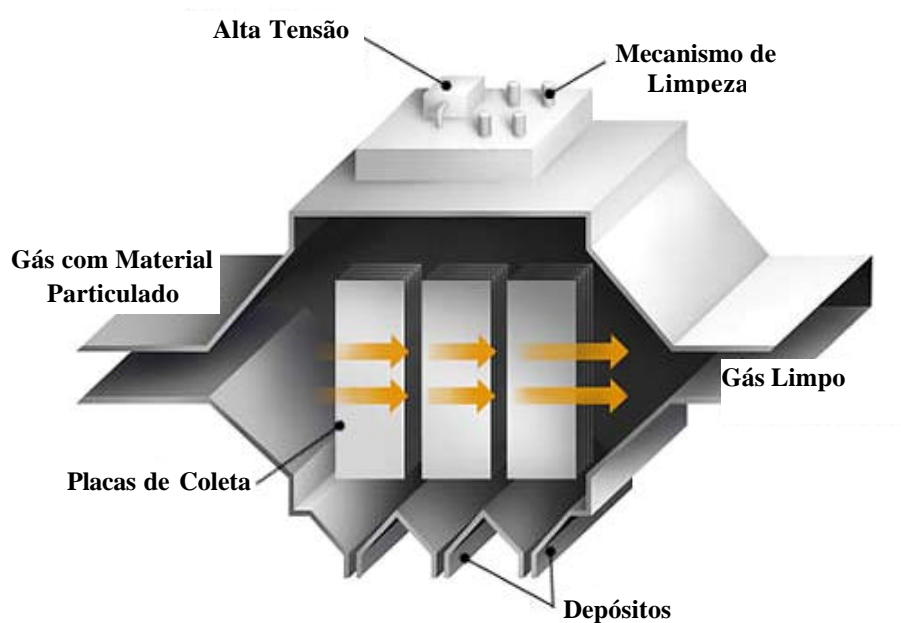


Figura 2.4 – Representação de um precipitador do tipo placa-fio  
([www.powerspan.com](http://www.powerspan.com))

Essa configuração é caracterizada por um conjunto de placas coletoras aterradas (os dutos) que possuem entre si uma fileira de fios posicionados verticalmente, funcionando como eletrodos de descarga. As partículas coletadas são removidas, principalmente, pela ação mecânica e depositadas em reservatório, de onde serão posteriormente descartadas. Nas instalações industriais, o precipitador é composto por vários dutos, sendo a vazão a ser tratada distribuída entre os mesmos.

Para melhor visualização do precipitador placa-fio e suas dimensões, um esquema do equipamento é mostrado na Figura 2.5.

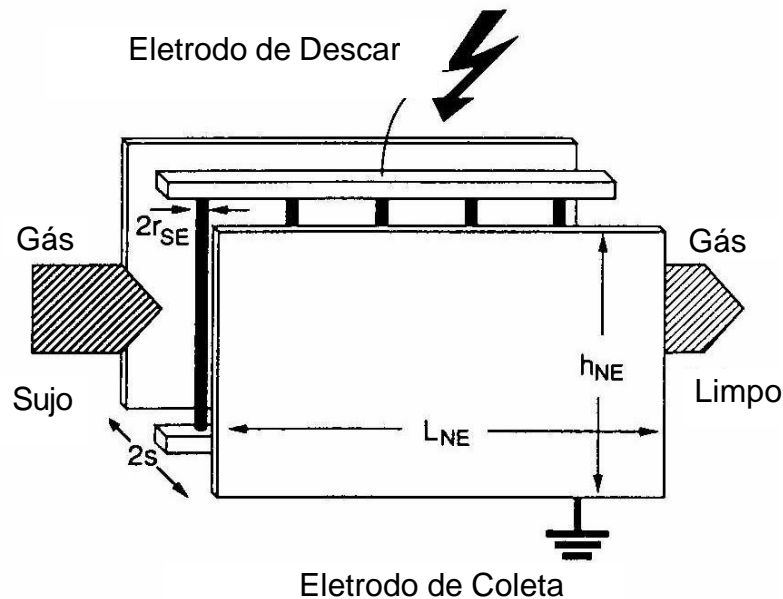


Figura 2.5 – Precipitador tipo placa-fio com suas principais características geométricas (Riehle, 1997).

### 2.2.3 Ionização do Gás

Um dos pré-requisitos no processo de precipitação eletrostática é a geração de grande quantidade de íons para o carregamento das partículas que compõem o aerossol. White (1963) cita que o efeito corona é o método de carregamento que apresenta maiores vantagens econômicas e técnicas, sendo, portanto, o método escolhido para o uso industrial.

É necessário um campo elétrico de alta intensidade para que haja a produção de uma grande quantidade de íons em fase gasosa. Este campo é obtido através do uso de altos potenciais aplicados a um eletrodo de descarga, podendo-

se observar a passagem de corrente elétrica pelo gás, entre este eletrodo e o de coleta. Esta descarga elétrica é denominada corona.

A ionização é produzida por elétrons livres, que são acelerados pelo alto campo elétrico existente perto do eletrodo de descarga, devido à sua grande mobilidade elétrica. A energia cinética desses elétrons é suficiente para retirar, através do impacto, novos elétrons das moléculas neutras de gás e formar íons positivos, produzindo, assim, uma “avalanche” de elétrons. A região próxima ao eletrodo, na qual ocorre a ionização, é denominada zona ativa e é caracterizada por uma luminescência. A energia necessária para retirar um elétron varia, dependendo das espécies químicas presentes no gás, podendo ser gerada com a aplicação de uma diferença de potencial elétrico com valores compreendidos entre 10 a 25 V (Oglesby e Nichols, 1978).

A polarização da descarga corona pode ser tanto positiva quanto negativa. A negativa é a mais empregada e, de acordo com White (1963), pode ser descrita pela movimentação dos elétrons em direção ao eletrodo de coleta (placa) e dos íons positivos em direção ao eletrodo de descarga (fio), que possui um importante papel, devido à sua participação no processo inicial de ionização. Este processo pode ocorrer de duas formas: a primeira consiste na liberação de elétrons do eletrodo, pelo impacto dos íons positivos com o mesmo, e isso ocorre sob o efeito de um alto campo elétrico. O segundo refere-se ao efeito fotoelétrico, devido à ação da radiação ultravioleta emitida.

A aparência da corona negativa é muito diferente da positiva, possuindo vários pontos de luminescência, que, no eletrodo limpo, apresentam um

movimento rápido e alternado por toda a superfície. Outra característica deste tipo de descarga é que ela emite um barulho semelhante a um assovio (White, 1963).

A corona negativa só é possível em gases, ou em mistura de gases, que tenham afinidade por elétrons, uma vez que a existência da corona depende da presença de íons na zona passiva, compreendida entre a zona ativa e o eletrodo de coleta, conforme mostra a Figura 2.6.

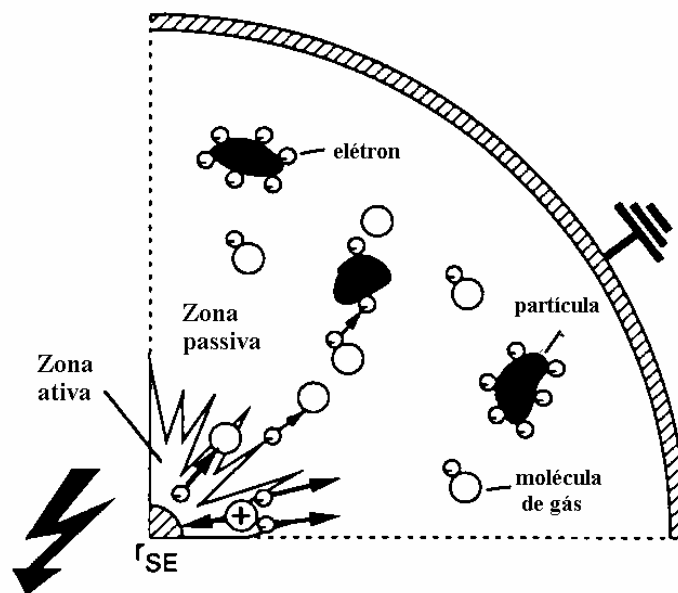


Figura 2.6 – Princípio do efeito corona (Riehle, 1997).

Caso o gás não apresente uma alta eletronegatividade, a corrente elétrica será muito alta, porque os elétrons livres possuem alta mobilidade elétrica, 1000 vezes maior que a dos íons. Neste caso ocorrerá o rompimento elétrico do gás, ou seja, este deixará de ser isolante, para se tornar condutor. Este fenômeno só não ocorrerá na corona negativa, se os elétrons livres aderirem às moléculas neutras dos gases, diminuindo sua mobilidade. Este processo ocorre na zona passiva, devido ao fato do campo elétrico ser mais baixo nesta região e o elétron não

possuir energia suficiente para continuar o processo de ionização. Portanto, a estabilidade da corona negativa depende da composição do gás utilizado. O fator de diminuição da corrente é reforçado pela presença de partículas carregadas, que apresentam mobilidade elétrica menor que a dos íons.

Na corona negativa, a corrente elétrica parte da placa e requer potenciais mais altos que a positiva para que ocorra o rompimento elétrico, que pode ser visualizado através da emissão de faíscas devido à alta corrente elétrica (White, 1963). Assim, a corona negativa é preferível, em processos industriais, uma vez que pode operar com potenciais mais elevados, possui maior corrente e é mais estável, devido aos gases utilizados industrialmente possuírem porcentagens consideráveis de componentes eletronegativos. Porém, para limpeza do ar em ambientes de trabalho, a positiva é mais utilizada, por gerar menor quantidade de ozônio (Mizuno, 2000). Este fato é importante, uma vez que, segundo Lippmann (1984 apud Liu et al., 2000), o ozônio é um gás tóxico, que, quando inspirado, mesmo em baixas concentrações (100 ppb), reduz a capacidade respiratória e pode ainda, de acordo com as pesquisas de Witsch (1988 apud Lin et al., 2000), causar lesões aos pulmões e até mesmo câncer. Uma forma de reduzir sua geração, quando empregada a corona negativa, é através do aquecimento do eletrodo de descarga, devido à elevação da temperatura desfavorecer a reação de produção de tal gás, conforme estudo de Lin et al. (2000).

### **2.2.3.1 Variáveis Elétricas de Operação**

O campo elétrico (E) é um parâmetro extremamente importante na precipitação eletrostática, pois é o responsável pelo carregamento e posterior

coleta das partículas. O campo formado entre os eletrodos de coleta e de descarga, depende, de acordo com Ogleby e Nichols (1978), de dois fatores: a aplicação de uma diferença de potencial elétrico e a existência de íons e partículas carregadas entre os eletrodos. Estes fatores fazem com que o campo não seja uniforme, sendo função da posição, dependendo fortemente da geometria do duto e da concentração de partículas e íons carregados, que apresentam uma grande variação, com o comprimento do equipamento (Kihm et al., 1985; Soldati et al., 1993).

Em virtude da grande dificuldade em se determinar o escoamento dos íons e partículas carregadas e sua influência sobre o campo elétrico, o campo real é de difícil determinação. Segundo Goo e Lee (1997) o fenômeno não está totalmente claro e a teoria não está plenamente desenvolvida. Para que isto ocorra é necessário um melhor entendimento da fluidodinâmica, da eletrostática e do transporte das partículas e como estes mecanismos interagem entre si. Por isso é difícil obter uma equação precisa para sua representação. Contudo, White (1963) descreve que foi possível identificar, analisando uma seção transversal do duto, que o campo apresenta um ponto de mínimo, situado entre o fio e a placa de coleta.

Essa dificuldade de determinação do campo elétrico real no precipitador faz com que este seja normalmente descrito pela Equação 2.24 (Riehle, 1997) uma aproximação, na qual o campo é considerado constante em todo o precipitador. Devido a isso, é denominado campo pseudo-homogêneo ( $E_{ps}$ ). Esta simplificação facilita o emprego dos modelos teóricos para o cálculo da eficiência.

$$E_{ps} = \frac{V}{s} \quad (2.24)$$

na qual,

V é igual à tensão aplicada;

s é igual à distância entre o eletrodo de descarga e o de coleta.

O campo descrito acima é o campo formado entre eletrodos compostos por placas paralelas, podendo ser considerada uma aproximação grosseira para um precipitador do tipo placa-fio. Com o intuito de obter uma equação um pouco mais próxima do campo elétrico real dentro do precipitador e evitar o grande esforço computacional requerido para o cálculo do mesmo, alguns autores buscaram equações para a determinação de um campo aproximado dentro do precipitador. Kihm et al. (1985, 1987) propuseram uma equação para a obtenção do campo elétrico que leva em conta a geometria do equipamento, como o efeito da largura e relação  $s/2c$  (Equações de 2.25 a 2.36). As coordenadas utilizadas na dedução da equação são as apresentadas na Figura 2.8, sendo a origem no eixo x deslocada em c no interior da placa. O n na somatória representa o número de fios.

$$E_x(x', y') = \frac{V}{s} \cdot p \cdot \cos(\mathbf{a}) \cdot \frac{\sum_{m=0}^n \frac{\sinh(\beta)}{N1}}{N2} \quad (2.25)$$

$$E_y(x', y') = \frac{V}{s} \cdot p \cdot \sin(\mathbf{a}) \cdot \frac{\sum_{m=0}^n \frac{\cosh(\beta)}{N1}}{N2} \quad (2.26)$$

onde:

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{y}'}{2} \quad (2.27)$$

$$\beta = \frac{p \cdot (x' - 2 \cdot m \cdot c')}{2} \quad (2.28)$$

$$N1 = \sinh^2(\mathbf{b}) - \sin^2(\mathbf{a}) \quad (2.29)$$

$$N2 = \sum_m \ln \left( \frac{\cosh(\mathbf{g}) + \cos(\mathbf{d})}{\cosh(\mathbf{g}) - \cos(\mathbf{d})} \right) \quad (2.30)$$

$$? = p \cdot m \cdot c' \quad (2.31)$$

$$d = \frac{p \cdot r'_{se}}{2} \quad (2.32)$$

$$x' = \frac{x}{s} \quad (2.33)$$

$$y' = \frac{y}{s} \quad (2.34)$$

$$2c' = \frac{2c}{s} \quad (2.35)$$

$$r'_{se} = \frac{r_{se}}{s} \quad (2.36)$$

Porém, estas equações desconsideram a existência de carga espacial no precipitador, o que, de acordo com Abdell-Sattar (1993), torna o campo muito longe do real, pois o efeito da carga espacial é fundamental. Com o intuito de minimizar esta hipótese, Riehle (1997) propôs a adoção de uma carga espacial homogênea ao longo do precipitador, deduzida por Coopermam (1960). Neste método o campo é obtido através do cálculo do mesmo na ausência de carga, seguido pela adição do efeito da carga espacial, como observado nas Equações (2.37) a (2.41).



$$E'(x', y') = \frac{E(x', y')}{E_{ps}} \quad (2.37)$$

$$E'_f(x', y') = E'(x', y') + j' \cdot 2c' \cdot \ln\left(\frac{d}{r_{se}}\right) \cdot \frac{y'}{p} \quad (2.38)$$

onde:

$$j' = \frac{j}{\frac{\epsilon_0 \cdot b_i \cdot V^2}{s^3}} \quad (2.39)$$

$$d = 0,18 \cdot 2c' \cdot e^{\left(2,96 \frac{s}{2c}\right)} \quad 0,3 \leq s/2c \leq 1 \quad (2.40)$$

$$d = \frac{4 \cdot s}{p} \quad s/2c \leq 0,3 \quad (2.41)$$

na qual,

$b_i$  é a mobilidade elétrica dos íons;

$\epsilon_0$  é permissividade elétrica do vácuo.

A diferença de potencial ( $V_0$ ) necessária para suprir o campo elétrico no qual se inicia a descarga corona está representada na relação típica entre a corrente e a tensão, mostrada na Figura 2.7. Com o aumento da diferença de potencial aplicada, há uma grande elevação da corrente, que continua até que ocorra o rompimento elétrico do gás. Neste ponto, o gás torna-se um condutor elétrico. A diferença de potencial é, então, denominada crítica ( $V_{cr}$ ) e representa o limite máximo de operação do precipitador.

A diferença de potencial de início da corona é essencialmente dependente da configuração do precipitador utilizado e será função, de acordo com Riehle (1997), do raio do eletrodo de descarga ( $r_{se}$ ), do espaçamento entre eles ( $2c$ ) e

também da distância entre as placas de coleta ( $2s$ ), parâmetros representados na Figura 2.8.

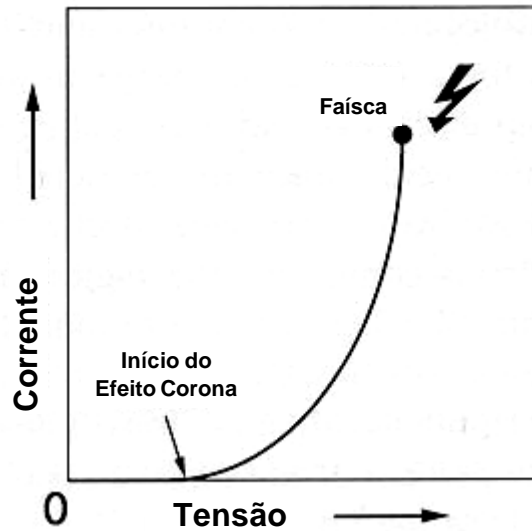


Figura 2.7 – Relação típica corrente-tensão (Riehle, 1997).

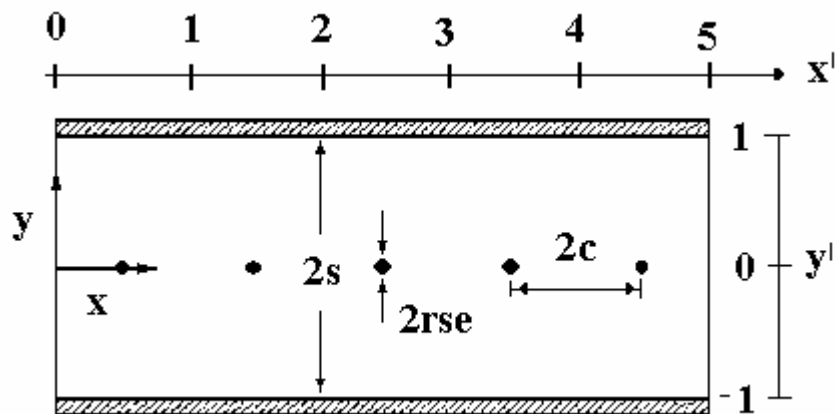


Figura 2.8 – Representação das dimensões características da configuração placa-fio (Riehle, 1997).

Vários são os fatores que influenciam as condições elétricas de operação, como por exemplo, a temperatura e a pressão, que estão intimamente ligadas à

densidade do gás, modificando o campo em que se inicia a corona (Oglesby e Nichols, 1978). Estas variáveis também alteram a mobilidade elétrica dos íons, variando, por consequência, a corrente elétrica (Riehle, 1997).

A corrente também é modificada pela concentração de partículas. Como observou White (1963), altas concentrações na entrada dos precipitadores causam a diminuição da corrente e, dependendo das condições, podem até extingui-la. As partículas quando se depositam sobre o fio podem alterar o diâmetro do mesmo, causando queda da diferença de potencial elétrico e diminuição da corrente.

A relação corrente-tensão também é alterada pelo formato do eletrodo de descarga, de acordo com Jedrusik et al. (1997), e pelo espaçamento entre eles, como visto por Miller et al. (1998).

#### **2.2.4 Carregamento Elétrico das Partículas**

Um fator fundamental na precipitação eletrostática é o processo de carregamento das partículas. Estas necessitam serem carregadas para que o campo elétrico as dirija às placas, a fim de serem coletadas. A remoção das partículas depende da lei de Coulomb, sendo proporcional à intensidade do campo elétrico aplicado e à magnitude da carga adquirida pela partícula.

O processo de carregamento pelo efeito corona, segundo Oglesby e Nichols (1978) pode ocorrer por dois mecanismos, o carregamento por campo e por difusão. O carregamento por campo é predominante para partículas com diâmetro acima de  $1,0 \mu\text{m}$  e, o carregamento por difusão, para menores que  $0,4 \mu\text{m}$ . Na faixa compreendida entre estes valores, ambos os mecanismos apresentam efeitos significativos.

O mecanismo de carregamento por campo, definido de acordo com Oglesby e Nichols (1978), ocorre devido ao movimento ordenado dos íons sob a influência do campo elétrico aplicado, que resulta na colisão entre os íons e as partículas suspensas no gás, carregando-as. Com a diminuição do tamanho da partícula, acentua-se a importância do carregamento por difusão, que depende, de acordo com Reist (1993), de dois mecanismos: o encontro direto dos íons com as partículas através da difusão e a atração dos mesmos pela força dipolo-imagem.

Dentre as correlações propostas na literatura para o cálculo da carga adquirida pelas partículas, uma das mais utilizadas é aquela apresentada nas Equações 2.42 a 2.47. Ela foi adotada por Gooch e Francis (1975); Medlin et al. (1998) e Kim e Lee (1999) e representa os dois mecanismos de carregamento separadamente e na forma diferencial.

$$\frac{dq_{pf}}{dt} = \frac{q_s}{t_f} \left( 1 - \frac{q_p}{q_s} \right) \quad (2.42)$$

$$\frac{dq_{pd}}{dt} = \frac{q^*}{t_d} \left( 1 - \frac{q_p}{q^*} \right) \quad (2.43)$$

$$q_s = \frac{12p e_0 E (d_p/2)^2}{e_r + 2} \quad (2.44)$$

$$t_f = \frac{4 e_0}{\mu_i b_i} \quad (2.45)$$

$$q^* = \frac{4p e_0 k T (d_p/2)}{e} \quad (2.46)$$

$$t_d = \frac{4 \cdot e_0 \cdot k \cdot T}{N \cdot e \cdot c_i \cdot d_p/2} \quad (2.47)$$

na qual,

$q_s$  é a carga de saturação para o carregamento por campo;

$q^*$  é a carga de saturação para o carregamento por difusão;

$\tau_f$  é a constante de tempo para o carregamento por campo;

$\tau_d$  é a constante de tempo para o carregamento por difusão;

$t$  é o tempo;

$E$  é o campo elétrico aplicado;

$\epsilon_r$  é a constante dielétrica do material;

$e$  é a carga elementar;

$k$  é a constante de Boltzmann;

$T$  é a temperatura;

$c_i$  é a velocidade térmica do íon;

$N$  é a concentração de íons.

A velocidade térmica do íon pode ser estimada através da Equação (2.48)

(Adachi et al., 1985).

$$c_i = \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T}{p \left( \frac{M}{N_a} \right)}} \quad (2.48)$$

na qual,

$M$  é a massa molar do íon;

$N_a$  é o número de Avogadro.

A concentração de cargas no meio gasoso é de difícil determinação. Porém Riehle (1997) propõe uma aproximação para o cálculo deste parâmetro (Equação 2.49), que é função da configuração do precipitador utilizado. Esta equação é igual a proposta por Kirsch e Zagnit'ko (1981 apud Adachi et al., 1985), com a única modificação de que esta última é dada em número, através da divisão da equação pela carga elementar (e).

$$N = \frac{i}{E A_{NE} b_i} \quad (2.49)$$

na qual,

$i$  é a corrente elétrica;

$A_{ne}$  é a área de coleta do precipitador.

Fuchs (1971 apud Reist, 1993) afirma que as equações para o carregamento propostas até então eram válidas para partículas maiores que 0,2  $\mu\text{m}$ . Porém, para partículas menores, o erro pode ser significativo. Para resolver este problema, modelos foram propostos como o de Fuchs (1964) e o de Hoppel (1977 apud Reist, 1993). Entretanto, o autor afirma que estes modelos são complicados e de difícil aplicação.

Segundo Hussin et al (1983), Reischl et al. (1996) e Alonso et al. (1997), a equação que melhor representa a probabilidade de carregamento de partículas na faixa nanométrica é a equação de Fuchs (1963), apresentando boa concordância com os valores experimentais para valores até 3 nm. Ela também é eficiente ao

descrever o mesmo efeito para partículas entre 0,1 a 2,0  $\mu\text{m}$  (Porstendörfer et al., 1977 apud Hussin et al., 1983).

A equação de Fuchs determina a probabilidade de uma partícula esférica adquirir carga em um meio com fluxo permanente de íons de ambas as cargas e foi desenvolvida baseada no modelo da esfera limitante proposto por este mesmo autor. Este modelo prevê uma esfera hipotética, concêntrica à partícula, porém com um caminho livre médio maior que o raio da partícula. Fora desta esfera, o fluxo de íons se move em um meio considerado contínuo e uma vez dentro deste limite, o meio transforma-se em vácuo. A partir deste modelo, Fuchs obteve a equação para cálculo da probabilidade de carregamento da partícula (Reischl et al., 1996). Adachi et al. (1985) apresentam uma modelagem para o carregamento unipolar baseada na teoria de Fuchs (1963), Equações 2.50 a 2.54, e no processo de carregamento por difusão proposto por Boisdron e Brock (1970), dado pelas Equações 2.50 e 2.51.

$$\frac{n_0}{n_T} = e^{(-\gamma_0 \cdot N \cdot t)} \quad (2.50)$$

$$\frac{n_p}{n_T} = \left( \prod_{k=0}^{p-1} \gamma_{pk} \cdot N \right) \cdot \sum_{j=0}^p \frac{e^{(-\gamma_{pj} \cdot N \cdot t)}}{\prod_{\substack{l=0 \\ l \neq j}}^p (\gamma_{pl} - \gamma_{pj}) \cdot N} \quad (2.51)$$

$$\gamma_p = \frac{p \cdot c \cdot a \cdot d^2 \cdot e^{\left(\frac{f(d)}{k \cdot T}\right)}}{1 + e^{\left(\frac{f(d)}{k \cdot T}\right)} \cdot \frac{c \cdot a \cdot d^2}{4 \cdot D \cdot r_p} \cdot \int_0^{r_p} e^{\left(\frac{f\left(\frac{r}{x}\right)}{k \cdot T}\right)} \cdot dx} \quad (2.52)$$

$$f(r) = \frac{pe^2}{4 \cdot p \cdot e_0 \cdot r} - \frac{e_1 - 1}{e_1 + 1} \cdot \frac{e^2}{8 \cdot p \cdot e_0} \cdot \frac{r_p^3}{r^2 \cdot (r^2 - r_p^2)} \quad (2.53)$$

$$d = \frac{r_p^3}{z_i^2} \cdot \left[ \frac{1}{5} \cdot \left( 1 + \frac{z_i}{r_p} \right)^5 - \frac{1}{3} \cdot \left( 1 + \frac{z_i^2}{r_p^2} \right) \cdot \left( 1 + \frac{z_i}{r_p} \right)^3 + \frac{2}{15} \cdot \left( 1 + \frac{z_i^2}{r_p^2} \right)^{\frac{5}{2}} \right] \quad (2.54)$$

nas quais,

$n_0$  é a concentração das partículas neutras;

$n_p$  é a concentração das partículas carregadas;

$n_T$  é a concentração total de partículas;

$\eta_p$  é o coeficiente de combinação entre o íon e a partícula;

$\eta_0$  é o coeficiente de não combinação entre o íon e a partícula;

$D$  é o coeficiente de difusão do íon;

$r_p$  é o raio da partícula;

$r$  é a distância entre o íon e o centro da partícula;

$\delta$  é o raio da esfera limitante;

$\alpha$  é a fração de íons atingindo a partícula;

$\varphi$  é o potencial eletrostático;

$x$  é igual a razão entre  $r_p$  e  $r$ ;

$\lambda_i$  é o caminho livre médio do íon (colisão íon-molécula de gás);

$p$ ,  $l$  e  $j$  são as cargas adquiridas.

As propriedades dos íons necessárias para a resolução das equações para carregamento das partículas podem ser obtidas através das Equações 2.55 e 2.56 propostas por Kennard (1938) e Pui (1976 apud Adachi et al., 1985).



$$D = \frac{k \cdot T \cdot b_i}{e} \quad (2.55)$$

$$\alpha_i = 1,329 \cdot \frac{b_i}{e} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T \cdot M \cdot M_{ar}}{(M + M_{ar}) \cdot N_a}} \quad (2.56)$$

nas quais,

$M_{ar}$  é a massa molar do ar.

De acordo com Natanson (1960 apud Reischl et al., 1996),  $\alpha$  é função da trajetória mínima que evita a captura do íon pela partícula ( $b_{min}$ ), de acordo com a Equação 2.57, na qual  $r_a$  é a distância “apsoidal”, que representa a órbita crítica do íon para ser capturado ou não pela partícula. Fuchs (1963 apud Reischl et al., 1996) assumiu nos seus cálculos que a probabilidade  $\alpha$  era igual a 1, de forma a garantir encontros efetivos. Porém, para partículas menores que 10 nm os valores de  $\alpha$  são menores que a unidade segundo Hoppel e Frick (1986 apud Reischl et al., 1996).

$$a = \left( \frac{b_{min}}{d} \right)^2 \quad (2.57)$$

$$b^2 = r_a^2 \cdot \left( 1 + \frac{2}{3 \cdot k \cdot T} \cdot (j(d) - f(r_a)) \right) \quad (2.58)$$

O carregamento das partículas pequenas é um fenômeno difícil de ocorrer. Hussin et al (1983) observaram que, quando se faz um carregamento bipolar, as partículas com 30 nm têm 40% de probabilidade de adquirir carga. Porém, com a redução do tamanho para 4,5 nm, essa probabilidade cai para 5%, sendo as

maiores probabilidades obtidas quando os íons que promovem o carregamento são negativos. No carregamento bipolar ocorre tanto o carregamento quanto a neutralização das partículas e essa competição entre os fenômenos faz com que este tipo de carregamento seja menos eficiente que o unipolar. Hernandez-Sierra et al. (2003) mediu a carga adquirida pelas partículas neutras quando submetidas a um carregamento unipolar através da geração do efeito corona e observou uma porcentagem de 30% de carregamento para partículas de 10 nm, muito maior que o outro método que obteve aproximadamente 6%.

## **2.2.5 Coleta das Partículas**

### **2.2.5.1 Velocidade de migração das partículas**

De acordo com Oglesby e Nichols (1978), sob a influência do campo eletrostático, uma partícula migrará em direção à placa coletora, com uma velocidade dependente da magnitude da força eletrostática e da força de arraste do gás sobre a mesma. Muitos outros fatores envolvem a coleta de partículas, porém, para facilitar a análise do fenômeno, não são introduzidos na relação entre a eficiência de remoção e os parâmetros do precipitador.

Para caracterizar o movimento das partículas, Riehle (1997) apresenta um balanço geral de forças que agem nas partículas, sendo consideradas forças atuantes: a elétrica ( $F_e$ ) e a de arraste ( $F_w$ ). A força gravitacional é muito pequena quando comparada às demais e foi desprezada. A força de arraste foi especificada para baixos valores do número de Reynolds ( $Re$ ), típicos para partículas menores

de 20  $\mu\text{m}$ , comumente utilizadas nos precipitadores, sendo determinada pela lei de Stokes, considerando-se partículas esféricas.

Como resultado deste balanço, a velocidade atingida pela partícula no estado estacionário é representada pela Equação 2.59 e também denominada velocidade teórica de migração ( $w_{th}$ ).

$$w_{th} = \frac{Q_p \cdot E}{k_d} \quad (2.59)$$

### 2.2.5.2 Modelos para a determinação da eficiência de remoção das partículas

A coleta de partículas carregadas ocorre quando estas se movem próximas à placa coletora, de forma que possam ser capturadas pela força elétrica, como apresentado na Figura 2.9.

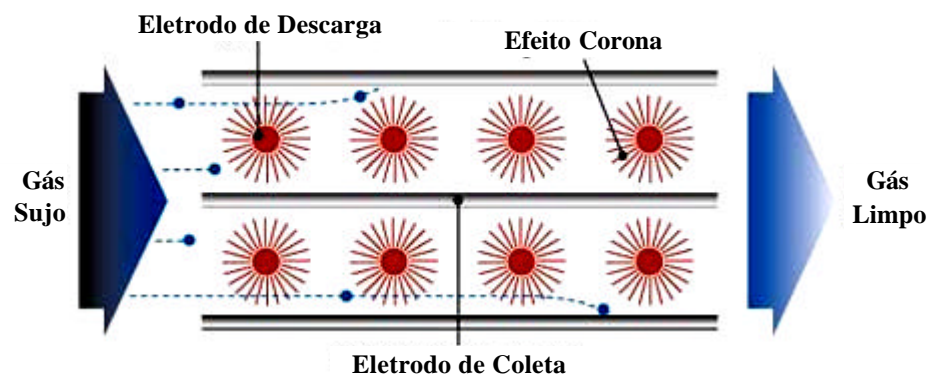


Figura 2.9 – Representação da remoção da partícula da corrente gasosa ([www.powerspancorp.com](http://www.powerspancorp.com)).

A trajetória das partículas é determinada pela combinação da influência do campo elétrico e da vazão do gás sobre as mesmas, além do efeito do vento corona, que causa uma vazão secundária devido à ação do campo elétrico sobre os íons e partículas carregadas (Lind, 1997; Blanchard et al., 2001). Segundo White

(1963), quando consideradas partículas maiores, o campo elétrico exerce grande influência, enquanto que, para as menores, a vazão é o fator de maior importância.

O comportamento da eficiência de remoção, em função do diâmetro das partículas, apresenta um ponto de mínimo, conforme pode ser visto na Figura 2.10.

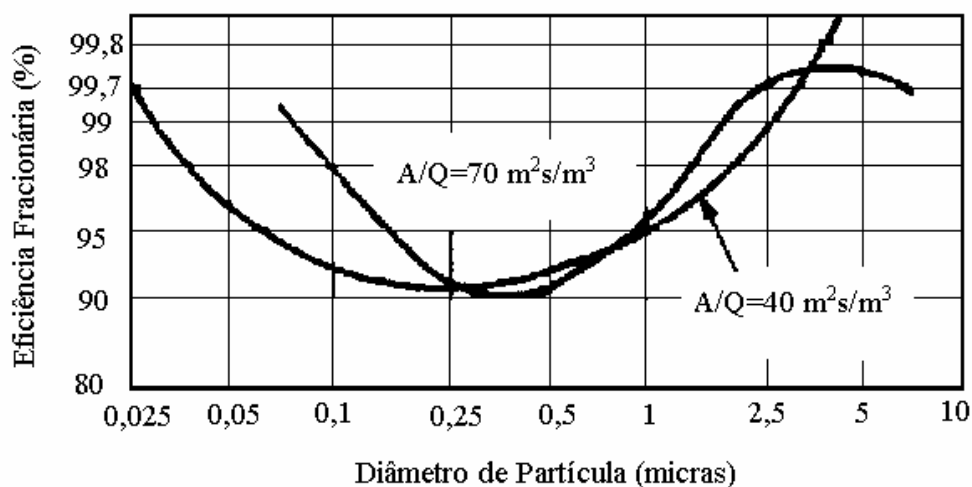


Figura 2.10 – Eficiência fracionária em função do diâmetro das partículas para diferentes áreas específicas de coleta (Mizuno, 2000).

Segundo Mizuno (2000), isto ocorre para os diâmetros entre 0,1 e 1,0  $\mu\text{m}$  e em decorrência da velocidade teórica de migração ser proporcional à carga das partículas, bem como ao fator de correção de Cunningham. Este fator de correção apresenta valores altos para as partículas pequenas e tende a 1 para as partículas maiores, enquanto que a carga aumenta com o tamanho das mesmas. Outro fator que aumenta a eficiência de remoção das partículas finas, segundo Flagan e Seinfeld (1988), é que elas apresentam mobilidades elétricas mais altas, compensando a baixa carga das mesmas.

Atualmente, existem algumas equações para a determinação da eficiência de coleta no precipitador eletrostático, porém a equação de Deutsch, também conhecida como de Deutsch-Anderson, desenvolvida no começo do século passado, é ainda bastante utilizada nos dias de hoje (Oglesby e Nichols, 1978). Ela é apresentada pela Equação 2.60.

$$h_{dpi} = 1 - \exp\left(-\frac{w_{th} \cdot L_{ne}}{v \cdot s}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{w_{th} \cdot A_{ne}}{\dot{V}}\right) \quad (2.60)$$

na qual,

$\eta_{dpi}$  é a eficiência de remoção da partículas de diâmetro  $d_{pi}$  (eficiência fracionária);

$\dot{V}$  é a vazão volumétrica;

$\frac{A_{ne}}{\dot{V}}$  é definida como área específica de coleta.

O modelo proposto por Deutsch assume que as partículas estão homogeneamente distribuídas na corrente gasosa devido à turbulência do escoamento e só são coletadas quando atingem a região de escoamento laminar, próxima ao eletrodo de coleta, onde são direcionadas para a placa coletora pela força elétrica, que domina o transporte nessa região (Vincent, 1980).

O transporte de partículas em um precipitador é muito mais complexo que o proposto por Deutsch, devido ao fato do campo elétrico que controla o processo ser função da posição, e devido também aos efeitos da difusão das partículas (Kihm et al., 1985). Leonard et al (1980), assim como Riehle (1997), sugerem

uma deficiência na equação de Deutsch em relação aos valores da eficiência fracionária obtida em seus experimentos. Com base nessa deficiência, novos modelos para a determinação da eficiência foram desenvolvidos de forma que algumas hipóteses simplificadoras assumidas por Deutsch fossem minimizadas, aproximando-se mais da realidade. Assim, modelos como o de Cooperman (1970), Leonard et al. (1982), Zhibin e Guoquan (1992) e Nóbrega (2002) introduzem na equação a difusividade das partículas, com o intuito de tornar o transporte das mesmas no precipitador mais próximo do real aperfeiçoando e refinando a técnica de precipitação (Kim e Lee, 1999). Entretanto, Zhao e Pfeffer (1996) enfatizam a dificuldade de aplicar muitas das correlações existentes, em virtude das suas complexidades e eventuais constantes empíricas.

O modelo desenvolvido por Zhibin e Guoquan (1992, 1994) que introduz a influência da turbulência está representado na Equação (2.61).

$$h_{dpi} = 1 - \frac{\sqrt{Pe}}{2 \cdot s \cdot \sqrt{p} \cdot De} \cdot \int_0^s \exp \left[ -\frac{Pe}{4 \cdot De} \cdot \left( \frac{y}{s} - De \right)^2 \right] dy \quad (2.61)$$

$$De = \frac{w_{th} \cdot L_{ne}}{v \cdot s} \quad (2.62)$$

$$Pe = \frac{w_{th} \cdot s}{D_{pi}} \quad (2.63)$$

na qual,

De é o número de Deutsch;

Pe é o número de Peclet;

D<sub>pi</sub> é a difusividade da partícula, em m<sup>2</sup>/s.

De acordo com Kim e Lee (1999) o que melhor se ajustou aos seus dados experimentais foi o modelo de Zhibin e Guoquan, quando utilizada a Equação 2.64 para o cálculo da difusividade.

$$D_{pi} = D_t + D_b \quad (2.64)$$

$$D_b = \frac{k \cdot T}{k_d} \quad (2.65)$$

$$D_t = 0,12 \cdot v_t \cdot s \quad (2.66)$$

$$v_t = \sqrt{\frac{f_f \cdot v^2}{8}} \quad (2.67)$$

$$\frac{1}{f_f^{\frac{1}{2}}} = -1,8 \cdot \log\left(\frac{6,9}{Re}\right) \quad (2.68)$$

nas quais,

$D_t$  é a difusividade turbulenta;

$D_b$  é a difusividade Browniana;

$v_t$  é a velocidade de cisalhamento;

$f_f$  é o fator de atrito.

Nóbrega (2002), baseando-se no modelo de Zhibin e Guoquan (1992, 1994), expõe um novo perfil para a concentração de partículas no precipitador, o qual, ao contrário do de Zhibin e Guoquan, apresenta um aumento da mesma conforme ocorre uma aproximação às placas de coleta. A partir deste novo perfil, a autora obteve uma nova equação para o cálculo da eficiência do precipitador, apresentada na Equação 2.69.

$$h_{dpi} = 1 - \frac{\sqrt{Pe}}{De^{1.5}} \cdot \int_0^1 x \cdot \exp\left[-\frac{Pe}{4 \cdot De} \cdot (x - De)^2\right] dx \quad (2.69)$$

$$D_{pi} = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{d_p} \quad (2.70)$$

Este modelo ajustou-se muito bem aos dados experimentais obtidos pela autora, enfatizando que o perfil de concentração proposto é adequado e deve representar realmente o que ocorre no interior do equipamento.

Mais recentemente, Chang (2003) apresentou um estudo no qual está sendo desenvolvido um modelo numérico para implementação em um programa, aparentemente de grande valor prático, pois pretende fazer uma simulação de todo o processo de precipitação, facilitando o projeto destes equipamentos.

### 2.2.5.3 Outros fatores que influenciam a remoção das partículas

Os modelos desenvolvidos para a remoção de partículas são baseados em condições ideais de operação. Na prática, porém, muitos fatores interferem na eficiência de remoção das partículas, de forma que os modelos não possam ser aplicados ou apresentem valores muito longe dos reais. Alguns exemplos de condições práticas que fogem da idealidade dos métodos teóricos são: o efeito corona reversa (Thanh, 1979a,b; Patel et al., 1985; Bapat, 2001) e a ressuspensão de partículas na corrente gasosa (Basset et al., 1977).

Além destes fatores, a eficiência fracionária também é afetada pela uniformidade do escoamento gasoso (White, 1963), pelo vento corona (Shaughnessy et al., 1985; Lind, 1997), pela forma de fornecimento de diferença de



potencial (Macaire e Martin, 1997; Rugg et. al., 1982) e pela seccionalização da tensão fornecida (Reyes, 1997).

Maiores detalhes sobre a influência destes parâmetros na eficiência de remoção do precipitador, bem como no mecanismo de funcionamento do equipamento, podem ser encontrados em Falaguasta (2001) e Nóbrega (2002).

### **2.3 Linha de Pesquisa em Precipitadores Eletrostáticos do Departamento de Engenharia Química da UFSCar**

O Laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, no qual foi desenvolvido este trabalho, possui uma linha de pesquisa em precipitadores eletrostáticos. O estudo envolvendo este tema é recente neste grupo, iniciou-se em 1998, com o trabalho de doutorado da pesquisadora Nóbrega. Este trabalho, concluído em 2002, abordou o efeito dos parâmetros operacionais e de projeto na eficiência fracionária de remoção de um precipitador do tipo placa-fio.

Concomitantemente a esta pesquisa, foi realizado um trabalho de mestrado pela aluna Falaguasta (2001), que visava um estudo da ampliação de escala de tal equipamento. O objetivo foi determinar um parâmetro elétrico de operação a ser mantido constante de forma a se obter a mesma eficiência de remoção das partículas em precipitadores de diferentes tamanhos em escala de laboratório

Em seus estudos, Nóbrega (2002) observou que os modelos propostos na literatura não se ajustavam aos seus dados experimentais, e que isto poderia ser consequência do perfil de concentração proposto. Esta questão motivou o trabalho de mestrado de Cerda (2004), que estudou o perfil de concentração em um

precipitador do tipo placa-fio e concluiu que, no início do equipamento, a concentração é maior no centro e depois tende a ficar constante, com ligeiro aumento perto das placas.

O presente trabalho está inserido nesta linha de pesquisa e pretende contribuir para o desenvolvimento do grupo, dando continuidade às pesquisas realizadas neste tema, através de um estudo que verifique a eficiência do equipamento em questão em remover partículas muito pequenas, que provocam tantos males à saúde humana.

#### **2.4 Remoção de Partículas Finas pelo Precipitador**

Como apresentado anteriormente, faz-se necessária a remoção das partículas finas, uma vez que as mesmas causam vários danos à saúde humana e ao meio ambiente. Um meio para realizar tal operação é através do emprego do precipitador eletrostático. Contudo, poucos são os trabalhos presentes na literatura que abordaram este assunto, a maioria recentes.

Uma das limitações deste equipamento é que sua eficiência, quando analisada em números de partículas, é bem mais baixa que a obtida quando a base é mássica. Este fato ocorre devido à grande penetração das partículas submicrométricas, como observado por Riehle e Löffler (1992a), Zukeran et al. (1997), Arnosti Jr. et al (2001), Laitinen et al. (1996), Jaworek et al. (1996). Hoferer et al (1999) explicam este fato como decorrente do baixo nível de carregamento das partículas, o que causa uma baixa força elétrica e menor mobilidade.

Laitinen et al (1996) propuseram a aglomeração das partículas, ou seja, a coagulação das partículas finas, de modo a formar partículas maiores, para posterior coleta no precipitador, como um meio de aumentar a remoção e diminuir o tamanho do equipamento necessário para atingir tal eficiência. Para conseguirem empregar a técnica de aglomeração, utilizaram a corrente alternada como mecanismo para causar a oscilação das partículas, que, quando em contato com o campo elétrico formado, aglomeravam-se. Os autores trabalharam com partículas geradas a partir de óleo vegetal, com diâmetro médio de 0,2  $\mu\text{m}$ . Este método também foi empregado por Lackowski (2001). Segundo o autor, o movimento oscilatório aproxima mais as partículas dos íons e melhora o carregamento.

Kanazawa et al (1993) realizaram testes experimentais, utilizando o método de aglomeração das partículas num precipitador de dois estágios, no qual a parte de carregamento das mesmas era subdividido em duas partes, uma contendo corona positiva e outra negativa. As partículas se aglomeravam em função das cargas opostas. Os autores observaram um crescimento das partículas que chegou a dobrar o diâmetro médio das mesmas; como exemplo, houve um aumento de 0,55  $\mu\text{m}$  para uma faixa de 0,75 a 1,4  $\mu\text{m}$ , o que acarreta elevação da velocidade de migração.

Watanabe et al. (1995) também realizaram ensaios com a finalidade de aglomerar as partículas e aumentar a eficiência de remoção. Utilizaram um precipitador em estágio único do tipo placa-fio e antes dele instalaram a unidade que realizava a aglomeração. Esta consistia em dois eletrodos aterrados e dois submetidos a tensão, com uma corrente alternada imposta sobre uma contínua. A

corrente alternada faz com que aumente a oscilação das partículas, aumentando a aglomeração. Além disso, a tensão aplicada induz a força dipolo-imagem, o que também provoca maior aglomeração. Como resultado observaram que a quantidade de partículas abaixo de 1  $\mu\text{m}$  diminuiu em 20%, havendo aumento do diâmetro médio em até quatro vezes o seu tamanho inicial, elevando a eficiência do precipitador de 95 para 98%.

Laitinen et al (1996) concluíram que este método diminui a concentração das partículas finas, porém o resultado não é considerável para que seja instalado na indústria e ainda apresenta um alto custo. Desvantagens também foram observadas por outros pesquisadores: Peukert e Wadenpohl (2001) comentam que a aglomeração por carregamento bipolar não apresentou sucesso quando aplicada na indústria, enquanto Parker (2000) afirmou que os precipitadores que utilizam a aglomeração das partículas aumentam a eficiência de remoção, porém o custo é bem mais elevado que o dos equipamentos convencionais.

Além da finalidade de controle da poluição, os precipitadores podem, ainda, ser utilizados na recuperação de produtos que venham a ser gerados em meio gasoso e na forma nanométrica. Em alguns estudos encontram-se exemplos da aplicação do precipitador na recuperação de produtos de alto valor agregado, como no de Karthikeyan et al (1997a,b), Prost et al. (1998) e Deppet et al. (1996). Karthikeyan et al. (1997b) produziram nanopartículas de alumina e zircônia, num diâmetro de 1 a 50 nm, e conseguiram coletá-las com o uso do precipitador eletrostático. As dimensões do equipamento, do tipo placa-fio, foram 100x100x10 mm e o campo elétrico aplicado foi de 6 kV/cm. Conseguiram obter uma eficiência que variou entre 5 e 20%.

Dentre os trabalhos encontrados na literatura, no que se refere à remoção como forma de reduzir a contaminação atmosférica (Yoo et al., 1997; Hoferer et al., 1999; Okubo et al., 2001; Dumitran et al., 2000), somente aqueles que estudaram partículas bem pequenas serão detalhados.

Um estudo de remoção de partículas em escala piloto foi realizado por Yoo et al. (1997). O precipitador utilizado era do tipo placa-fio de duplo estágio, sendo que a região de carregamento era composta por três dutos que possuíam 6,0 cm de comprimento e 4,5 cm de largura, cujos eletrodos de descarga eram de 0,1 mm de diâmetro. A região de coleta consistia em células de 19,7 cm de comprimento, 13,5 cm de altura e 5,9 mm de largura. O material utilizado foi o NaCl, na forma de partículas que variavam de 30 a 200 nm. Foi utilizada, no experimento, a corona positiva, sendo a tensão da área de carregamento de 12 kV e, a da de coleta, de 6 kV. Os pesquisadores obtiveram elevadas eficiências de remoção, que variaram entre 93 a 99%, comprovando a viabilidade do emprego do precipitador eletrostático para tal finalidade.

Zukeran et al. (1999) estudaram o efeito da aplicação de tensão contínua e alternada na eficiência de remoção das partículas de incenso menores que 0,1  $\mu\text{m}$  e maiores que 10 nm, num precipitador do tipo placa-fio. O equipamento se dividia em duas seções com a mesma finalidade, sendo a primeira com 20 cm de comprimento e composta por dois fios, e a segunda, com 10 cm e um fio. Os fios possuíam diâmetro de 1,5 mm e o espaçamento entre as placas era de 5 cm.

Observaram que, com o aumento da concentração de entrada de  $6 \cdot 10^9$  para  $5 \cdot 10^{10}$  partículas/ $\text{m}^3$ , a eficiência diminuía, obtendo-se valores negativos. Os

autores creditam este fato à ressuspensão de partículas já coletadas ou à dissociação de aglomerados.

Nestes estudos, obtiveram eficiência por volta de 99%, quando trabalharam com a tensão contínua de 20 a 25 kV e concentração de  $6.10^9$  partículas/m<sup>3</sup>; para a concentração mais alta e tensão alternada de 30 kV, a eficiência foi de 90%.

Quando analisada a forma de fornecimento de tensão, a contínua apresentou maior eficiência de remoção que a alternada, na condição de menor concentração de partículas na entrada, de acordo com o estudo de Hoferer et al. (1999). Entretanto, para a concentração mais alta, o efeito da tensão alternada foi significativo, aumentando a coleta das partículas.

Já Zhuang et al. (2000) utilizaram o precipitador tubo-fio no processo em questão. Este consistia em um cilindro de 3 cm de diâmetro e 15 cm de comprimento, acrescido do eletrodo de descarga, com diâmetros de 0,3 e 0,5 mm, e operando em um e dois estágios. A tensão aplicada foi negativa e variou entre 0 e 10 kV. Utilizaram três materiais com diferentes resistividades para posterior comparação, sendo estes o NaCl, SiO<sub>2</sub> e a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com diâmetros entre 0,05 a 0,5 µm. Obtiveram eficiências que variavam de 50 a 90%, dependendo da tensão, tipo do precipitador e partículas utilizadas e observaram uma queda da eficiência com a diminuição do tamanho das partículas após 0,1 µm. Concluíram ainda que, para baixas resistividades, a coleta é menos eficiente em função do rápido descarregamento do material.

Huang e Chen (2001) verificaram a influência da polaridade da corona na remoção de partículas de 30 nm a 10 µm, bem como o efeito da vazão sobre a

mesma e observaram que a polaridade negativa possui uma penetração de partículas bem menor que a positiva para toda a faixa analisada. Os autores conseguiram eficiências maiores que 90% para a remoção de partículas nanométricas.

Assim como Zukeran et al. (1999), Marquard et al (2003) também avaliaram o efeito da concentração de partículas no fenômeno da precipitação e comprovaram o fato da redução da eficiência de remoção, com o aumento da concentração. Atribuíram isto a uma diminuição da corrente para uma mesma tensão aplicada, devido à diminuição dos íons livres com maior mobilidade elétrica que as partículas. Contudo, os autores perceberam que, para concentrações abaixo de  $5.10^6$  partículas/cm<sup>3</sup>, a concentração não tem efeito sobre a eficiência de remoção e que, quando a tensão aplicada é alta (8 kV), a queda na eficiência para as altas concentrações não é significativa, obtendo-se valores iguais a 98% para partículas de 45 nm e 96% para partículas de 75 nm.

Kulkarni et al. (2002), com o intuito de aumentar a eficiência de remoção das partículas ultrafinas pelo precipitador eletrostático, realizaram experimentos como o uso do raio X juntamente com o efeito corona. Os autores puderam observar que há um aumento considerável de eficiência, principalmente para as partículas abaixo de 60 nm. Atribuíram esse fato principalmente à maior ionização causada pelo efeito fotoelétrico, que aumenta o carregamento das partículas por difusão. Concluíram ainda que, ao contrário do emprego somente do efeito corona, com a utilização do raio X, em conjunto com o método anterior, a polaridade positiva apresenta eficiência maior que a negativa, devido ao fato dos

íons positivos permanecerem mais tempo na corrente gasosa, aumentando a probabilidade de carregamento das partículas.

Uma curva típica de eficiência de coleta do precipitador é apresentada por Parker (2000) e reproduzida na Figura 2.11, a partir da qual pode-se observar que o precipitador apresenta o ponto de mínimo, já comentado, para a faixa submicrométrica, mas que, com a diminuição do tamanho das partículas, a eficiência de remoção torna a cair.

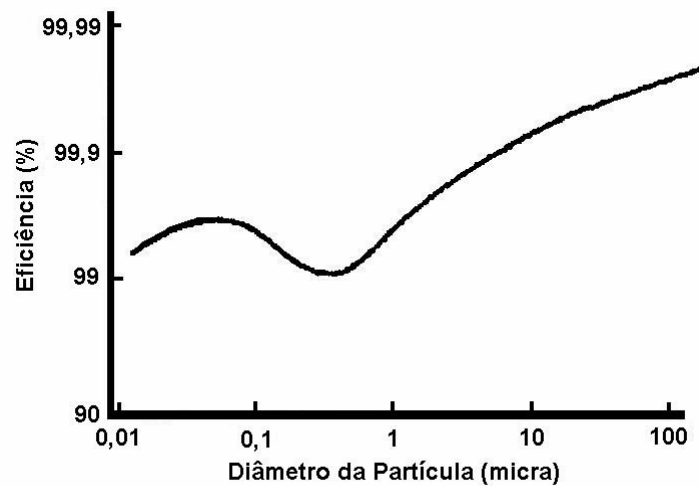


Figura 2.11 – Curva típica de eficiência para precipitador eletrostático (Parker, 2000)



### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Para a determinação da eficiência de remoção de partículas finas suspensas em meio gasosos, foi construída uma unidade experimental, que simulava uma contaminação, através da dispersão no ar de partículas e, posteriormente, a inserção de um precipitador eletrostático para removê-las da corrente gasosa. Esta unidade, bem como a metodologia aplicada, estão descritas nas seções seguintes.

#### **3.1 Unidade Experimental**

O estudo foi realizado em duas etapas. Na primeira, foi utilizado um material particulado, compreendido na faixa granulométrica correspondente ao  $PM_{2,5}$ , enquanto a segunda, foi realizada com o emprego de nanopartículas.

Muitos equipamentos foram utilizados concomitantemente nas duas etapas do desenvolvimento do trabalho. Estes estão apresentados a seguir, sendo os demais especificados em duas seções posteriores, cada uma referente à etapa estudada, contendo a descrição dos equipamentos próprios da etapa em questão, os materiais utilizados e o procedimento experimental.

##### **3.1.1 Equipamentos empregados nas duas etapas do trabalho**

###### **3.1.1.1 Precipitador eletrostático**

O precipitador eletrostático do tipo placa-fio (Figura 3.1) foi o equipamento de limpeza de gases utilizado neste trabalho. Construído em escala de laboratório, possui um único estágio, uma vez que esta forma é mais compacta

e mais utilizada industrialmente para tratar grandes vazões gasosas (Mizuno, 2000).

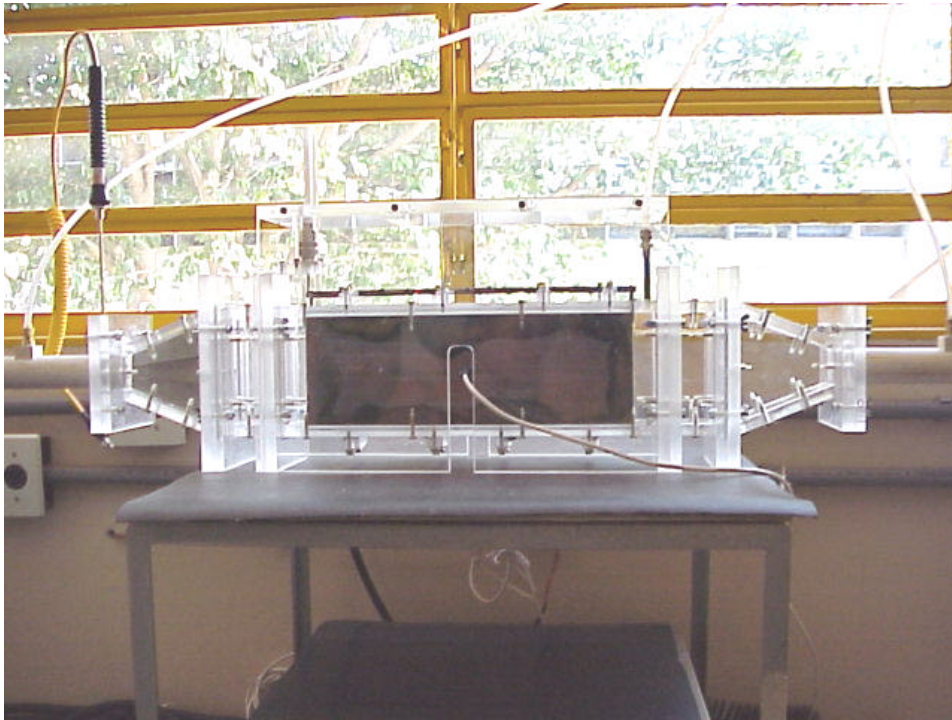


Figura 3.1 – Foto do precipitador com  $L_{ne}$  igual a 30 cm.

O precipitador foi projetado e construído tendo como base os modelos propostos nos trabalhos de Nóbrega (2002) e Riehle e Löffler (1992). Houve a preocupação, em sua concepção, de serem construídas partes que pudessem ser alteradas, de forma que fosse possível o estudo do efeito dos parâmetros geométricos na remoção das partículas. Tomou-se o cuidado, também, com o tamanho da unidade, de forma que o consumo de ar não fosse elevado, o que poderia acarretar uma concentração de partículas muito diluída ou a ultrapassagem da capacidade dos filtros de ar. Uma vista mais detalhada do equipamento é apresentada na Figura 3.2, na qual é mostrada uma das configurações utilizadas (vide Tabela 3.1).

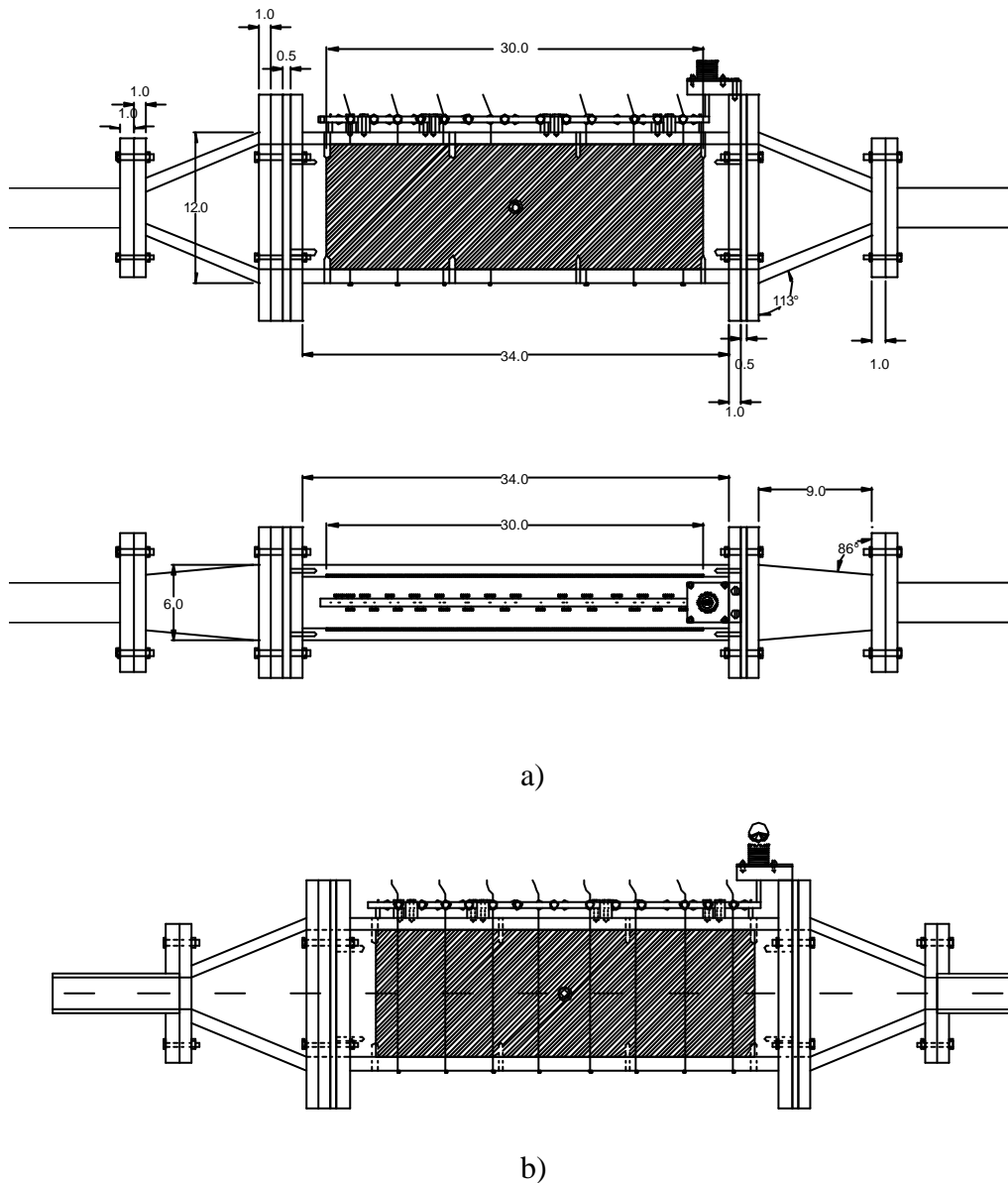


Figura 3.2 – Precipitador eletrostático a) Vista lateral e superior com cotas (cm) de uma das unidades utilizadas b) Corte axial

Para que fosse possível a avaliação do efeito do comprimento, foi necessária a construção de duas unidades centrais, os precipitadores propriamente ditos, que consistem cada um em uma caixa retangular, construída em acrílico, cujas paredes laterais são recobertas por placas de cobre. Estas paredes foram aterradas, de forma a funcionar como eletrodos de coleta, captando as partículas

em suspensão. A Figura 3.3 apresenta uma fotografia do precipitador utilizado nos ensaios experimentais, sem seus periféricos, destacando-se o conector para a fonte de alta tensão na sua parte superior esquerda (1) e, na direita, a tomada de pressão (2), para determinação da mesma no interior do equipamento. Além de apresentar, na sua parte lateral, o encaixe para o fio (3), cuja finalidade foi o aterramento da placa.

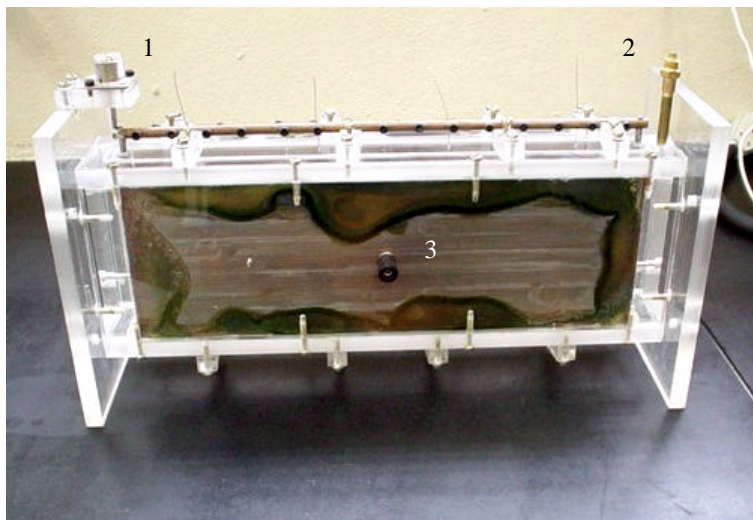
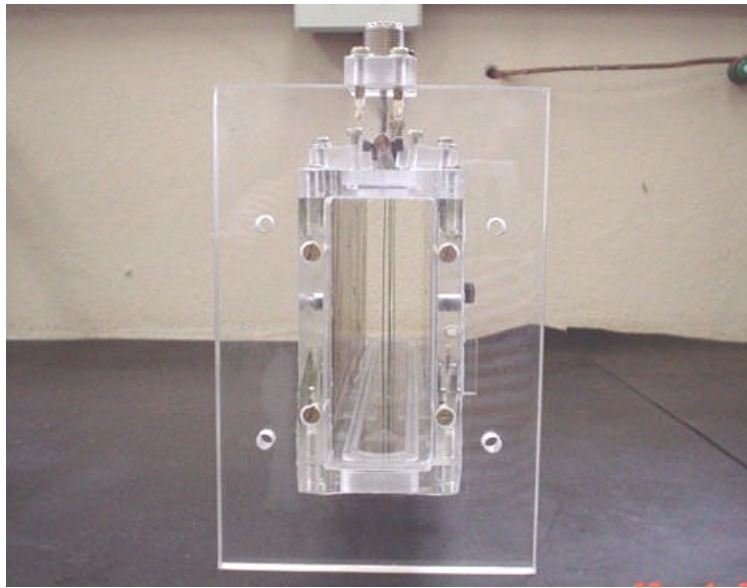
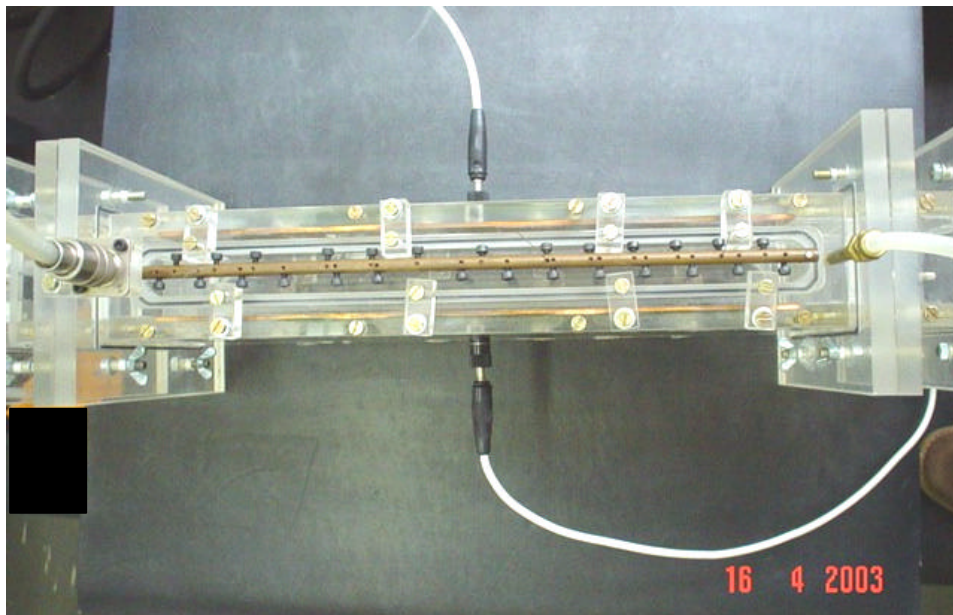


Figura 3.3 – Precipitador eletrostático sem os seus periféricos.

Os eletrodos de descarga, que geraram o campo elétrico necessário para o carregamento das partículas, vistos na Figura 3.4 a, foram posicionados igualmente espaçados, verticalmente, no interior da caixa, paralelos às placas de coleta. Foram feitos de cordas de aço inoxidável de diâmetros variados, para que o efeito do seu tamanho pudesse ser avaliado. Possuíam um dispositivo na sua extremidade para fixação dos mesmos à caixa do precipitador. O fio empregado na construção era da marca Fishtex, utilizado como artefato para pesca.



a)



b)

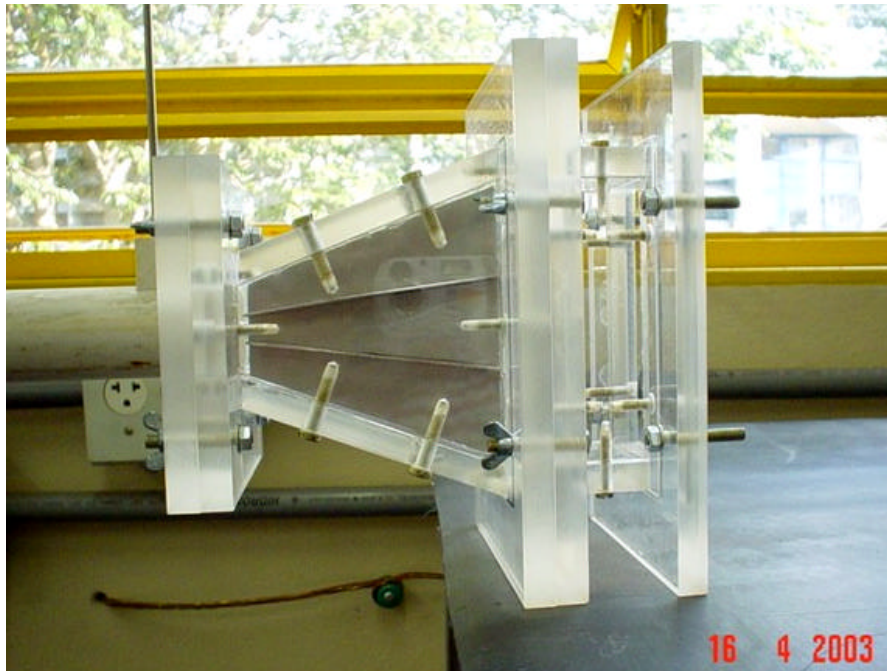
Figura 3.4 – Eletrodos de descarga: a) série de eletrodos no duto, b) vista do conector dos eletrodos ao cabo de alta tensão e dos fios de aterramento.

A ligação dos fios ao cabo de alta tensão foi realizada por uma barra de cobre, soldada ao conector do cabo e perfurada, possibilitando a passagem dos eletrodos e contato destes com a barra energizada. Estes foram fixados a ela por parafusos que estabeleciam o contato elétrico, como explicitado na Figura 3.4 b).

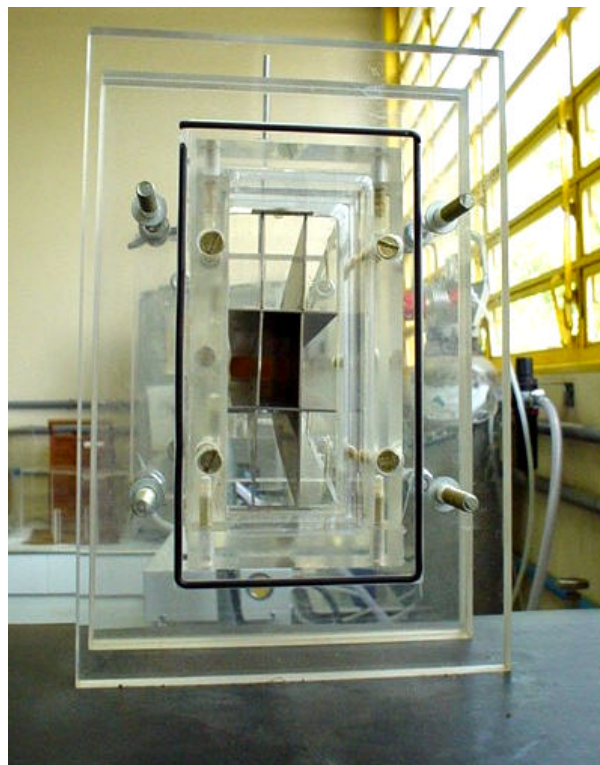
Visando à análise da influência do espaçamento entre os fios, foram realizados vários furos na barra de cobre, para que os eletrodos pudessem ser alterados no espaço. Em função dessa variação, o encaixe entre os fios e a caixa de acrílico teve que ser, também, mudado. Assim, devido à impossibilidade de serem feitos vários furos, que poderiam acarretar vazamentos, utilizou-se uma espécie de régua, ou pares de régua, que possuíam diferentes espaçamentos entre os fios e eram presas ao precipitador por travas parafusadas à caixa de acrílico e vedadas com o-ring, conforme Figura 3.4 b.

Uma caixa de acrílico foi colocada na parte superior do precipitador para evitar o contato com a região energizada, garantindo a proteção do operador, como pode ser observado na Figura 3.1 e, também com este intuito, a extremidade inferior dos eletrodos de descarga foi isolada com massa de calafetar.

A região de entrada do precipitador era composta por uma peça que tinha a forma de um tronco de pirâmide, com base retangular, conectada à caixa do precipitador, minimizando os efeitos de entrada do gás, como visto na Figura 3.5 a. Dentro da peça foi fixada uma grade de metal, com o mesmo formato, (Figura 3.5 b, cuja função era promover a distribuição de gás, para uma melhor uniformidade do escoamento dentro do equipamento.



a)



b)

Figura 3.5 – Distribuidor de gás: a) vista lateral e b) vista frontal.

A unidade foi construída de forma que possuísse flexibilidade para que suas variáveis de projeto pudessem ser alteradas. A fim de que a área de coleta pudesse ser modificada, como mencionado anteriormente, foram construídos dois módulos com comprimentos diferentes, sendo os mesmos alternados na unidade principal, dependendo do teste a ser realizado. Foram utilizados dois diâmetros de fios (eletrodos de descarga) e, para maior amplitude da análise da influência dos parâmetros na eficiência, o espaço entre eles também foi variado. Assim, as principais dimensões do precipitador foram definidas e estão dispostas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dimensões do precipitador eletrostático.

Variáveis	Valores
$2s$ (cm)	4,00
$2r_{se}$ (cm)	0,045 e 0,025
$h_{ne}$ (cm)	10,00
$L_{ne}$ (cm)	30,00 e 15,00
$2c$ (cm)	2,00 e 4,00

### 3.1.1.2 Fonte de alta tensão

Os eletrodos foram energizados pela barra central, conectada através de um cabo à fonte de alta tensão (Figura 3.6). A fonte modelo SL1200, fabricada pela Spellman, forneceu tensão contínua, com a diferença de potencial variando



de 0 a 50 kV e corrente de 0 a 20 mA, podendo produzir, ainda, corrente corona positiva e negativa.

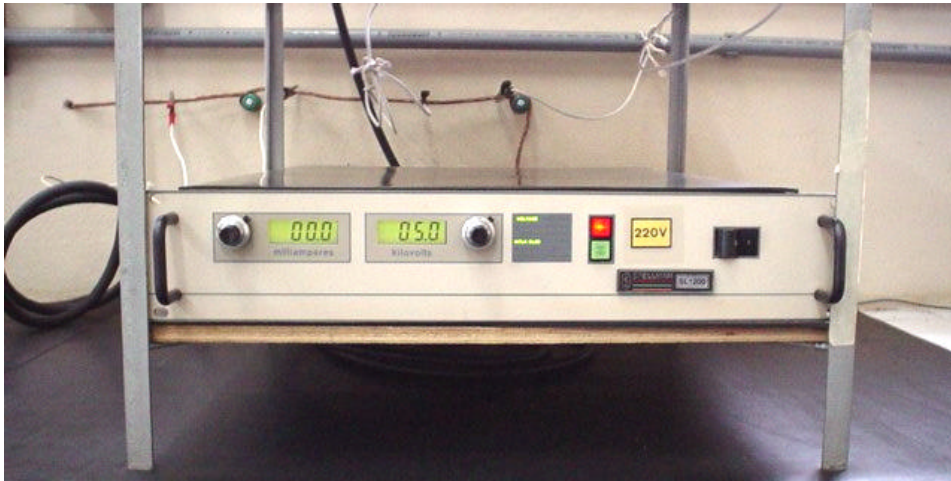


Figura 3.6 – Fonte de alta tensão.

### 3.1.1.3 Medidor de velocidade

A velocidade de escoamento do ar no precipitador foi controlada através de uma válvula agulha inserida no duto de entrada e de medidas realizadas num ponto de amostragem nesta mesma seção, com o emprego de um tubo de Pitot de 2 mm de diâmetro externo, acoplado a um micromanômetro da marca Furness Controls Limited, modelo FCO14 e calibrado com o emprego do Portable Pressure Calibrator, da mesma marca do micromanômetro e modelo PPC 500.

### 3.1.1.4 Medidor de temperatura

A temperatura é um parâmetro que influi na resistividade do material particulado e a mesma foi monitorada através do emprego de um termopar na

entrada da caixa do precipitador. A sonda do termopar foi do tipo K de 1,5 mm de diâmetro e o medidor digital empregado foi da marca Salvterm, modelo SK-5.

#### **3.1.1.5 Medidor de umidade**

Outro fator que influi na resistividade das partículas coletadas é a umidade do ar, que foi medida na saída do precipitador, utilizando-se uma sonda e medidor digital do jogo de equipamentos Tri-Sense, modelo 37000-90 da Cole-Parmer Instruments.

### **3.2 Etapa 1: Desempenho do Precipitador Operando na Remoção de Partículas Finas (PM<sub>2,5</sub>)**

#### **3.2.1 Unidade experimental**

O equipamento utilizado nesta etapa foi aquele descrito anteriormente, com a adição de um alimentador de partículas e de um sistema de amostragem, cuja finalidade foi a coleta do material particulado. Outras opções foram testadas, mas não apresentaram tão bons resultado quanto as aqui mostradas. Maiores detalhes sobre os testes podem ser encontrados no Apêndice A.

##### **3.2.1.1 Unidade experimental para remoção de partículas finas**

A amostragem para a determinação da eficiência de remoção do precipitador adotada nesta etapa foi a amostragem isocinética das concentrações de entrada e saída do precipitador. A amostragem foi feita através de uma sonda, apresentada na Figura 3.7, cujo diâmetro interno foi igual a 3 mm, sendo a velocidade do ar na mesma, igual à do ponto de amostragem.

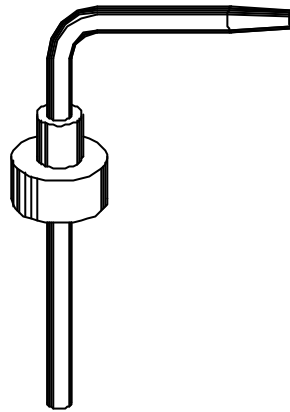


Figura 3.7 – Sonda de amostragem.

O sistema de filtração empregado está apresentado na Figura 3.8, sendo constituído por um suporte de filtro de teflon, com uma tela de 4,7 cm de diâmetro (Figura 3.9) e por uma bomba à vácuo de marca EDWARDS, modelo SPEEDVAC-2. Possuía, ainda, para que a vazão fosse exatamente a mesma do alimentador, um controlador de vazão da AALBORG, modelo GFC37, com faixa de leitura de 0 a 50 l/min, acoplado à bomba.

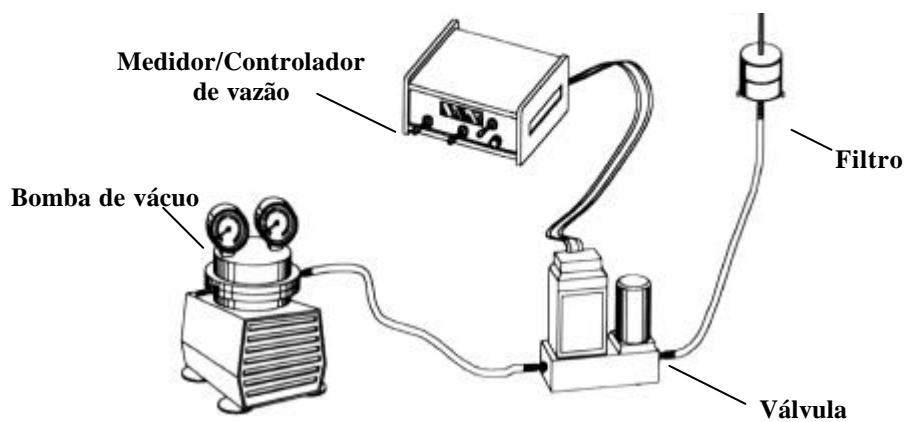


Figura 3.8 – Aparato para filtração.

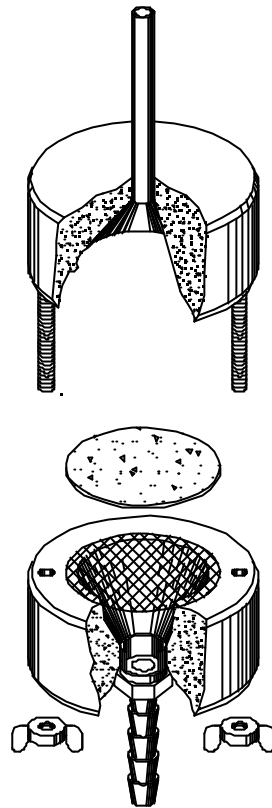


Figura 3.9– Suporte do filtro.

O meio filtrante consistia em um filtro de fibra de vidro da marca Gelman Sciences, Type A/E, que foi recortado para atender às dimensões da saída do suporte de filtração. O diâmetro dos poros estavam compreendidos entre 10,67 e 0,13  $\mu\text{m}$ , medidos através de um porosímetro a mercúrio da marca Quantachrome Poremaster, sendo o diâmetro médio igual a 3,55  $\mu\text{m}$ . Este tipo de filtro possui, de acordo com Celli (1999), eficiência de coleta de 99%, para partículas com tamanho igual a 0,2  $\mu\text{m}$ , o que o torna adequado à filtração de  $\text{PM}_{2,5}$ . Outra vantagem deste meio foi que seu limite de detecção correspondia exatamente ao menor tamanho do pó utilizado, como pode ser observado no item 3.2.2.

### 3.2.1.2 Alimentador de material particulado

O alimentador utilizado foi do tipo prato rotativo, que está representado na Figura 3.10. Consistia em um prato de aço inox com um sulco (3,5 mm de largura por 1,9 mm de profundidade), onde foi alimentado o material particulado. O prato foi acoplado a um motor de rotação variável, para que girasse a diferentes períodos, permitindo a obtenção de diferentes concentrações de material particulado. Assim que o pó atingia o ejetor era aspirado para a corrente gasosa, através de um Venturi e lançado dispersamente no duto, de forma que se obtivesse o aerossol a ser tratado.

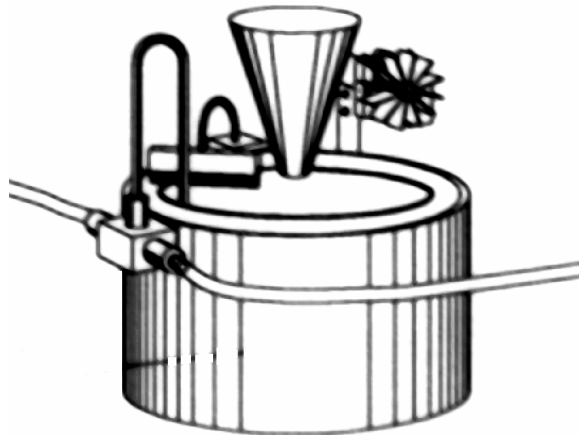


Figura 3.10 – Alimentador de material particulado.

Contudo, este equipamento foi sensível à aglomeração do material particulado, apresentando um tempo de uso muito pequeno para a realização dos ensaios, devido ao entupimento do ejetor com o material aglomerado. Para evitar este problema, o material foi seco em estufa e deixado em dessecador até atingir a temperatura ambiente. Este procedimento também não foi suficiente para garantir um tempo hábil para o término da corrida experimental.

O material particulado foi então alimentado em um sulco menor, (1,4 mm de largura por 0,7 mm de profundidade) de forma que a massa alimentada diminuísse. Além dessas precauções, foi também necessária a construção de uma caixa para o isolamento do material particulado e seu alimentador, na qual a umidade era mantida baixa e constante através do emprego de um desumidificador da marca Munters, modelo HC-300-EA, que injetava ar praticamente seco na caixa. Esta foi construída em metal e possuía a parte superior em vidro, funcionando como um visor. O acesso ao interior da caixa era possível através de dois orifícios, aos quais foi conectado um par de luvas plásticas, de forma que fosse mantido o isolamento e a umidade controlada.

### **3.2.1.3 Soprador**

O ar utilizado como gás de dispersão das partículas foi fornecido por um soprador IBRAM, com potência de 7,5 Hp. A vazão do ar foi controlada por um jogo de válvulas de forma a viabilizar a obtenção da vazão desejada no interior do precipitador.

### **3.2.1.4 Configuração final do equipamento**

A configuração final do equipamento utilizado nesta etapa, com seus periféricos está apresentada Figura 3.11.

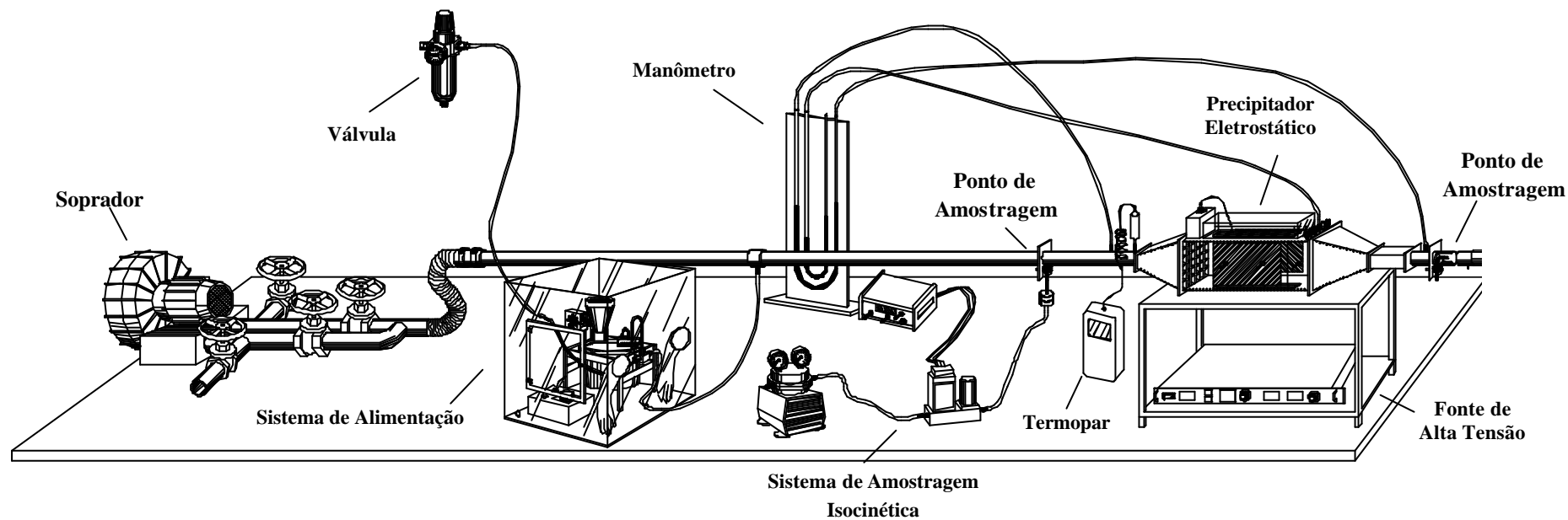


Figura 3.11 – Configuração final do equipamento.

### 3.1.1 Material Utilizado

Nesta etapa, utilizou-se como material particulado a alumina, cuja fórmula química é  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , com faixa granulométrica bastante fina. Este material foi fornecido pela Alcoa Alumínio S.A., com nome comercial de alumina calcinada A-1000 SG. O grau de pureza, segundo a empresa, é de 99,7%, sendo o maior contaminante (0,1%) o  $\text{Na}_2\text{O}$ . A distribuição granulométrica deste material polidisperso está apresentada na Figura 3.12, cuja análise foi realizada no SediGraph 5000 D, da Micromeritics no DEMA/UFSCar.

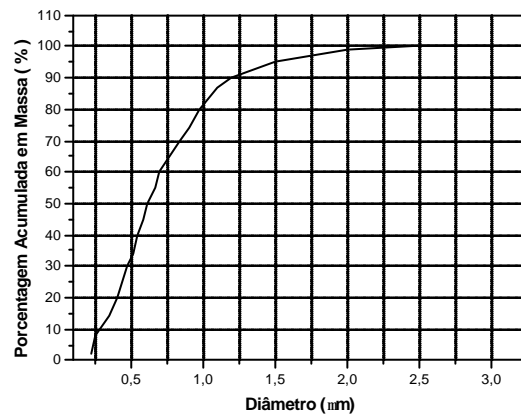


Figura 3.12 – Distribuição granulométrica acumulada da alumina utilizada neste trabalho e obtida no SediGraph 5000 D da Micromeritics.

Pela Figura 3.12, observa-se que o diâmetro mediano do material particulado é 0,6  $\mu\text{m}$ , sendo o menor e o maior diâmetro encontrado igual a 0,2 e 2,5  $\mu\text{m}$ , respectivamente, de forma que toda a faixa granulométrica desta alumina está contida no denominado  $\text{PM}_{2,5}$ .

Na Tabela 3.2 são apresentadas mais algumas características físicas do material utilizado, sendo que a densidade foi determinada através do picnômetro a



Hélio, a constante dielétrica ( $\epsilon_r$ ) fornecida por Lide (1977) e a resistividade ( $\rho$ ), pelo método proposto por Coury (1983) e apresentado no Apêndice B.

Tabela 3.2 – Constantes da alumina.

$r_p$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\epsilon_r$ (-)	$r$ (W·m)
3,6919	6,45	$3,85 \cdot 10^7$

### 3.1.2 Procedimento Experimental

#### 3.1.2.1 Determinação das curvas corrente-tensão para o precipitador

A primeira etapa da determinação da curva corrente-tensão do precipitador foi a montagem do mesmo na configuração a ser analisada, ou seja, com o tamanho das placas, diâmetros dos eletrodos de descarga e espaçamento entre eles adequados à condição desejada.

Em seguida, acionava-se o soprador e ajustava-se a vazão de ar através das válvulas, de acordo com o valor medido, utilizando-se o tubo de Pitot acoplado ao micromanômetro. Uma vez obtida a vazão desejada, de forma que a velocidade requerida fosse atingida, media-se a perda de carga com o emprego do mesmo micromanômetro. Nesta etapa, também era medida a umidade relativa do ar e a temperatura, tanto dentro do equipamento, quanto a ambiente.

Concluídas as leituras dos parâmetros de controle, ligava-se a fonte de alta tensão e aumentava-se gradualmente a tensão aplicada até que se iniciasse a passagem da corrente elétrica. O par de valores corrente-tensão era anotado. Posteriormente, a tensão era aumentada, e as variações, que a mesma causava na

corrente elétrica eram registradas, até que ocorresse o rompimento elétrico do gás, caracterizado pelo surgimento de centelhas no interior do equipamento.

Com os dados coletados podia-se construir a curva corrente-tensão e determinar os limites de operação do equipamento.

### **3.1.2.2 Calibração do alimentador de partículas do prato rotativo**

A calibração iniciava-se com a colocação do material particulado no alimentador e com a inserção de sílica, previamente seca em estufa, na caixa com umidade controlada. Em seguida, acionava-se o desumidificador. Aguardavam-se 2 horas para a estabilização da umidade no interior da caixa.

Abria-se, então, a válvula de ar comprimido e acionava-se o soprador, ajustando-se a vazão para o valor desejado.

Logo após, a válvula controladora de vazão era ligada, de forma que a amostragem de material particulado fosse isocinética. Anotavam-se as umidades na caixa, no equipamento e no ambiente e pesava-se o filtro a ser utilizado.

Uma vez pronta a unidade experimental, o alimentador era ajustado para a velocidade de referência do prato desejada e, em seguida, ligado. A sonda era inserida no duto do precipitador, a bomba de sucção ligada, e o filtro conectado à sonda, iniciando-se a filtração. Este processo durava 5 minutos, tempo hábil para coletar material suficiente para a detecção na balança.

Após a filtração, o filtro era removido do suporte e pesado, sendo a vazão mássica determinada através da Equação 3.1. A filtração não foi feita com todo o volume de ar gerado, devido à limitação da válvula controladora de vazão, mas sim com uma alíquota, obtida de forma que a amostragem fosse isocinética. Desse

modo, para que fosse determinada a vazão mássica total, bastava calculá-la, a partir do valor obtido pela Equação 3.1, para toda a vazão volumétrica que passava pelo duto.

$$\dot{F} = \frac{m_e - m_s}{\Delta t} \quad (3.1)$$

na qual,

$\dot{F}$  é a vazão mássica de material particulado;

$m_e$  é a massa do filtro no início do experimento;

$m_s$  é a massa no filtro final do experimento;

$\Delta t$  é o tempo de amostragem.

### 3.1.2.3 Determinação da eficiência do precipitador eletrostático

Inicialmente, o material particulado era inserido no alimentador, e a rotação do prato ajustada.

Em seguida, a válvula que fornece ar comprimido para o alimentador era aberta e o soprador acionado, sendo a vazão, no interior do duto do precipitador, ajustada de acordo com a velocidade desejada.

A fonte de alta tensão era ajustada de acordo com o campo elétrico a ser mantido constante no experimento, e anotado o valor da corrente elétrica gerada, bem como a respectiva temperatura e umidade relativa.

Após o início da corrida experimental, a corrente elétrica e a diferença de potencial eram monitoradas. Atingido o regime permanente, a amostragem da concentração na entrada era realizada durante cinco minutos, tempo suficiente

para que uma quantidade significativa de pó fosse recolhido. Os filtros utilizados eram pesados antes e depois da amostragem, para que se determinasse a vazão mássica de material alimentado.

A seguir, a amostragem na saída do precipitador era realizada, sendo o tempo de amostragem de dez minutos, período maior devido à menor concentração de partículas na saída, uma vez que, dependendo da eficiência do equipamento, grande parte do material ficava retida nas placas coletoras.

A eficiência global de remoção foi calculada através da relação entre a diferença existente nas vazões mássicas de entrada e de saída do precipitador, relação apresentada na Equação 3.2.

$$h_T(\%) = \frac{\dot{F}_e - \dot{F}_s}{\dot{F}_e} \cdot 100 \quad (3.2)$$

na qual,

$\dot{F}_e$  é a vazão mássica na entrada do precipitador;

$\dot{F}_s$  é a vazão mássica na saída do precipitador.

### 3.1.3 Condições de Operação

Os experimentos foram realizados com corona negativa, sendo utilizadas duas diferentes velocidades de escoamento do gás, iguais a 1,0 e 1,5 m/s, e dois campos elétricos, cujos valores foram 6,0, e 8,0 kV/cm. O comprimento das placas coletoras, o espaçamento entre os eletrodos de descarga e o diâmetro dos mesmos variaram de acordo com valores apresentados na Tabela 3.1.

## **3.2 Etapa 2: Desempenho do Precipitador Operando na Remoção de Nanopartículas**

### **3.2.1 Unidade experimental**

O aparato experimental consistiu em um conjunto de unidades que viabilizassem o estudo proposto, sendo formado, além dos equipamentos já apresentados, por um gerador de material particulado, filtros para obtenção de ar ultrapuro e um compressor. O esquema da unidade é apresentado na Figura 3.13.

Nesta etapa foi introduzido mais um precipitador com a finalidade de estudar o efeito da largura do equipamento na eficiência de remoção. O novo módulo possuía 6 cm entre uma placa de coleta e outra. Também foi adicionado mais uma relação  $s/2c$  igual a 0,25, com o intuito de elucidar a tendência deste parâmetro estudado na etapa anterior.

O local onde foram realizados os experimentos foi alterado para que não houvesse uma atmosfera com grande concentração de material particulado em suspensão no laboratório de nanopartículas, de forma a evitar possíveis contaminações.

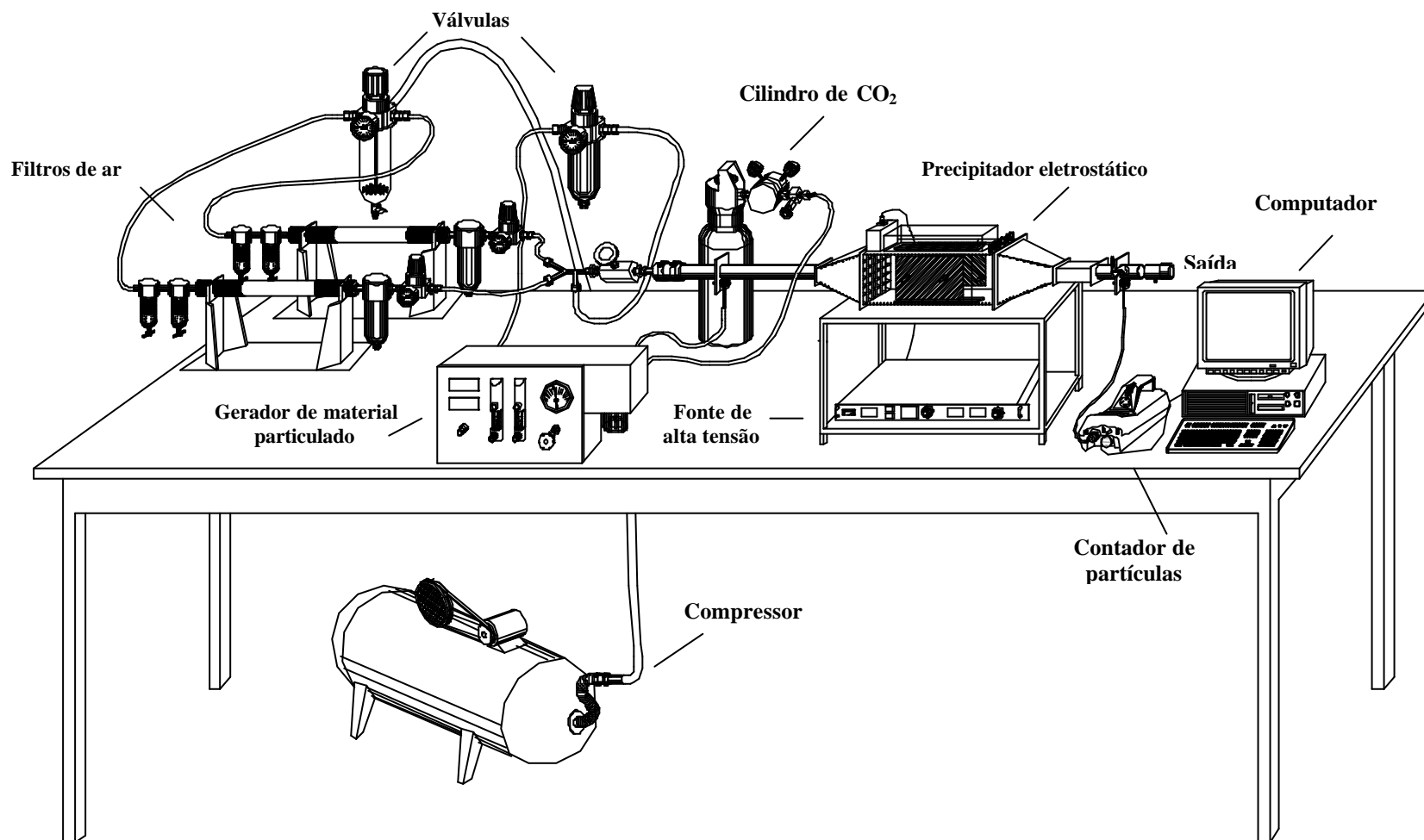


Figura 3.13 – Vista geral da unidade experimental.



### 3.1.1.1 Gerador de partículas

O gerador de partículas utilizado foi o Electro Spray Aerosol Generator, modelo 3480, produzido pela TSI. Este equipamento, apresentado na Figura 3.14, gera partículas monodispersas, na faixa de 3 a 100 nm, numa concentração de  $10^7$  partículas/cm<sup>3</sup> e vazão de 0,2 a 2,5 l/min.

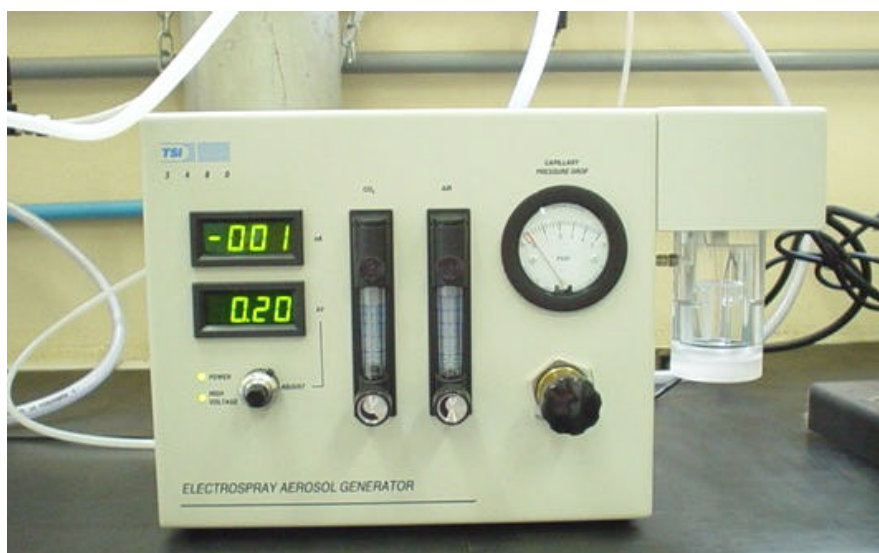


Figura 3.14 – Foto do gerador de partícula.

A geração das partículas, ilustrada pela Figura 3.15, iniciava-se com a preparação de uma solução ou suspensão, dependendo do material a ser utilizado. O líquido era introduzido no equipamento através de um porta-amostra, contendo um capilar para conduzir a solução e um fio de platina ligado a uma fonte de alta tensão, como apresentado na Figura 3.16, cuja finalidade era a ionização da amostra empregada.



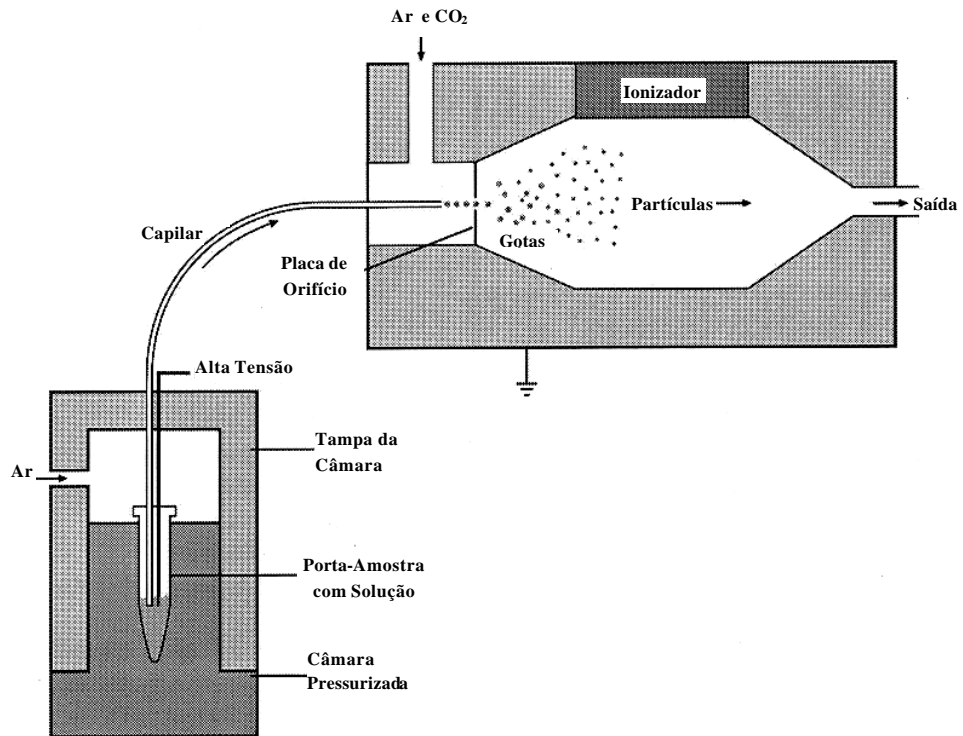


Figura 3.16 – Esquema de funcionamento do gerador de partículas (manual de funcionamento do gerador modelo 3480, da TSI)

O líquido escoava pelo capilar devido à pressurização da câmara e, ao sair do mesmo, sofria a ação de um campo elétrico. Esse campo causava o seccionamento do líquido carregado eletricamente, na forma de gotículas de mesmo tamanho. Ar puro e  $\text{CO}_2$  eram misturados a essas gotículas, causando a evaporação da fase líquida. Concomitantemente, as mesmas entravam em contato com uma fonte ionizante de Polônio 210, modelo P-2042, da TSI, adquirida da NRD LLC., (Figura 3.17), que promovia a neutralização das cargas presentes.



a)



b)

Figura 3.16 – Detalhe: a) Porta-amostra , b) Câmara de acrílico com o capilar e o fio de alta tensão.

Na operação do gerador era importante ainda o uso de uma solução para limpeza do capilar, de forma que não houvesse contaminação da amostra e nem incrustação de material no mesmo. A solução de limpeza era alimentada ao gerador antes e depois de cada corrida.



Figura 3.17 – Fonte de Polônio.

Maiores detalhes sobre o gerador de partículas são apresentados no Apêndice C.

As partículas geradas eram alimentadas ao equipamento através de uma sonda acoplada ao duto de entrada, de forma que as mesmas fossem inseridas no centro do duto e possuíssem uma melhor dispersão pela corrente de gás que promovia a sua diluição.

### 3.1.1.2 Contador de Partículas

A determinação da eficiência foi realizada com o emprego de um contador de partículas da marca TSI, modelo 3007 (Figura 3.18). Este equipamento pode determinar o número de partículas que possuem diâmetro igual ou maior que 10 nm, até um limite de 1  $\mu\text{m}$ , a uma concentração de até  $10^5$  partículas/ $\text{cm}^3$ . As partículas que entram no contador passam por um filtro saturado com álcool isopropílico, como visto na Figura 3.19. O álcool evapora e é levado pela corrente gasosa juntamente com as partículas. Em seguida, uma corrente passa através de um condensador, que faz com que o álcool se condense sobre as partículas, de

forma que as mesmas aumentem de tamanho e possam ser detectadas pelo equipamento. Um dispositivo óptico gera um feixe de laser, que é emitido sobre as partículas e em contato com as mesmas, é dispersado. Um sensor detecta a luz dispersada pelas gotas, determinando através deste distúrbio o número de gotas que passam pelo equipamento.



Figura 3.18 - Foto do contador de partículas.

### 3.1.1.3 Gases

O ar usado para a geração das partículas, bem como aquele utilizado para a sua diluição, foi fornecido por um compressor de pistão da marca Schulz, modelo MSV12/175, com capacidade de gerar 340 l/min. O modelo era isento de óleo, para evitar a presença deste composto e a contaminação da corrente gasosa. Após

comprimido, o ar passava por um filtro de sílica gel, que reduzia grande parte do vapor de água condensado no processo anterior.

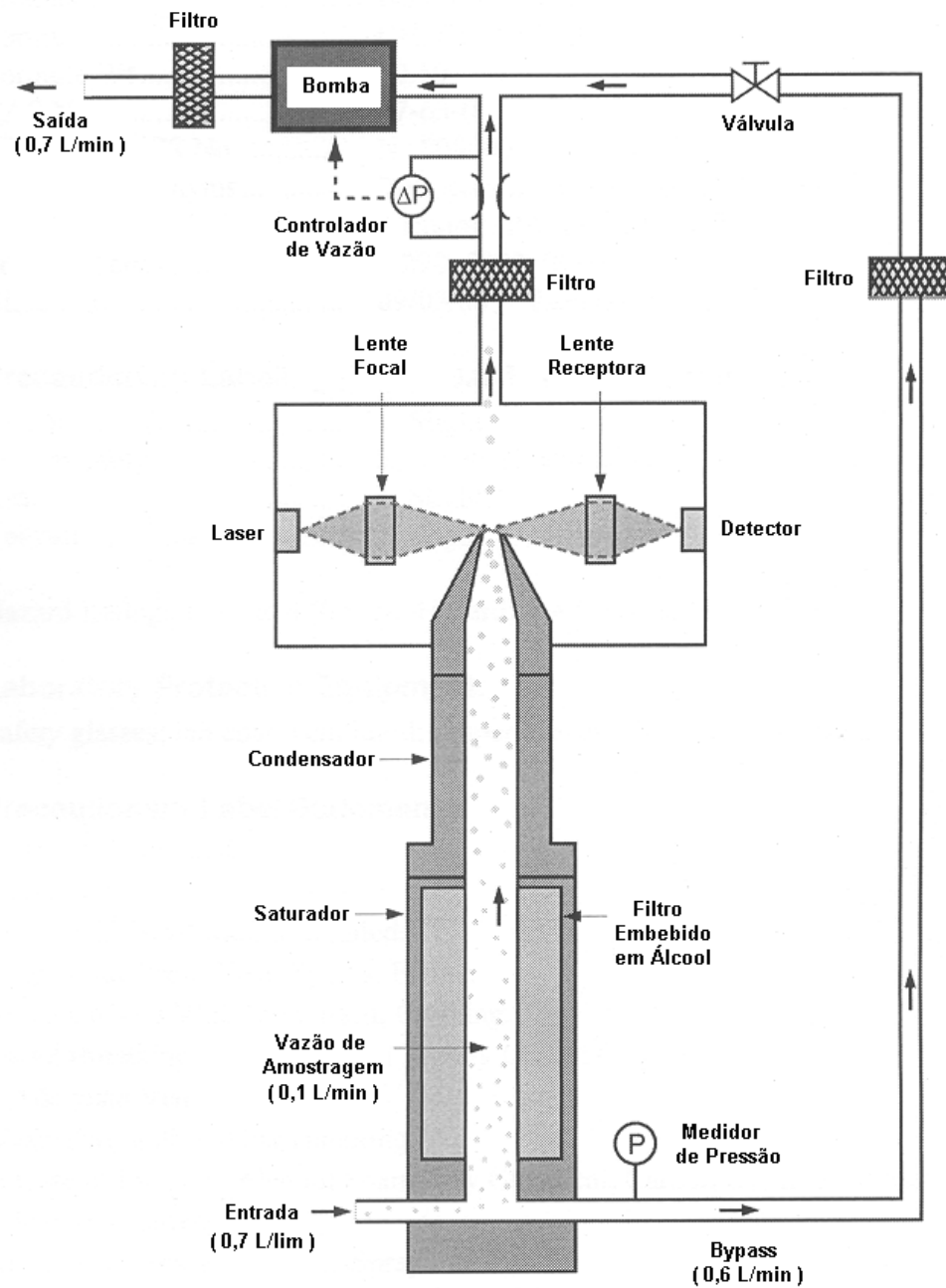


Figura 3.19 - Esquema de funcionamento do contador de partículas.

Para que não houvesse contaminação do fluido, foram utilizados dois filtros de purificação de ar, como apresentado na Figura 3.13. Estes filtros foram adquiridos da empresa TSI, sendo o modelo dos mesmos 3074B (Figura 3.20).



Figura 3.20 – Filtros para purificação de ar.

Cada filtro era formado por um conjunto de três filtros e uma membrana, através dos quais, era promovida a purificação do gás. O pré-filtro removia as partículas grandes e gotas de água ou outros líquidos presentes na corrente gasosa, com uma eficiência de 99,85% para partículas de 0,1  $\mu\text{m}$ . Em seguida, a corrente gasosa passava por um filtro coalescente que removia partículas, água e gotas de óleo com uma eficiência ainda maior que o filtro anterior (99,99995% para partículas de 0,1  $\mu\text{m}$ ). Após esta etapa, o ar escoava por uma membrana, que removia a umidade existente na corrente gasosa através de uma série de membranas seletivas. Finalmente, a unidade possuía um último filtro composto por carvão ativado, que removia eventuais gotas de óleo e partículas com uma

eficiência de 99,99995%. A vazão máxima de operação era de 60 l/min e pressão máxima na entrada, de 10,5 kg/cm<sup>2</sup>.

Para a geração das partículas, além do ar, nesta etapa foi necessário o emprego de CO<sub>2</sub>. Este gás foi fornecido pela AGA S.A. em cilindros de 6 kg. O gás adquirido foi o superseco, com pureza elevada.

### 3.1.2 Material Utilizado

Como material particulado foi utilizado o cloreto de sódio, cuja fórmula química é NaCl. O reagente adquirido foi da marca J.T. Baker, com 99,5% de pureza.

O valor da resistividade também foi obtido através do emprego do método proposto por Coury (1983). O valor calculado está apresentado na Tabela 3.3, bem como algumas outras características físicas do material em questão, como sua densidade, medida com um picnômetro a Hélio, modelo AccuPyc 1330, da Micromeritics e sua constante dielétrica, obtida de Lide, (1997).

Tabela 3.3 – Constantes do cloreto de sódio.

$r_p$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e_r$ (-)	$r$ (W·m)
2,09	5,9	$2 \cdot 10^7$

Na preparação da solução salina para alimentação do gerador e posterior formação do aerossol foi necessário o uso de água ultrapura para garantir uma maior pureza da amostra. Esta água foi obtida através da destilação da água de abastecimento e posterior purificação desta utilizando o sistema Simplicity

Ultrapure Water System, da Millipore, que remove os contaminantes remanescentes através de filtração por resinas de troca iônica.

As características da água obtida foram determinadas a partir dos seguintes parâmetros: condutividade, obtida através de um condutivímetro da Micronal, modelo B330, com célula de condutividade Digimed, modelo DMC-010 e constante  $k=1 \text{ cm}^{-1}$ ; pH, medido com um pHmetro Digimed, modelo DM-20; e dureza e sólidos dissolvidos, determinados pelo laboratório de Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, pertencente à Universidade de São Paulo. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Características da água utilizada.

<b>Condutividade (mS/cm)</b>	<b>pH (-)</b>	<b>Dureza (mg/l)</b>	<b>Sólidos dissolvidos (mg/l)</b>
1,33	7,59	1	0

As soluções de cloreto de sódio em água ultrapura foram preparadas dissolvendo-se a massa de soluto necessária, pesadas em uma balança Kern, modelo 410, com quatro casas decimais, para cada concentração desejada em uma porção de água e, posteriormente, diluindo-se a solução resultante para 100 ml em balão volumétrico de vidro. Em seguida, as amostras foram transferidas para frascos plásticos (polietileno) para melhor preservação, pois os utensílios de laboratório feitos em vidro podem ser fonte de contaminação devido à presença de Na em sua composição, podem também ser responsáveis pela perda de soluto, uma vez que poderia ocorrer troca iônica entre a sua superfície e a solução, devido à presença do grupo Si-OH, que substitui o  $\text{H}^+$  por íons metálicos da solução



(Howard e Statham, 1993). Os frascos da preparação foram utilizados apenas para esta atividade, evitando que os mesmos fossem contaminados com outras substâncias. As soluções foram conservadas em refrigerador, para minimizar a contaminação de origem biológica.

A solução de limpeza utilizada no gerador de partículas foi feita adicionando-se 0,77 g de acetato de amônio a 0,5 l de água ultrapura. Em seguida, foi acrescentado 0,75 ml de hidróxido de amônio. O pH e a condutividade da solução foram ajustados em 8,0 e 0,2 S/m, respectivamente, através da adição de mais reagente e, quando necessária a diminuição do pH, empregou-se o ácido acético.

A qualidade do ar gerado pelos filtros é alta como pode ser observada na Figura 3.21, que apresenta a concentração de partículas em número na corrente gasosa, obtida com o emprego do contador de partículas descrito previamente.

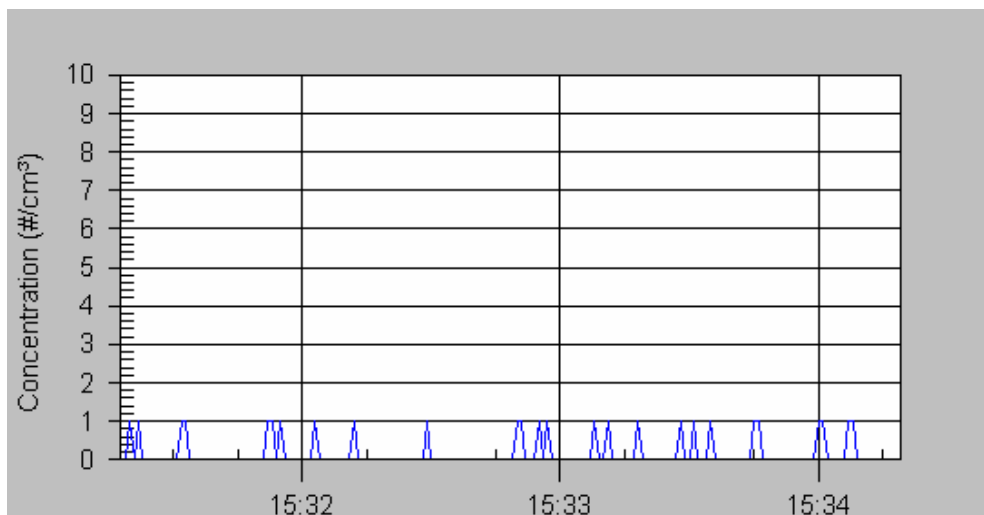


Figura 3.21 – Concentração de partículas na corrente gasosa gerada pelo compressor com o tempo dado em horas.

### 3.1.3 Determinação do diâmetro das partículas geradas

Uma vez que o gerador produzia as partículas de sal, mas não informava o valor do diâmetro gerado, foi necessária a utilização de técnicas que quantificassem o mesmo.

Hinds (1999) aponta alguns instrumentos aptos a visualizar partículas entre 100 e 10 nm, faixa na qual estão compreendidas as partículas geradas pelo equipamento utilizado. O autor sugere, por exemplo, o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), o Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET) e os equipamentos que utilizam a mobilidade elétrica das partículas para detectar seu diâmetro. Foram testadas as técnicas de microscopia de varredura e de transmissão proposta por Hinds (1999) para tal função, além da de força atômica. Os resultados das análises com as diversas técnicas estão apresentados no Apêndice D. A escolhida para o desenvolvimento do trabalho foi a microscopia eletrônica de transmissão. Esta técnica foi empregada com sucesso por Prost et al. (1998) e Bang e Murr (2002) para a determinação do diâmetro de partículas nanométricas.

O Microscópio Eletrônico de Transmissão foi escolhido por apresentar uma resolução melhor que o Microscópio Eletrônico de Varredura, proporcionando imagens mais nítidas e possibilitando a visualização de partículas de pequenos diâmetros, que não são observadas com o emprego do MEV. Uma breve explanação sobre este equipamento está apresentada no Apêndice E.

As fotografias obtidas foram analisadas com o emprego do analisador de imagens Image-Pro Plus versão 3.0, que possibilita tanto a captação quanto a análise de imagens provenientes de microscópios e câmeras fotográficas. Através

deste aplicativo é possível a determinação da quantidade de partículas presentes na imagem, bem como a determinação de seu diâmetro, área e perímetro. O diâmetro medido pelo equipamento consiste no comprimento médio medido com um intervalo de dois graus e passando pelo centróide da imagem da partícula.

### **3.1.4 Procedimento Experimental**

#### **3.1.4.1 Determinação das curvas de corrente-tensão para o gerador**

A construção das curvas de corrente-tensão foi iniciada com a passagem de ar comprimido pelo sistema e o ajuste da válvula reguladora de pressão, de modo que esta não fosse maior que 10 psi, limite máximo permitido pelo equipamento.

Em seguida, abria-se o cilindro de CO<sub>2</sub> e sua pressão na entrada do gerador era controlada de forma que não ultrapassasse 5 psi.

O passo seguinte foi ligar o gerador e regular a sua pressão na câmara da amostra em 3,7 psi, a vazão de ar em 2 l/min e a vazão de CO<sub>2</sub> em 0,3 l/min. Ajustava-se também a tensão no valor de 1 kV e inseria-se na câmara a solução salina, preparada anteriormente.

Após 1 minuto de espera para estabilização do sistema, iniciava-se a coleta de dados, observando a forma do jato que saía do capilar, pela janela do equipamento. Anotava-se a corrente gerada e em seguida, a tensão era aumentada, a corrente registrada, o formato da ponta do capilar observado, e assim sucessivamente, até que se obtivessem valores muito altos de corrente.

O procedimento era repetido com todas as soluções de diferentes concentrações, de forma a determinar o ponto de operação em que a forma de geração das gotas estivesse no modo jato-cônico.

Após o término dos testes, o equipamento era limpo com o emprego da solução de limpeza descrita no item 3.3.1.2. Esta era alimentada por cinco minutos para remover os resquícios da solução salina, evitando que depósitos se formassem no capilar. Em seguida, ar era passado pelo capilar para evaporar a solução de limpeza e preparar o capilar para o próximo ensaio.

Uma vez limpo o capilar, a câmara era despressurizada, as correntes gasosas e a alta tensão removidas e o equipamento era desligado.

#### **3.1.4.2 Determinação do diâmetro das partículas geradas para cada concentração de solução**

A coleta das partículas para a determinação do seu diâmetro iniciava-se da mesma maneira como descrita no procedimento 3.3.4.1, sendo a tensão ajustada para o valor determinado através de tal procedimento.

Após verificar que o líquido estava passando pelo capilar e as partículas sendo geradas, a vazão de saída era direcionada para a grade suporte, própria para análises no MET, de forma que a mangueira de alimentação ficasse bem próxima à grade e aumentasse a probabilidade das pequenas partículas serem coletadas e não desviadas com a corrente de ar. Este processo era realizado por um período de aproximadamente 24 horas, após o qual a vazão era desviada, a grade era acondicionada em recipiente vedado para posterior análise no MET e o equipamento limpo e desligado.

Este procedimento foi realizado para todas as concentrações preparadas, havendo o cuidado de desmontar o equipamento entre cada coleta e de limpar a câmara de geração, para que não ocorresse contaminação devido à troca de solução.

### **3.1.4.3 Determinação da eficiência do precipitador eletrostático**

O procedimento experimental para a determinação da eficiência do precipitador eletrostático consistiu, primeiramente, em montar o mesmo de forma que seus parâmetros geométricos estivessem de acordo com as condições necessárias para a corrida a ser realizada, colocando-se a caixa do precipitador com o comprimento devido, bem como o correto diâmetro dos fios e o espaçamento entre eles.

Após a primeira etapa, purgava-se o compressor para que depósitos de água que pudessem ter surgido fossem eliminados, minimizando a quantidade de água no reservatório e aumentando o tempo de vida útil do filtro de sílica. Ligava-se, então, o compressor e a válvula reguladora de pressão, que fornecia ar para os filtros. Posteriormente, instalava-se um tubo de Pitot na linha para que a velocidade fosse determinada. Através do micromanômetro conectado ao tubo de Pitot e de uma válvula agulha, a vazão de gás era controlada de forma que velocidade no precipitador fosse a desejada. Quando esta variável atingia o valor pré-estabelecido, o Pitot era desconectado.

Conectava-se a fonte de alta tensão ao precipitador e ajustava-se o valor de tensão aplicada de forma que o campo elétrico necessário para cada ensaio fosse mantido.

Media-se, então, a temperatura, a umidade e a pressão do sistema.

Ligava-se o gerador de aerossol, a pressão dentro da câmara era ajustada, assim como as vazões de ar comprimido e CO<sub>2</sub> e a tensão aplicada. Adicionava-se a solução de sal no porta-amostra e este era inserido na câmara do gerador. Enquanto o líquido começava a escoar pelo capilar, acionava-se a fonte de alta tensão.

Após alguns minutos para eventual estabilização da geração de partículas, era realizada a contagem de partículas na entrada do precipitador e feita a medida da concentração na saída, com o emprego do contador de partículas, de forma que fosse possível a determinação da eficiência do equipamento.

A geração de partículas era desviada do equipamento e a solução do gerador trocada pela solução de limpeza, havendo o cuidado de inserir outro porta-amostra para evitar contaminação do primeiro. Este processo ocorria por 5 minutos, quando então a solução era removida e ar passado pelo capilar por mais 5 minutos, para que a solução de limpeza evaporasse e fossem evitados depósitos sobre a superfície do mesmo.

O gerador era, então, desligado, assim como a válvula de ar comprimido e a fonte de alta tensão. O precipitador era lavado, e o processo, encerrado.

### **3.1.5 Condições de operação**

Os experimentos foram realizados com corona negativa, tendo sido utilizadas três diferentes velocidades de escoamento do gás, 0,125, 0,25 e 0,5 m/s e, de densidade de corrente ( $j = i/A$ ), cujos valores foram 1,8, 2,8 e 3,8 mA/m<sup>2</sup>. Também foi variado o comprimento das placas coletoras ( $L_{nc}$ ), assumindo

tamanhos iguais a 0,15 e 0,30 m; a relação  $s/2c$ , correspondente a 0,25, 0,50 e 1,00, e a largura do equipamento ( $2s$ ) variando de 0,04 para 0,06 m. Todas estas condições foram analisadas para um diâmetro de fio igual a 0,025 cm. O material utilizado na geração do material particulado foi o cloreto de sódio (NaCl), em soluções cujas concentrações foram variadas de 0,5 a 5 g/l, para que o diâmetro da partícula variasse.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Etapa 1: Desempenho do precipitador na remoção de $PM_{2,5}$**

#### **4.1.1 Determinação da curva corrente-tensão do precipitador eletrostático**

A determinação da curva corrente-tensão é extremamente importante para a operação do precipitador eletrostático. É ela que define o comportamento elétrico do mesmo e, a partir desta curva, definem-se os pontos de operação do equipamento, que devem estar compreendidos entre o ponto no qual se inicia a corrente corona e o limite máximo de operação do equipamento, tensão na qual ocorre o surgimento de centelhas, caracterizando o rompimento elétrico do gás.

As curvas de corrente-tensão foram obtidas para as diversas configurações do precipitador, através da combinação das variáveis: comprimento do equipamento, diâmetro dos eletrodos de descarga e espaçamento entre eles, totalizando oito curvas. Estas foram realizadas utilizando o equipamento com 4 cm de largura e com velocidade de escoamento do ar igual a 0,5 m/s.

Houve a preocupação de verificar se haveria influência da velocidade no comportamento elétrico do equipamento e observou-se que os resultados foram os mesmos para velocidade de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s. Portanto, não há ação da velocidade sobre a curva de corrente-tensão, pelo menos para a faixa analisada.

Uma comparação das curvas geradas para cada  $L_{ne}$  está apresentada nas Figura 4.1 e Figura 4.2, que foram realizadas com umidade relativa de 30% e temperatura de 32°C, aproximadamente.



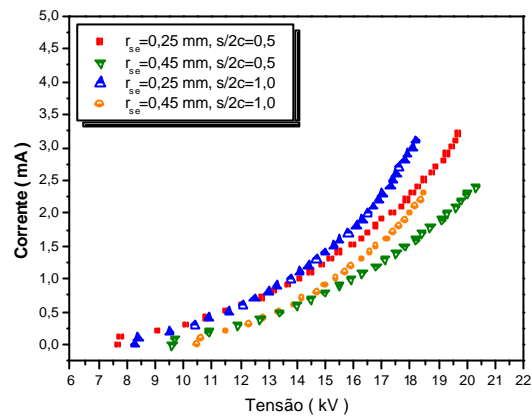


Figura 4.1 - Comparação das curvas corrente-tensão para  $L_{ne} = 0,15$  m,  $v = 0,5$  m/s.

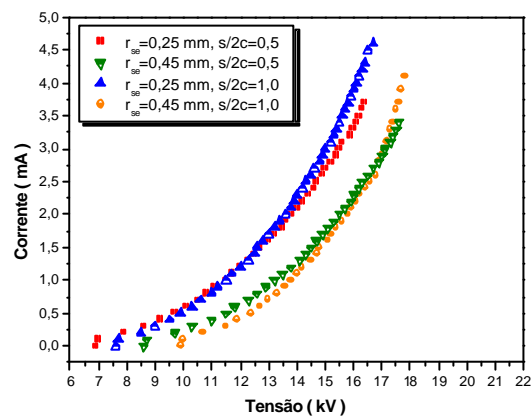


Figura 4.2 – Comparação das curvas corrente-tensão para  $L_{ne} = 0,30$  m,  $v = 0,5$  m/s.

Pode-se observar pelas figuras, que as curvas apresentam o mesmo comportamento, tendendo a aumentar exponencialmente a corrente com a elevação da tensão aplicada. Os valores de diferença de potencial nos quais ocorre a geração do efeito corona foram bastante próximos para os dois comprimentos avaliados, sendo necessária maior tensão para que os fios com maior diâmetro

puddessem gerar a corrente. Isto ocorre pelo fato do campo elétrico, no qual se inicia o efeito corona, ser função do diâmetro do eletrodo.

Este fator é também o responsável pelos maiores valores de corrente apresentados pelos eletrodos de 0,25 mm, uma vez que estes geram campos elétricos mais elevados para uma mesma tensão, fenômeno acentuado para o precipitador com  $L_{ne}$  igual a 30 cm.

Pode ser verificado que a Figura 4.2 apresenta corrente elétrica com maior intensidade, para todas as condições analisadas. Isto ocorre devido à interação entre um elevado número de fios e um maior comprimento da placa de coleta do precipitador em questão, formando maior concentração de íons e partículas carregadas, acarretando um campo elétrico mais intenso. Contudo, isto limita a operação a tensões menores, uma vez que o rompimento elétrico do gás pode ocorrer num menor intervalo de tempo para este precipitador.

Quando analisada a relação  $s/2c$ , há uma tendência de elevação da corrente conforme o aumento deste parâmetro, sendo seu efeito mais significativo para o precipitador de 15 cm, operando com tensões acima de 15 kV. O aumento desta relação também acarretou uma maior faixa de operação, retardando o rompimento elétrico do gás.

Como a relação  $s/2c=1,0$  resultou em valores mais altos de corrente para um mesmo valor de tensão. É possível que ela possa proporcionar uma configuração mais eficiente, fornecendo, no entanto, valores mais altos de corrente que levam à expectativa de uma melhor remoção das partículas. O valor obtido está de acordo com a teoria de Riehle (1997), de que há uma configuração

ótima para a construção dos precipitadores, que corresponde exatamente ao valor da razão  $s/2c$  em questão.

Apesar de produzir os maiores valores de corrente, este valor nem sempre garante as maiores eficiências, como observado por Miller (1998) e Nóbrega (2002). Miller (1998) constatou que não existe um único valor  $s/2c$  que maximize a eficiência, sendo este dependente da distância entre as placas de coleta. Nóbrega (2002) estudou valores maiores que os apresentados neste trabalho e concluiu que, para a remoção de finos, as configurações que levam a um menor espaçamento entre os fios, ou relações  $s/2c$  maiores, são mais eficientes na remoção deste tamanho de partícula.

A partir da análise das curvas apresentadas, optou-se por avaliar a influência do campo elétrico nos pontos iguais a 6 e 8 kV/cm, valores que podem ser obtidos tanto para o precipitador maior como para aquele com menor comprimento, de forma que todas as condições de operação possam ser as mesmas quando se avalia o efeito do comprimento do precipitador na eficiência de remoção do material particulado.

O comportamento da curva com relação à umidade relativa do ar, ao contrário da velocidade, tem grande efeito sobre o par corrente-tensão, como pode ser observado na Figura 4.3 e na Figura 4.4.

Com a diminuição da umidade relativa para valores muito baixos, inferiores a 20%, há um aumento da corrente para os mesmos valores de tensão. Este ganho de corrente, porém pode favorecer o rompimento elétrico do ar para valores mais baixos de tensão. A principal consequência da diminuição da umidade, segundo White (1963) e Oglesby e Nichols (1978), é o aumento da

resistividade elétrica do material a ser tratado, o que pode causar o fenômeno corona reversa, deteriorando a performance do precipitador.

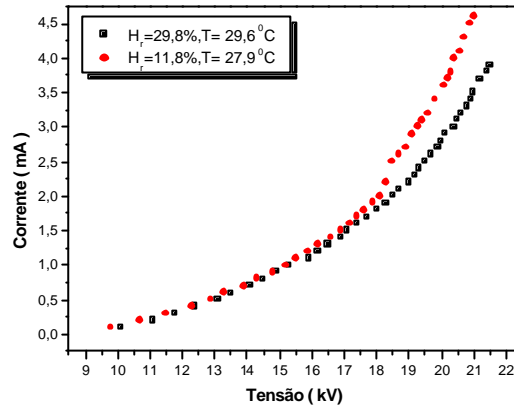


Figura 4.3 – Influência da umidade do ar na relação entre a corrente e a tensão aplicada para  $L_{ne} = 0,15$  m,  $2r_{se} = 0,45$  mm e  $s/2c = 1,0$ ,  $v = 0,5$  m/s.

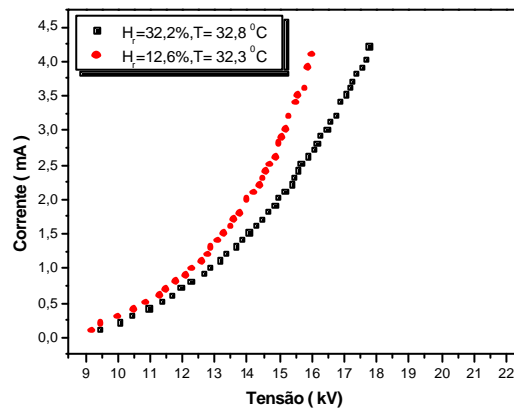


Figura 4.4 – Influência da umidade do ar na relação entre a corrente e a tensão aplicada para  $L_{ne} = 0,30$  m,  $2r_{se} = 0,45$  mm e  $s/2c = 1,0$ ,  $v = 0,5$  m/s.

O efeito da redução da umidade do ar na corrente é mais pronunciado no precipitador de 30 cm, atingindo elevações consideráveis, maiores que 1 mA. O efeito da elevação da corrente, com a alteração da umidade, pode estar

relacionado à condição necessária para a operação estável da corona negativa, ou seja, à presença de moléculas que se associem aos elétrons formando íons, como por exemplo, moléculas de  $O_2$ ,  $H_2O$  e  $SO_2$  como observado por Bapat (2001). Assim, os elétrons, que possuem uma grande mobilidade elétrica, associam-se a estas moléculas e aumentam o seu tempo de permanência no precipitador, carregando com mais eficácia as partículas.

A ligação entre os elétrons e as moléculas de vapor de água não ocorre devido à eletronegatividade, como ocorre com o oxigênio. Ela ocorre através da dissociação da molécula de água quando se choca com um elétron livre e posterior ligação entre as partes formadas com os elétrons (White, 1963). Com a diminuição da umidade, há uma menor quantidade de moléculas de água que se associam a estes elétrons, de forma a aumentar a quantidade de elétrons livres e, conseqüentemente, a corrente gerada.

Esta teoria está de acordo com o estudo de Abdel-Salam (1992), que associa a ligação dos íons com as moléculas de água à diminuição da mobilidade elétrica das espécies presentes. Contudo, o autor aponta que, com o aumento da umidade, há uma queda da tensão na qual se inicia a corona. Este efeito não foi muito pronunciado nos ensaios realizados, havendo uma pequena variação com a diminuição da umidade para valores em torno de 12%.

A presença de partículas na corrente gasosa também pode interferir na curva de corrente-tensão. Segundo White (1963), há uma diminuição da corrente gerada, em função da menor mobilidade elétrica das partículas quando comparada à mobilidade dos íons e elétrons livres.

Para o estudo em questão, como pode ser observado na Figura 4.5 e Figura 4.6, não houve uma interferência da presença de partículas na corrente gerada, para a condição analisada. Seu efeito foi avaliado em duas situações diferentes: com o precipitador limpo e após 15 minutos de operação.

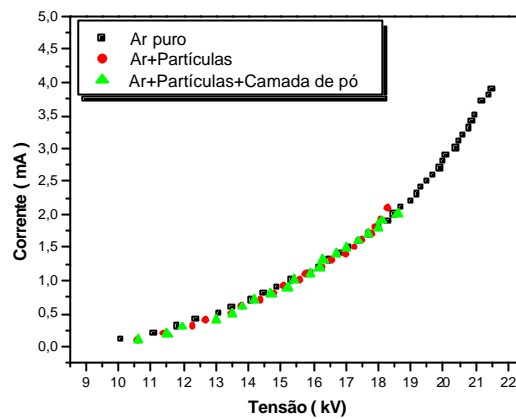


Figura 4.5 – Influência das partículas na relação entre a corrente e a tensão aplicada para  $L_{ne} = 0,15$  m,  $2r_{se} = 0,45$  mm e  $s/2c = 0,5$ ,  $v = 0,5$  m/s.

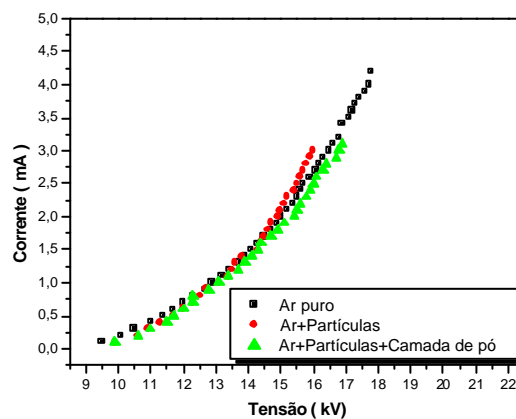


Figura 4.6 – Influência da presença de partículas na relação entre a corrente e a tensão aplicada para  $L_{ne} = 0,30$  m,  $2r_{se} = 0,45$  mm e  $s/2c = 0,5$ ,  $v = 0,5$  m/s.

Este efeito contrário ao mencionado por White (1963), ou seja, a ausência da diminuição da corrente elétrica, pode haver ocorrido em função da baixa concentração de partículas alimentada, que não são suficientes para reduzir consideravelmente a mobilidade elétrica dos íons ao se ligarem às mesmas. Este efeito também foi observado por Marquard et al. (2003).

Apesar de não haver alteração significativa da corrente gerada, a faixa de tensão que pode ser utilizada é diminuída consideravelmente, pois ocorre o rompimento elétrico do gás para tensões menores. Isto provavelmente ocorre devido ao alto campo elétrico gerado na camada de partícula coletada, o que causa o surgimento de centelhas no local como descrito por McDonald (1980).

#### **4.1.2 Eficiência global de remoção para PM<sub>2,5</sub>**

Os ensaios para a determinação da eficiência global de remoção foram realizados em ambiente não controlado. Apesar de haver a preocupação de que as condições climáticas fossem mantidas as mais estáveis possíveis, houve uma variação de temperatura entre os experimentos realizados, sendo os valores mínimo e máximo encontrados iguais a 23 a 35°C, com média de 30,3°C. Houve ainda alteração na umidade relativa, cujos pontos extremos foram de 21% a 31°C e 41% a 28°C, e que correspondem a uma umidade absoluta de 0,00585 e 0,00967 kg de água/kg de ar seco. Estes foram pontos esporádicos, sendo a média da umidade absoluta igual a 0,00901 kg de água/kg de ar seco.

A quantidade de material particulado alimentado foi determinada a partir dos testes de calibração do alimentador do tipo prato rotativo apresentados no Apêndice F. Nos ensaios realizados, a concentração não foi mantida constante, e,

sim, a massa alimentada, uma vez que a concentração gerada com o emprego deste alimentador foi baixa (aproximadamente  $5 \cdot 10^5$  partículas/cm<sup>3</sup>), o que implicaria elevado tempo de amostragem. Esta concentração está compreendida na região, segundo Marquard et al. (2003), na qual não há interferência da mesma na eficiência de remoção de partículas pelo precipitador eletrostático.

Durante a realização dos testes, a corrente gerada no precipitador, em decorrência da aplicação da tensão elétrica, foi monitorada, sendo os valores obtidos no início de cada experimento apresentados na Tabela 4.1 e Tabela 4.2, nas quais a primeira linha refere-se à velocidade de 1,0 m/s e a segunda à velocidade de 1,5 m/s.

Tabela 4.1– Valores da corrente elétrica em mA no início de cada ensaio para  $L_{ne} = 0,15$  cm, sendo  $v_1 = 1,0$  m/s e  $v_2 = 1,5$  m/s.

Corrente Elétrica ( mA )								
Variáveis	$2r_{se} = 0,25$ (mm)				$2r_{se} = 0,45$ (mm)			
	$E_{ps} = 6$ (kV/cm)		$E_{ps} = 8$ (kV/cm)		$E_{ps} = 6$ (kV/cm)		$E_{ps} = 8$ (kV/cm)	
	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$
$v_1$	0,5	0,5	1,5	1,7	0,3	0,1	1,1	1,1
$v_2$	0,5	0,5	1,5	1,7	0,3	0,1	1,1	1,1

Pode-se constatar através das tabelas, que, como descrito anteriormente, a velocidade não influenciou no valor da corrente gerada e que o comportamento da mesma foi igual ao apresentado na Figura 4.1 e Figura 4.2. A relação  $s/2c$  influenciou a corrente apenas em alguns casos, sendo geralmente mais significativa para maiores valores de tensão, conforme as figuras mencionadas.



Tabela 4.2 – Valores da corrente elétrica em mA no início de cada ensaio para  $L_{ne} = 0,30$  cm, sendo  $v_1=1,0$  m/s e  $v_2=1,5$  m/s.

Corrente Elétrica ( mA )								
Variáveis	$2r_{se} = 0,25$ (mm)				$2r_{se} = 0,45$ (mm)			
	$E_{ps} = 6$ (kV/cm)		$E_{ps} = 8$ (kV/cm)		$E_{ps} = 6$ (kV/cm)		$E_{ps} = 8$ (kV/cm)	
	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$
$v_1$	1,1	1,1	3,2	3,8	0,7	0,3	2,4	2,4
$v_2$	1,1	1,1	3,2	3,8	0,7	0,3	2,4	2,4

Apesar de não ter sido possível manter constante as condições climáticas, através destes resultados, chegou-se à conclusão de que não houve uma grande influência das mesmas nos ensaios realizados, uma vez que foi possível obter, durante os testes de determinação da eficiência global, os valores de corrente elétrica esperados e relativamente condizentes com o comportamento do precipitador nos ensaios de determinação das curvas de corrente-tensão.

#### 4.1.2.1 Observação visual do desempenho do precipitador

Para ilustrar o desempenho do precipitador na remoção de partículas da corrente gasosa, o mesmo foi fotografado, para a condição de menor campo elétrico, com o fio mais fino e relação  $s/2c$  igual a 0,5, para os dois comprimentos analisados, operando com velocidade de 1,0 m/s, como pode ser visto na Figura 4.7 a Figura 4.10.

As duas primeiras fotografias, representadas pela Figura 4.7 e Figura 4.8, retratam o precipitador de 15 cm de comprimento, sendo que a primeira representa a entrada e a seguinte, a saída. Observa-se que a quantidade de partículas

coletadas é maior na entrada e tende a diminuir ao longo do comprimento do precipitador. Isto pode ser observado pela espessura da camada coletada, bem maior na entrada, ocasionada devido ao fato da concentração diminuir em função da fração de partículas coletada ao longo do precipitador. A diminuição da concentração também acarreta menor quantidade de material particulado depositado sobre o eletrodo de descarga.

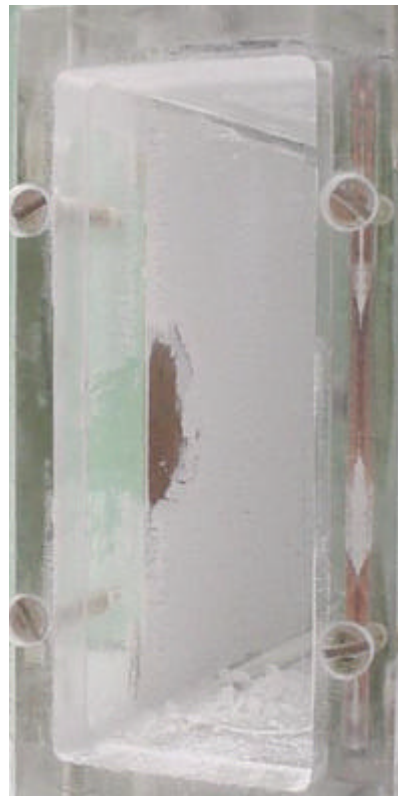


Figura 4.7 - Entrada do precipitador com  $L_{ne} = 0,15$  cm, com ênfase para a espessura da camada de pó coletada.

Na figura referente à saída do precipitador pode-se observar que pode haver interferência da vazão na remoção das partículas, devido à presença de linhas bem definidas na camada de material coletado, como se houvesse ressuspensão de partículas naquela região.

Pode também ser observados, na figura mencionada, desenhos na forma de arcos, que aumentam na saída do precipitador, tanto na parte inferior quanto na superior do equipamento, sendo mais nítidos nesta última situação. É provável que sejam causados pelo campo elétrico dentro do equipamento, que por não ser homogêneo e sim uma combinação entre o campo formado por cada fio, seja possivelmente menor nas extremidades, o que acarretou menor deposição nestas regiões. Outro fator, mais importante até que a não homogeneidade do campo, é o depósito de partículas nas extremidades do fio, o que causa elevação do diâmetro do mesmo e menor campo elétrico no local. O desenho observado pode ser uma imagem das linhas de campo que se formam durante a operação do precipitador.



Figura 4.8 - Saída do precipitador com  $L_{ne} = 0,15$  cm.

Nas figuras referentes ao precipitador maior (Figura 4.9 e Figura 4.10), a diferença entre a entrada e a saída do equipamento é acentuada. Constatou-se que a quantidade de partículas coletadas na saída é muito pequena, em função da elevada eficiência de remoção. Neste caso, pode haver também efeito da velocidade para este comprimento, pois há presença de possíveis aglomerados na saída do precipitador.



Figura 4.9 - Entrada do precipitador com  $L_{ne} = 0,30$  cm, com ênfase para a espessura da camada de pó coletada.

Estes aglomerados se formariam quando as partículas fossem coletadas e, pela ação da vazão de ar, seriam removidos das placas. Devido às forças de atração entre as mesmas, principalmente a de Van der Waals, as partículas não se desprenderiam daquelas mais próximas durante a ressuspensão, permanecendo na forma de aglomerados de tamanho muito maior do que o das partículas iniciais.

Na condição da fotografia em questão, o comprimento do precipitador teria sido suficiente para que parte do material removido fosse recoletado, como pode ser observado. Outra possível explicação seria o aumento do campo elétrico na saída do equipamento em função da espessa camada coletada na entrada, que aumentaria a resistência à passagem de corrente nesta seção. Devido a presença de um alto campo elétrico na saída, poderiam ocorrer rupturas elétricas localizadas, que tornariam a região mais susceptível a coleta de partículas, formando as estruturas visualizadas na Figura 4.10.



Figura 4.10 - Saída do precipitador com  $L_{ne} = 0,30$  cm.

#### 4.1.2.2 Eficiência global de coleta do precipitador

Os resultados da eficiência de remoção global do precipitador eletrostático estão apresentados em seções separadas pela variável analisada, a saber: comprimento do precipitador, campo elétrico, diâmetro do fio e espaçamento entre os eletrodos de descarga.

Não foi possível obter resultados de eficiência quando o precipitador maior foi operado na condição de maior campo elétrico, menor fio e maior relação  $s/2c$ . Era esperado, pelo comportamento do precipitador menor, e pela maior corrente gerada por essa configuração dentre todos os experimentos, que esta fosse a combinação de variáveis de projeto que maximizaria a remoção de  $PM_{2,5}$ . Contudo, durante os ensaios, houve o surgimento de centelhas que caracterizam o fenômeno de rompimento elétrico do gás, inviabilizando o experimento.

O surgimento das centelhas deve-se, provavelmente, ao alto valor da corrente elétrica gerada, próximo ao limite de operação do equipamento e, possivelmente, à formação de um alto campo elétrico na camada de material particulado. Isto ocorre, segundo McDonald (1980), em função da dificuldade de passagem dos elétrons pela camada, o que possibilita o surgimento do fenômeno corona reversa. A diferença de potencial induzida neste aglomerado de partículas é tanto maior quanto maior a resistividade do material, sendo a resistividade da alumina próxima ao valor proposto por Bapat (2001) como favorável a tal fenômeno. De acordo com Thanh (1979a e b), o campo elétrico gerado pode ser tão alto que leve ao rompimento elétrico do gás e ao surgimento de faíscas no interior do equipamento.

Outro fator que reforça a hipótese de corona reversa é que foi possível obter um valor de eficiência para a condição de maior velocidade, porém para um

tempo de amostragem de apenas 1 minuto, para evitar o surgimento das faíscas. O valor obtido foi de 86%, muito baixo se comparado às demais condições estudadas. Esta baixa eficiência provavelmente se deve à ionização na camada coletada, que se localizava praticamente toda na entrada do precipitador, como observado, de forma que os íons positivos gerados atravessavam toda a largura do precipitador em direção aos eletrodos de descarga, neutralizando a carga adquirida pelas partículas e diminuindo a sua eficiência de remoção, fenômeno caracterizado como corona reversa.

Como não foi possível obter os dados de eficiência para tal condição, os gráficos envolvendo esta configuração foram omitidos. Os resultados mostrados nos gráficos a seguir também estão apresentados no Apêndice M, na forma de tabelas.

#### Efeito do comprimento do precipitador:

As Figura 4.11 a Figura 4.18 apresentam os resultados obtidos quando se compara o efeito do comprimento do precipitador na eficiência de remoção.

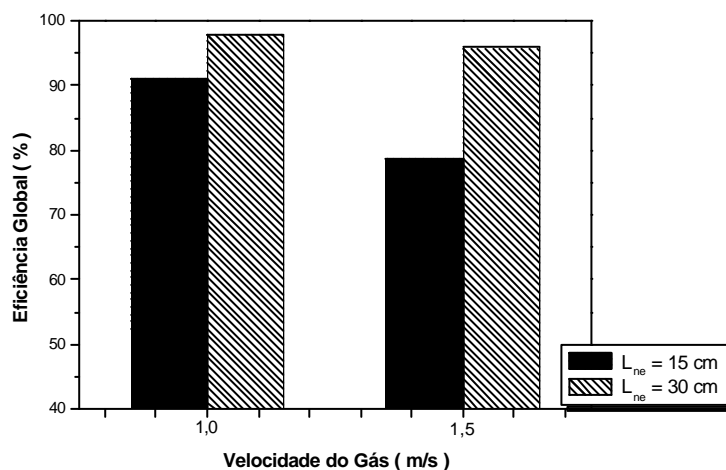


Figura 4.11 – Comparação da eficiência global de remoção para  $E_{ps} = 6 \text{ kV/cm}$ ,  $2r_{se} = 0,25 \text{ m}$  e  $s/2c = 0,5$ .

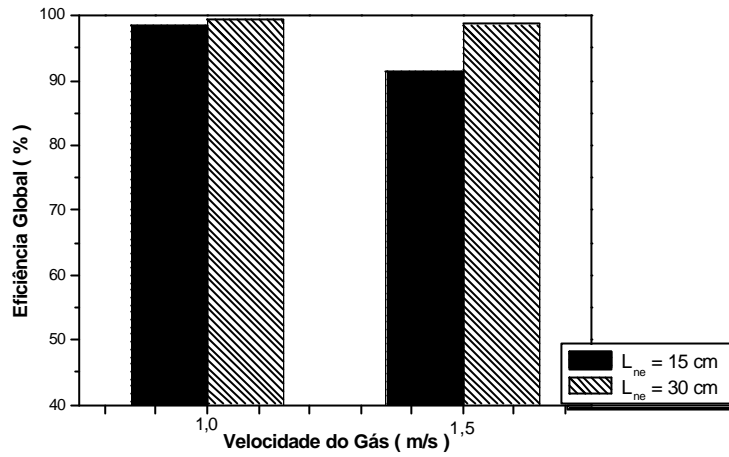


Figura 4.12 – Comparação da eficiência global de remoção para  $E_{ps} = 8$  kV/cm,  $2r_{se} = 0,25$  m e  $s/2c = 0,5$ .

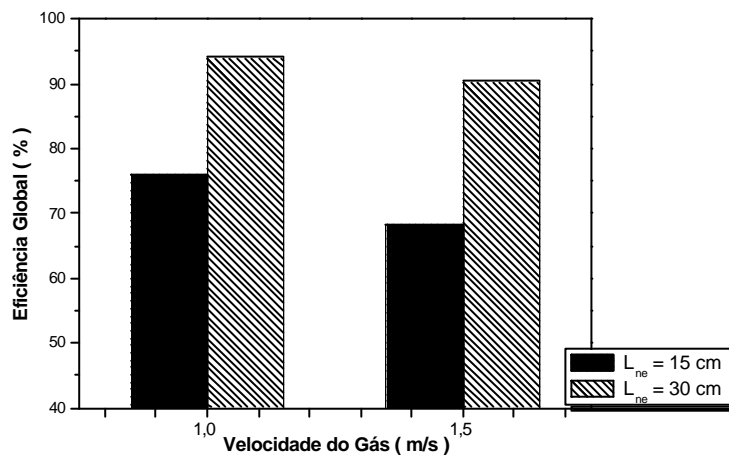


Figura 4.13 – Comparação da eficiência global de remoção para  $E_{ps} = 6$  kV/cm,  $2r_{se} = 0,45$  m e  $s/2c = 0,5$ .

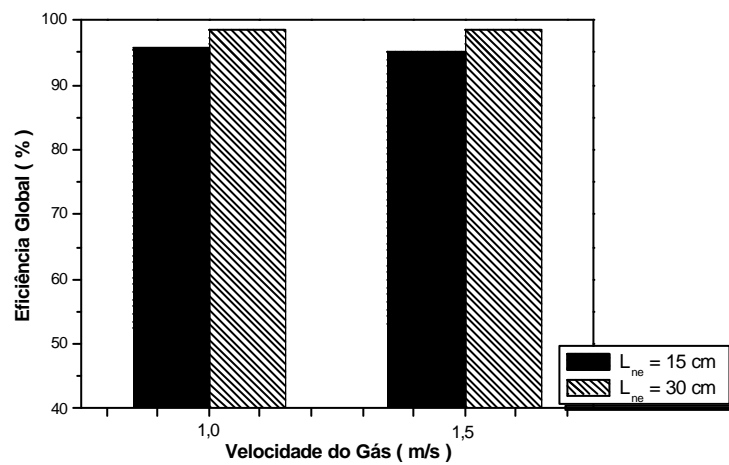


Figura 4.14 – Comparação da eficiência global de remoção para  $E_{ps} = 8$  kV/cm,  $2r_{se} = 0,45$  m e  $s/2c = 0,5$ .



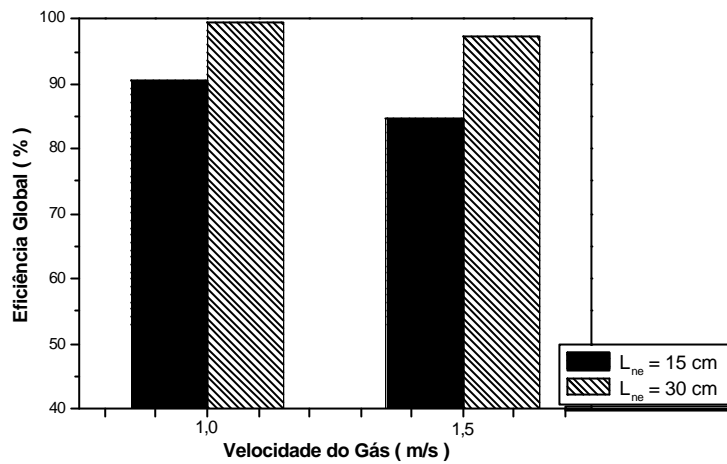


Figura 4.15 – Comparação da eficiência global de remoção para  $E_{ps} = 6$  kV/cm,  $2r_{se} = 0,25$  mm e  $s/2c = 1,0$ .

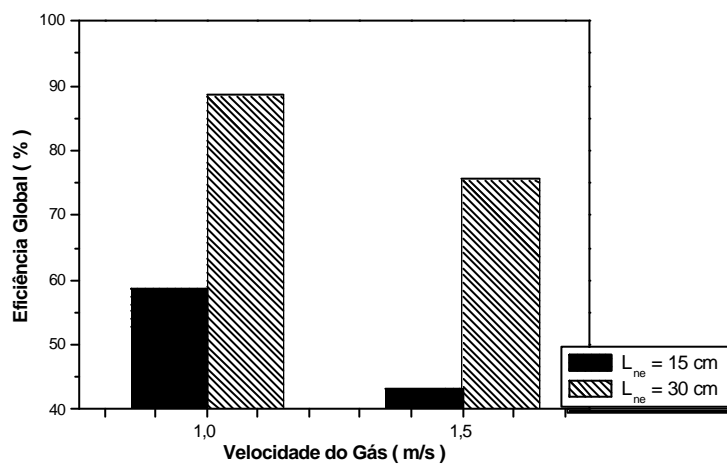


Figura 4.16 – Comparação da eficiência global de remoção para  $E_{ps} = 6$  kV/cm,  $2r_{se} = 0,45$  mm e  $s/2c = 1,0$ .

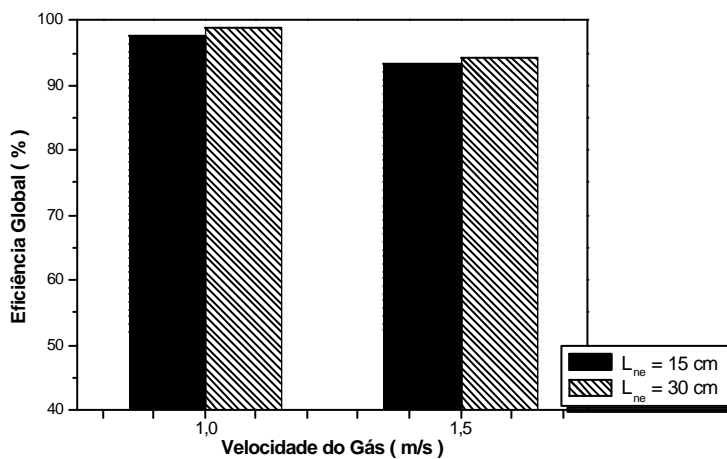


Figura 4.17 – Comparação da eficiência global de remoção para  $E_{ps} = 8$  kV/cm,  $2r_{se} = 0,45$  mm e  $s/2c = 1,0$ .

A partir das figuras mostradas anteriormente, pode-se observar que a eficiência aumenta com o tamanho do precipitador. Este comportamento era esperado, uma vez que há um aumento do tempo de residência das partículas no equipamento, havendo mais tempo para que as partículas com menor carga elétrica atinjam as placas coletoras. Caso fosse possível determinar a eficiência fracionária do processo, é provável que o ganho na eficiência corresponderia à coleta das partículas menores, já que as maiores ficam retidas logo na entrada do precipitador. Esse aumento é menos significativo para os maiores valores de campo elétrico, nos quais a força de atração das partículas para as placas é maior, compensando parcialmente o menor tempo de permanência das mesmas dentro do equipamento.

Pode ser notado o efeito da velocidade na eficiência de remoção. Com o aumento da mesma, há uma elevação da penetração de partículas, para o precipitador menor. Entretanto, para o equipamento maior, seu efeito não é tão significativo, favorecendo o tratamento de maiores vazões de gás.

#### Efeito do campo elétrico:

O efeito do campo elétrico na eficiência de remoção dos precipitadores eletrostáticos está apresentado na Figura 4.18 a Figura 4.24.

Para esse parâmetro, a ação da velocidade sobre a eficiência global é mais pronunciada para o campo mais baixo, situação na qual a atração das partículas para os eletrodos de coleta é menor e, portanto, estas são carregadas com mais facilidade pela corrente gasosa em direção à saída do precipitador.

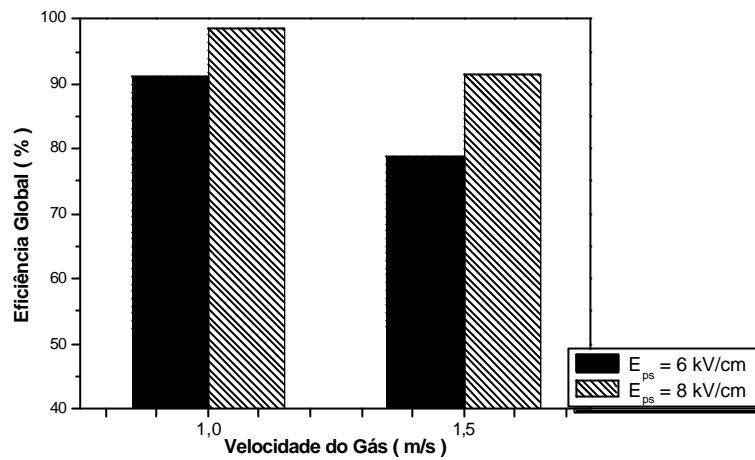


Figura 4.18– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,15 \text{ m}$ ,  $2r_{se} = 0,25 \text{ mm}$  e  $s/2c = 0,5$ .

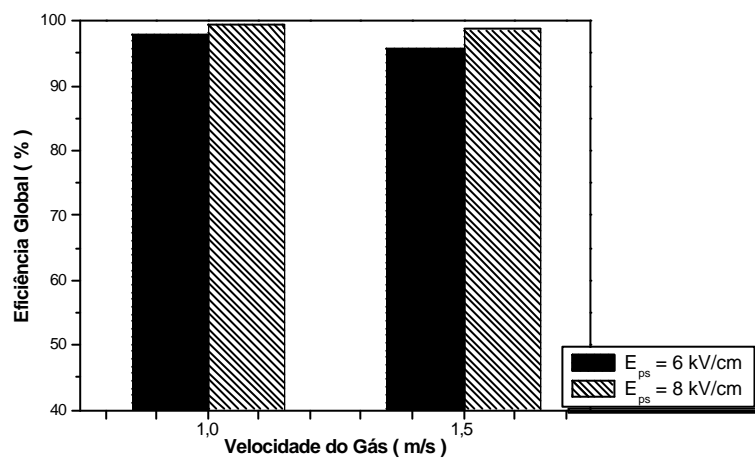


Figura 4.19– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,30 \text{ m}$ ,  $2r_{se} = 0,25 \text{ mm}$  e  $s/2c = 0,5$ .

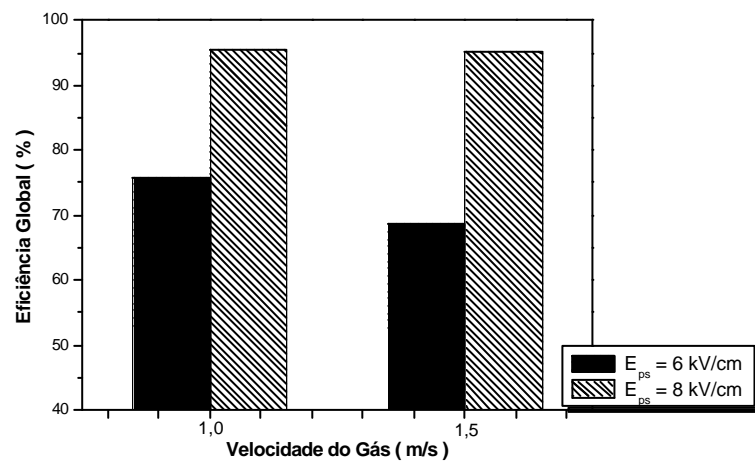


Figura 4.20 – Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,15 \text{ m}$ ,  $2r_{se} = 0,45 \text{ mm}$  e  $s/2c = 0,5$ .

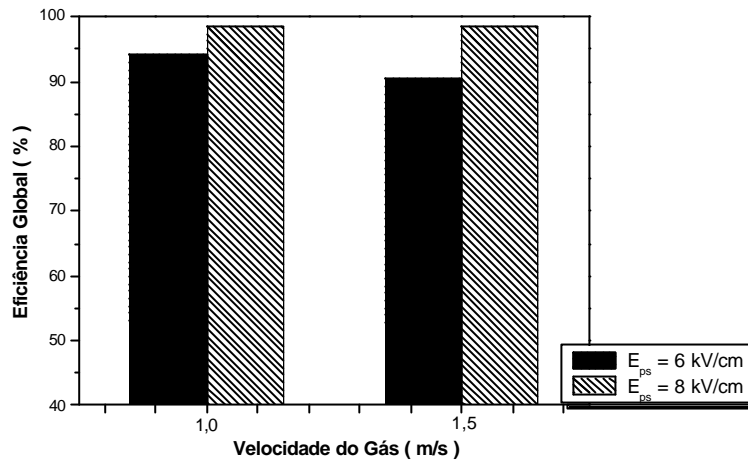


Figura 4.21– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,30 \text{ m}$ ,  $2r_{se} = 0,45 \text{ mm}$  e  $s/2c = 0,5$ .

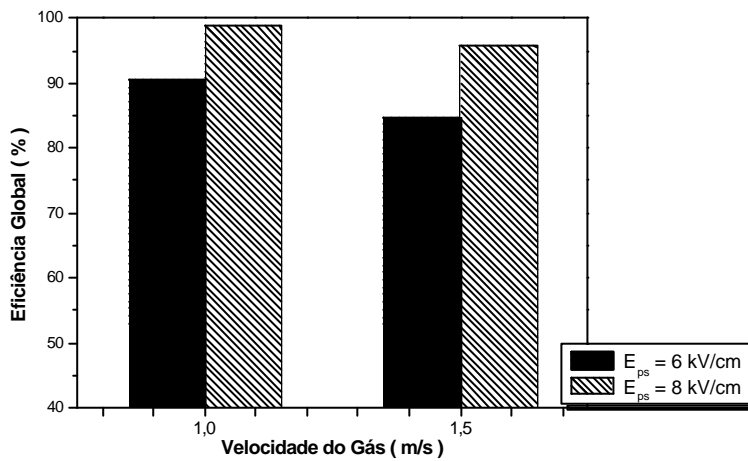


Figura 4.22– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,15 \text{ m}$ ,  $2r_{se} = 0,25 \text{ mm}$  e  $s/2c = 1,0$ .

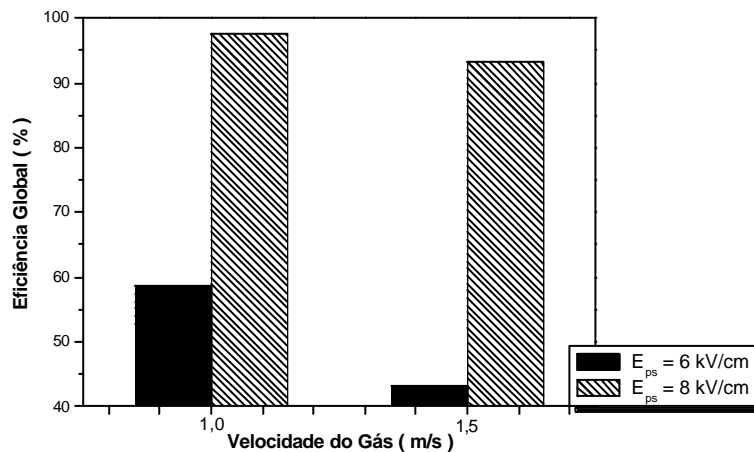


Figura 4.23– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,15 \text{ m}$ ,  $2r_{se} = 0,45 \text{ mm}$  e  $s/2c = 1,0$ .

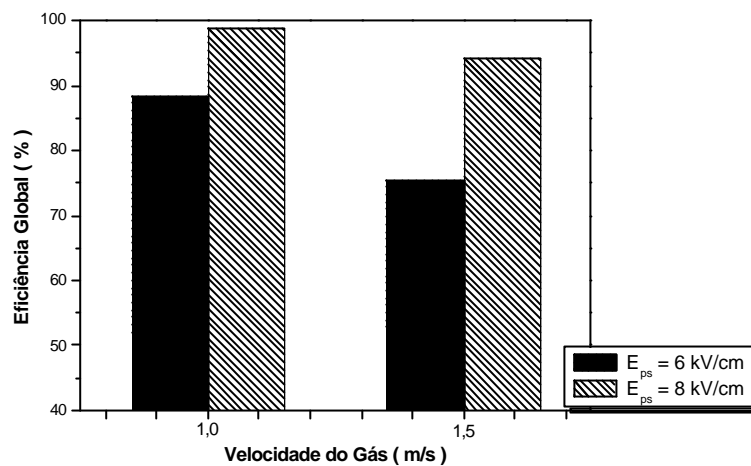


Figura 4.24– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,30 \text{ m}$ ,  $2r_{se} = 0,45 \text{ mm}$  e  $s/2c = 1,0$ .

Com a elevação do campo elétrico, há um aumento da eficiência para o mesmo equipamento, devido ao aumento da intensidade da força de Coloumb, responsável pela atração das partículas à placa coletora. Este efeito possui menor intensidade nos precipitadores mais longos, sendo o ganho de eficiência menor do que para os mais curtos, uma vez que nestes a eficiência possui valores mais baixos e, portanto, é mais suscetível a incrementos.

A análise da relação ganho de eficiência por gasto com energia elétrica deve ser feita para determinar qual o melhor campo elétrico, majorando a remoção de partículas e minimizando os custos, sempre tendo em vista a legislação a ser cumprida. Contudo, Masuda e Hosokawa (1995) afirmam que o custo com energia não é grande para o equipamento em questão e sempre devem ser levadas em consideração às ações pró-ativas (parte integrante do conceito de Atuação Responsável, Valle, 1995), que tem como princípio uma preocupação cada vez maior com o meio ambiente, levando a uma busca pela maior eficiência.

### Efeito do diâmetro do fio:

A Figura 4.25 a Figura 4.31 mostram a influência do diâmetro do eletrodo sobre a eficiência global para as velocidades analisadas.

De um modo geral, o fio com menor diâmetro apresentou maior eficiência de remoção, sendo seu efeito, assim como o da velocidade, mais acentuado para o menor campo elétrico. Este fato ocorre, devido a um fio com menor diâmetro gerar, para uma mesma tensão aplicada, uma maior corrente elétrica, como pode ser observado na Tabela 4.1 e Tabela 4.2. O mesmo comportamento foi obtido por Abdel-Sattar (1991), que atribui o resultado não só à diminuição do campo elétrico como também à diminuição da carga espacial. A maior geração de elétrons, juntamente com o maior campo, levam a uma maior eficiência.

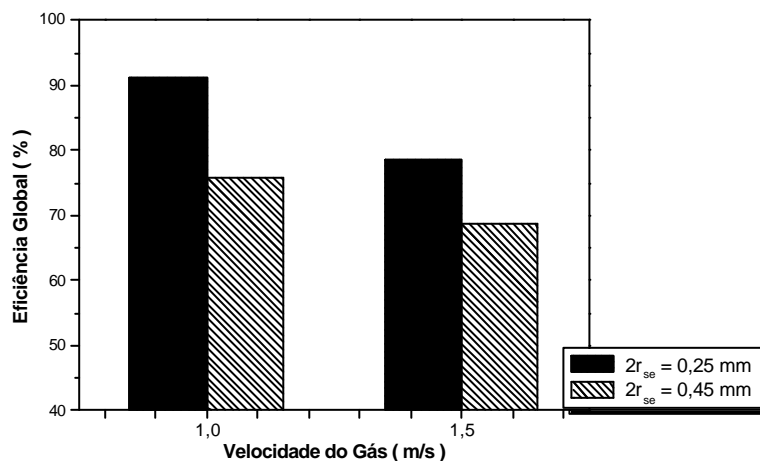


Figura 4.25– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{nc} = 0,15 \text{ m}$ ,  $s/2c = 0,5$  e  $E_{ps} = 6 \text{ kV/cm}$ .

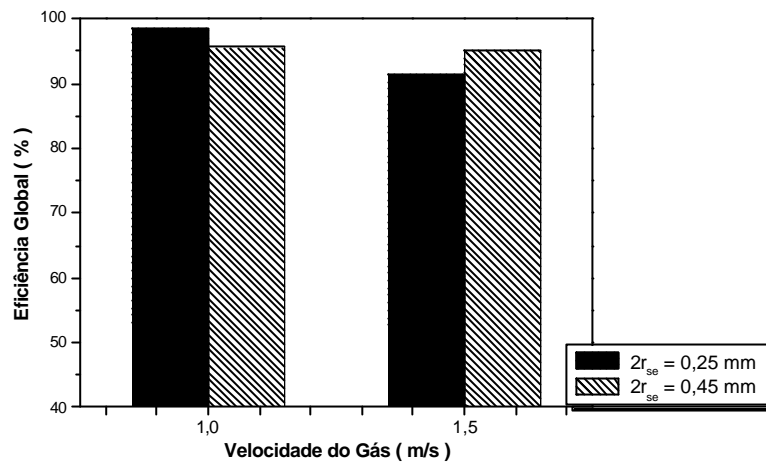


Figura 4.26– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,15$  m,  $s/2c = 0,5$  e  $E_{ps} = 8$  kV/cm.

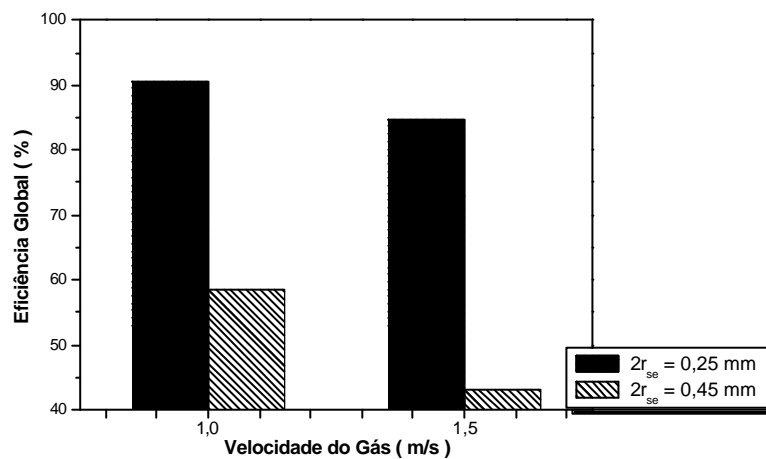


Figura 4.27– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,15$  m,  $s/2c = 1,0$  e  $E_{ps} = 6$  kV/cm.

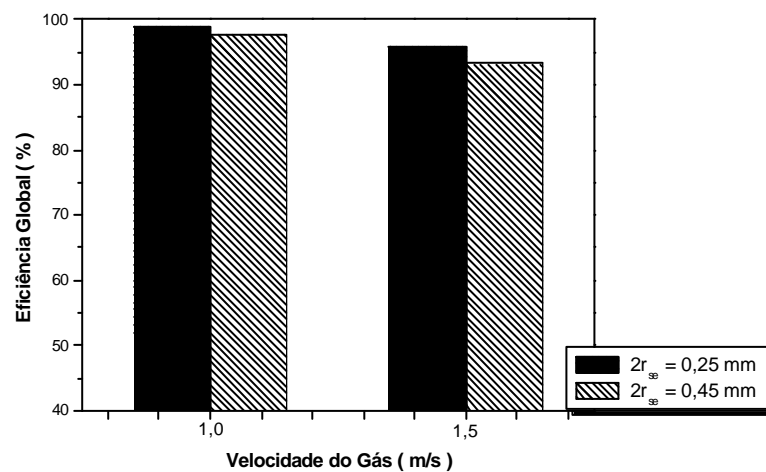


Figura 4.28– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,15$  m,  $s/2c = 1,0$  e  $E_{ps} = 8$  kV/cm.

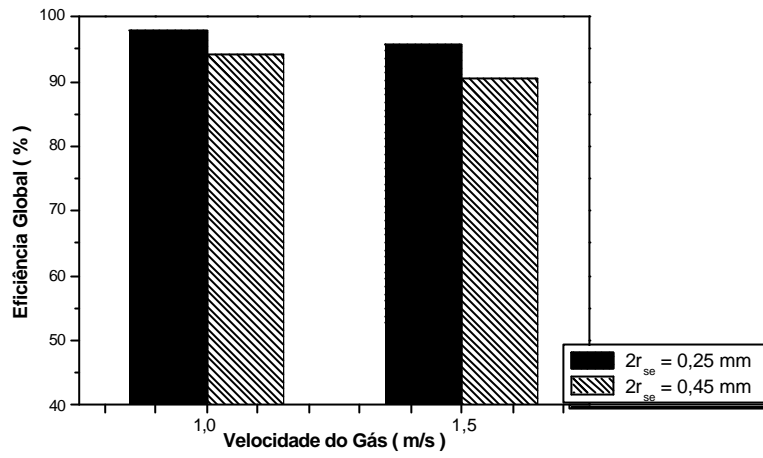


Figura 4.29– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,30$  m,  $s/2c = 0,5$  e  $E_{ps} = 6$  kV/cm.

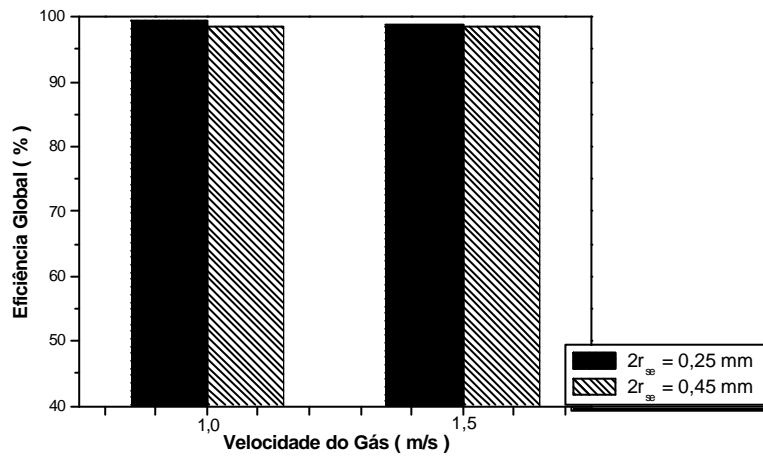


Figura 4.30– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,30$  m,  $s/2c = 0,5$  e  $E_{ps} = 8$  kV/cm.

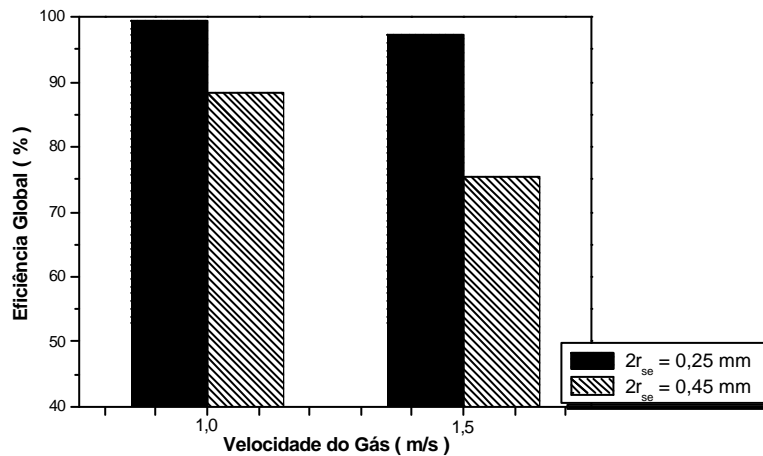


Figura 4.31– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,30$  m,  $s/2c = 1,0$  e  $E_{ps} = 6$  kV/cm.



### Efeito da relação $s/2c$ :

Os gráficos que representam a influência da relação  $s/2c$  sobre a eficiência dos precipitadores analisados estão apresentados na Figura 4.32 a Figura 4.38.

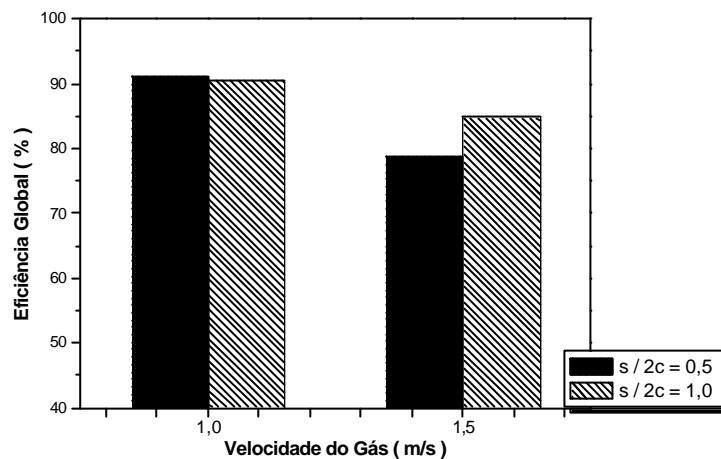


Figura 4.32– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,15$  m,  $2r_{se} = 0,25$  mm e  $E_{ps} = 6$  kV/cm.

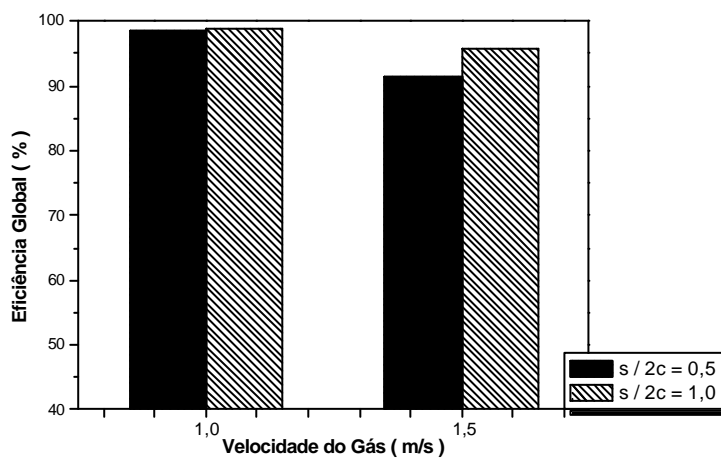


Figura 4.33– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,15$  m,  $2r_{se} = 0,25$  mm e  $E_{ps} = 8$  kV/cm.

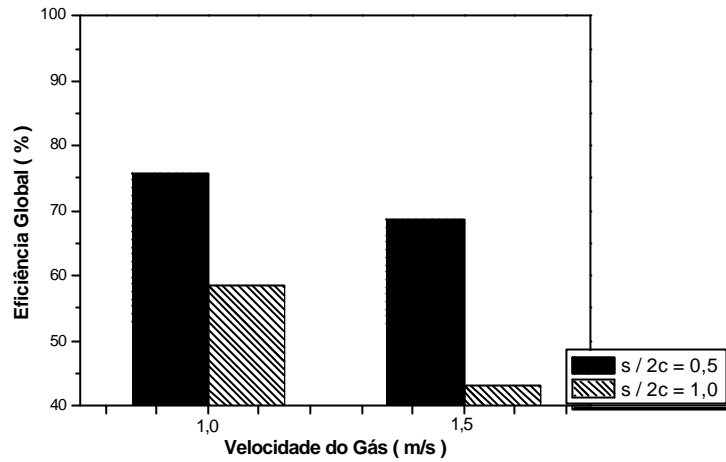


Figura 4.34– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,15$  m,  $2r_{se} = 0,45$  mm e  $E_{ps} = 6$  kV/cm.

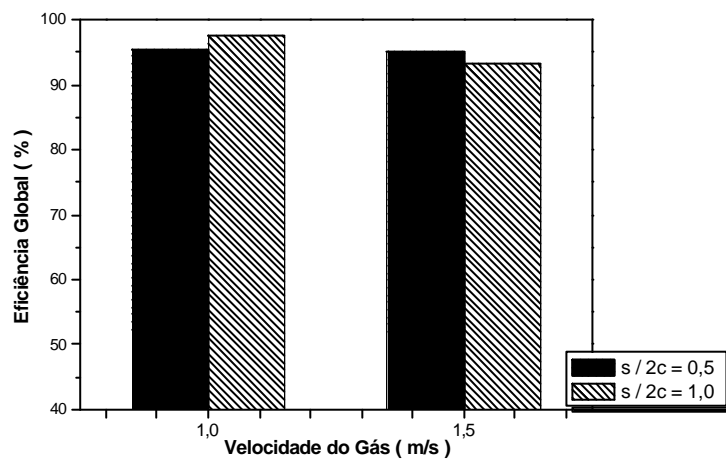


Figura 4.35– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,15$  m,  $2r_{se} = 0,45$  mm e  $E_{ps} = 8$  kV/cm.

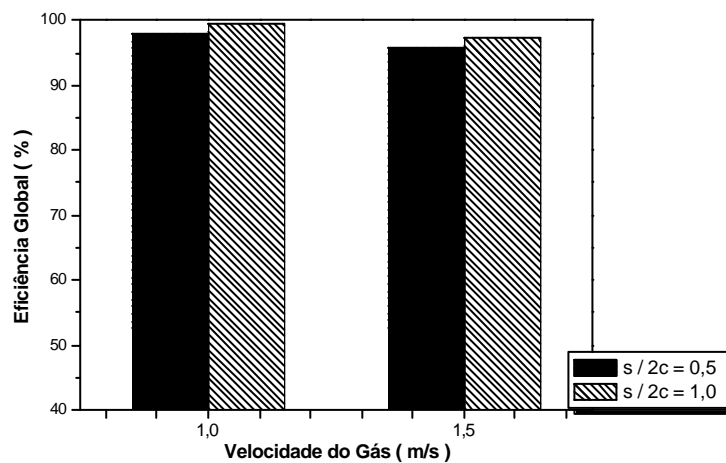


Figura 4.36– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,30$  m,  $2r_{se} = 0,25$  mm e  $E_{ps} = 6$  kV/cm.

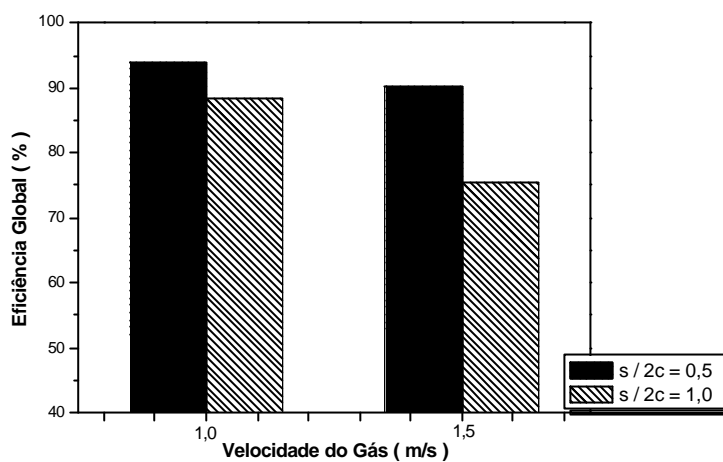


Figura 4.37– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,30$  m,  $2r_{se} = 0,45$  mm e  $E_{ps} = 6$  kV/cm.

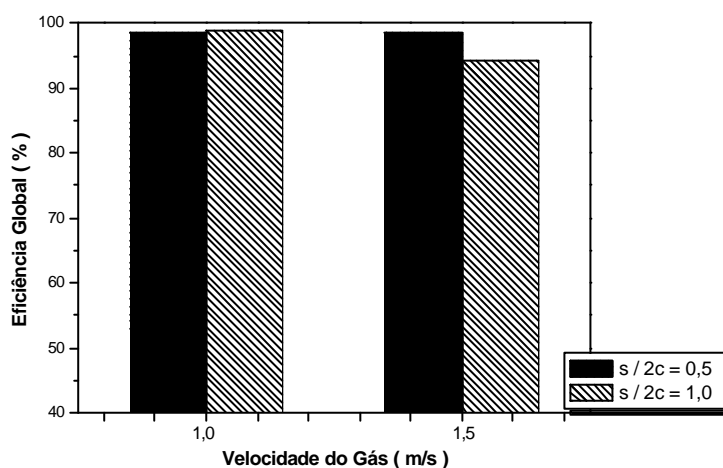


Figura 4.38– Comparação da eficiência global de remoção para  $L_{ne} = 0,30$  m,  $2r_{se} = 0,45$  mm e  $E_{ps} = 8$  kV/cm.

Neste estudo, a relação  $s/2c$  não apresentou uma tendência clara e os valores de eficiência ficaram muito próximos uns dos outros, apresentando uma grande influência apenas para a condição de baixo campo elétrico e fio com maior diâmetro. Contudo, de uma forma geral, pode-se apontar melhora na eficiência, quando se está operando com os eletrodos mais finos, para a configuração que possui uma relação  $s/2c$  igual a 1, enquanto que, para o fio mais largo, a

configuração menor foi mais eficiente. Esta inferência é mais clara quando a velocidade é maior.

A relação entre a eficiência e o parâmetro  $s/2c$  está relacionada à corrente gerada para cada configuração, e, portanto explica a tendência mencionada acima, pois, apesar de, em alguns casos, não haver variação da corrente, para o menor fio ( $E_{ps} = 8 \text{ kV/cm}$ ), a corrente foi maior para  $s/2c$  igual a 1. Já para o campo baixo, esta relação apresentou corrente ligeiramente menor que a igual a 0,5, quando operando com o fio de maior diâmetro.

Para as condições que apresentaram o mesmo valor de corrente, a eficiência se tornou muito próxima, com variações de aproximadamente 2%, mostrando que há influência da corrente elétrica, e que esta predomina sobre a da relação  $s/2c$ .

Cabe ressaltar que os gráficos apresentados nesta discussão foram analisados como um conjunto, destacando-se a tendência do comportamento dos resultados. Entretanto, pontualmente alguns dados apresentaram diferenças de eficiência global de remoção muito próximas da margem de erro obtida nos ensaios de reprodutibilidade (Apêndice G), não podendo ser considerado como uma variação de eficiência. O desvio obtido através dos ensaios de reprodutibilidade foi de aproximadamente 2%, mesmo valor da diferença obtida para os precipitadores operando com mesma corrente, o que evidencia a importância deste parâmetro.

Apesar da influência da relação  $s/2c$  não estar bem definida na literatura, a tendência observada nos gráficos está de acordo com Riehle (1997), ou seja, a maior eficiência está associada aos valores mais elevados de corrente. Entretanto,

nem sempre a configuração que apresenta a maior corrente é a que possui relação  $s/2c$  igual a 1, como sugerido pelo autor. Miller et al. (1998) observaram que a relação que fornece a maior eficiência varia em função da largura do duto utilizado. Através deste estudo, concluiu-se que ela pode também ser influenciada pelo campo elétrico empregado e pelo diâmetro do fio, como pode ser averiguado pelos gráficos apresentados. Nóbrega (2002) observou que valores maiores ou iguais a 1 favorecem a remoção de partículas finas, enquanto que, a partir de análise teórica, Abdel-Sattar (1991), obteve uma relação  $s/2c$  aproximadamente igual a 0,7.

#### **4.1.2.3 Avaliação do desempenho**

De modo geral, a configuração que tende a maximizar a remoção das partículas finas, de acordo com este estudo, é a composta pelo maior comprimento do precipitador, pelo fio de menor diâmetro e pela relação  $s/2c$  igual a 1, operando em velocidade baixa e campo pseudo-homogêneo alto.

Pode ser observado a partir dos dados obtidos que os valores de eficiência global encontrados são relativamente altos, maiores que 90% em grande parte dos ensaios. Este valor pode parecer pequeno para um equipamento como o precipitador eletrostático, que comumente apresenta eficiência de remoção muito próxima a 100%. Entretanto, cabe ressaltar que este estudo foi realizado com partículas muito pequenas, cujo diâmetro mediano é menor que 1  $\mu\text{m}$ , sendo o resultado obtido significativo na remoção do  $\text{PM}_{2,5}$ . Isto indica que o equipamento é apto para ser utilizado na remoção de material particulado fino ou como parte dos equipamentos de limpeza de gases, dependendo do grau de pureza requerida, como por exemplo: na aplicação de controle de ambientes internos, como em

hospitais, salas limpas, e indústrias de eletro-eletrônicos, de forma a obter uma atmosfera mais livre de contaminantes.

Com o intuito de avaliar a reprodutibilidade dos dados, algumas condições analisadas foram selecionadas para que novos testes fossem realizados. Os pontos repetidos foram escolhidos de modo que todas as variáveis fossem avaliadas. Os resultados do ensaio de reprodutibilidade estão apresentados no Apêndice G e mostraram que os dados possuem uma boa confiabilidade. Com desvio máximo de 5%.

#### **4.1.3 Comparação com Modelos Presentes na Literatura**

Os resultados experimentais obtidos foram comparados a alguns modelos presentes na literatura. Os modelos escolhidos para representar os dados foram: o modelo de Deutsch (1922), o mais empregado atualmente, o modelo de Zhibin e Guoquan (1992, 1994), por ser o mais apto a representar os dados experimentais de acordo com Kim e Lee (1999) e o modelo de Nóbrega (2002), por ser um aperfeiçoamento do modelo de Zhibin e Guoquan e por ter sido desenvolvido dentro do grupo de pesquisa no qual este trabalho foi realizado.

A determinação da carga das partículas se deu a partir das Equações 2.43 a 2.48. Este método foi o escolhido porque, além de amplamente utilizado na literatura, avalia a carga das partículas com o tempo. Isto poderia ter uma certa influência, uma vez que o material particulado possuía partículas tão pequenas quanto 0,6 micrômetros, que poderiam necessitar um maior tempo em contato com os elétrons para um bom carregamento. Contudo, é prática comum adotar a carga de saturação como a carga da partícula, já que, segundo Riehle (1997), o

tempo que a partícula atinge a saturação é de poucos segundos. O valor fornecido pelas equações mencionadas foi comparado com o valor da carga de saturação dada por Cochet (1961 apud Riehle, 1997) e a diferença foi insignificante, mesmo para os menores diâmetros analisados.

Os gráficos comparando os modelos com os dados obtidos para os dois campos elétricos estudados estão apresentados na Figura 4.39 a Figura 4.44.

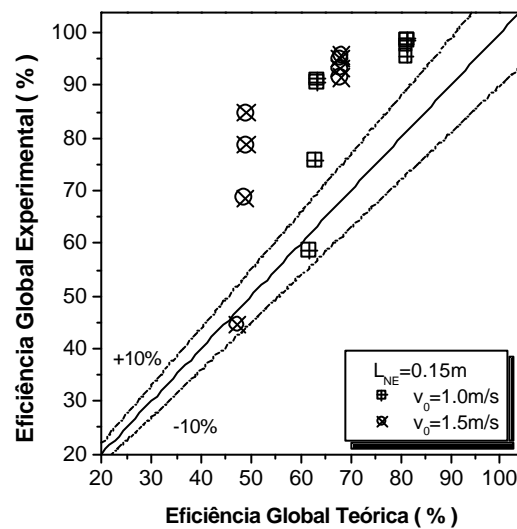


Figura 4.39 – Comparação com o modelo de Deutsch para  $L = 0,15\text{ m}$ .

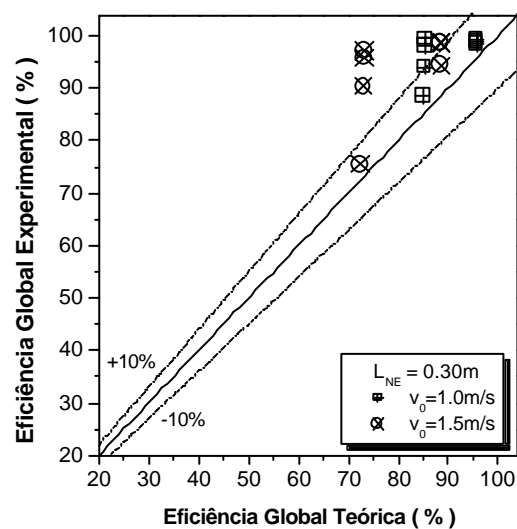


Figura 4.40 - Comparação com o modelo de Deutsch para  $L = 0,30\text{ m}$ .

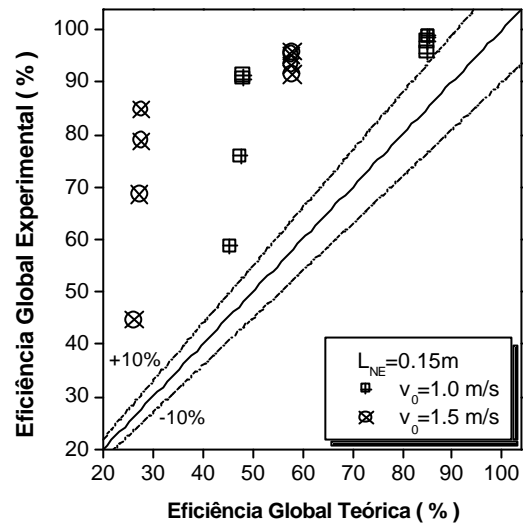


Figura 4.41 - Comparação com o modelo de Zhibin e Guoquan para  $L = 0,15$  m.

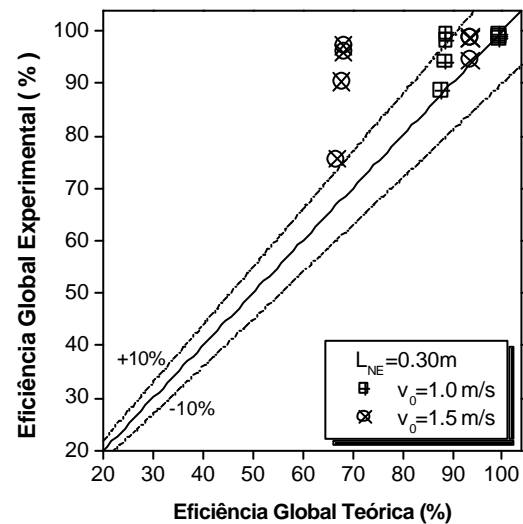


Figura 4.42 - Comparação com o modelo de Zhibin e Guoquan para  $L = 0,30$  m.



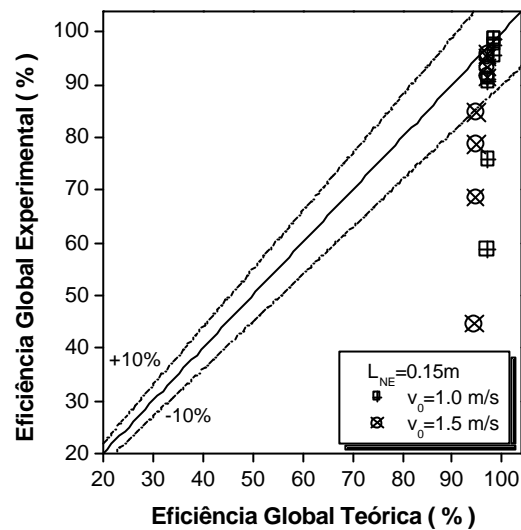


Figura 4.43 - Comparação com o modelo de Nóbrega para  $L = 0,15 \text{ m}$ .

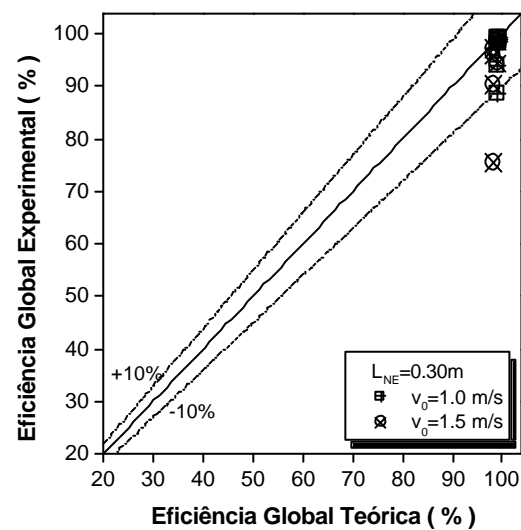


Figura 4.44 - Comparação com o modelo de Nóbrega para  $L = 0,30 \text{ m}$ .

Pode ser observado que os modelos representaram melhor o precipitador com maior comprimento e operando com menor velocidade, condições que forneciam maiores eficiências. Com exceção do modelo de Nóbrega (2002) para o precipitador maior, a diferença entre os modelos e os dados experimentais foi

maior que 10%. Enquanto o modelo de Nóbrega superestimou os dados, os outros dois modelos previram valores menores que os pontos experimentais obtidos.

Riehle (1997) também aplicou o modelo de Deutsch aos seus dados e o modelo apresentou valores bem mais baixos dos que os experimentais. De acordo com o autor, é possível que as partículas estejam sendo mais efetivamente carregadas do que o previsto ou que haja aglomeração de partículas no interior do equipamento, causando uma maior velocidade de migração.

Outro fator importante que pode estar acarretando a falha destes modelos é o uso do campo pseudo-homogêneo. Com o intuito de evitar uma simplificação tão forte, foi adotado o campo elétrico proposto por Kihm et al. (1985 e 1987) acrescido do efeito da carga espacial sugerida por Riehle (1997). Este também não é o campo real, pois as partículas carregadas e íons variam ao longo do equipamento, exigindo uma avaliação da variação dos mesmos com o espaço. Contudo, isto demanda um maior esforço computacional e não foi utilizado neste estudo.

O campo obtido com estas equações é máximo nos fios e diminui ao se afastar dos eletrodos de descarga, porém o efeito da carga espacial causa a elevação do mesmo, ocasionando valores bem mais altos junto às placas de coleta.

Kihm et al. (1985) sugerem o emprego de campo elétrico junto à placa de coleta ( $E_y$  para  $y=s$ ) como o valor mais apropriado para representar o campo dentro do precipitador. Este valor foi adotado neste estudo, através do cálculo do campo médio ao longo da placa, valor que quase não se modificava em função da carga espacial adotada. O campo foi representado por  $E_{\text{médio}}$ . Os valores obtidos para cada uma das condições estudadas estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3– Valores do campo elétrico médio em kV/cm.

$E_{\text{médio}} \text{ ( kV/cm )}$								
Variáveis	$r_{\text{se}} = 0,25 \text{ (mm)}$				$r_{\text{se}} = 0,45 \text{ (mm)}$			
	$E_{\text{ps}} = 6 \text{ (kV/cm)}$		$E_{\text{ps}} = 8 \text{ (kV/cm)}$		$E_{\text{ps}} = 6 \text{ (kV/cm)}$		$E_{\text{ps}} = 8 \text{ (kV/cm)}$	
	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$
$L=0,15$	11,71	8,65	24,79	18,49	7,27	4,27	17,30	12,86
$L=0,30$	12,71	9,22	26,29	20,20	8,17	4,78	18,65	13,64

O  $E_{\text{médio}}$  é mais alto que o  $E_{\text{ps}}$  para quase todas as condições analisadas, o que é coerente devido à ação da carga espacial. É interessante observar que o aumento do campo foi mais significativo para o eletrodo menor, para a relação  $s/2c$  igual a 0,5 e para o precipitador mais longo em todas as condições. O valor obtido apenas com o efeito da tensão aplicada foi aproximadamente igual para os dois diâmetros de eletrodos e ambos os comprimentos das placas. O que causou a elevação do campo para o menor eletrodo foi o efeito da carga espacial, ou seja a presença de íons e partículas carregadas. Quando avaliada a relação  $s/2c$  o efeito é inverso, enquanto a tensão acarreta maior campo para a relação igual a 1, o efeito da densidade de cargas é muito mais significativo para a relação igual a 0,5.

Os modelos foram recalculados utilizando os novos valores de campo elétrico, e os resultados estão apresentados na Figura 4.45 a Figura 4.50. É possível constatar que o emprego do campo elétrico pseudo-homogêneo é uma aproximação muito forte. Com os novos valores, os modelos se apresentaram muito mais próximos dos dados experimentais, sendo que o erro na maioria das condições foi menor que 10%, uma grande melhoria.

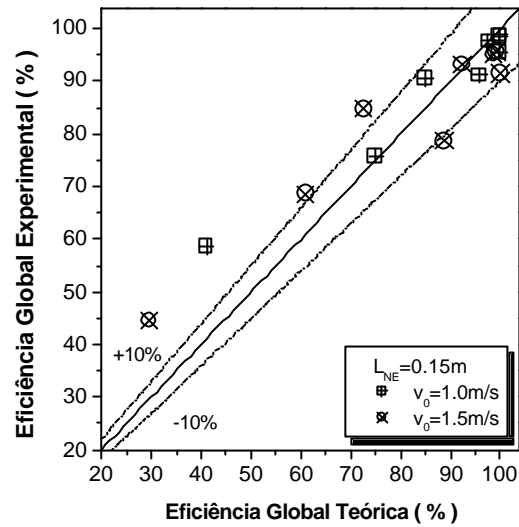


Figura 4.45 - Comparação com o modelo de Deutsch para  $L = 0,15\text{ m}$  para o novo valor de campo elétrico.

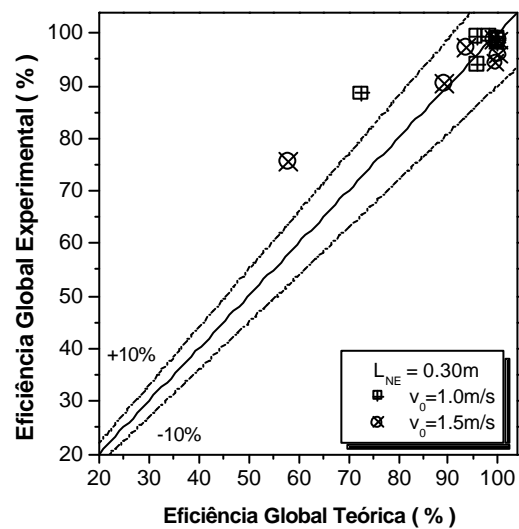


Figura 4.46 - Comparação com o modelo de Deutsch para  $L = 0,30\text{ m}$  para o novo valor de campo elétrico.

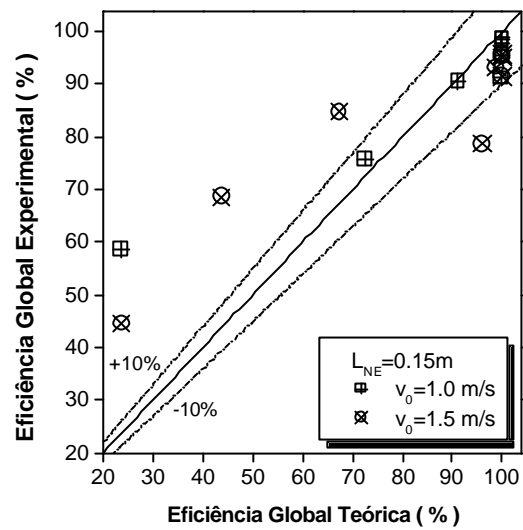


Figura 4.47 - Comparação com o modelo de Zhibin e Guoquan para  $L = 0,15\text{ m}$  para o novo valor de campo elétrico.

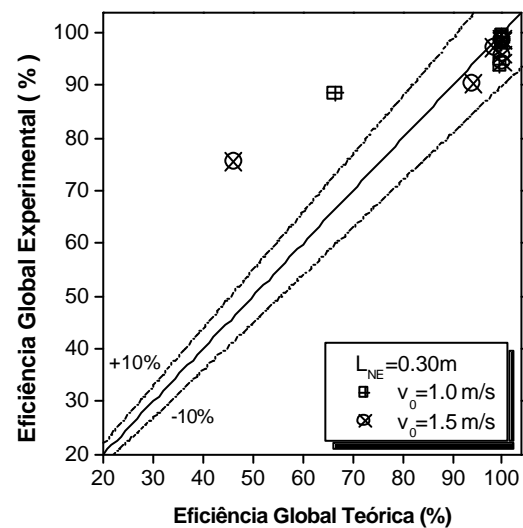


Figura 4.48 - Comparação com o modelo de Zhibin e Guoquan para  $L = 0,30\text{ m}$  para o novo valor de campo elétrico.

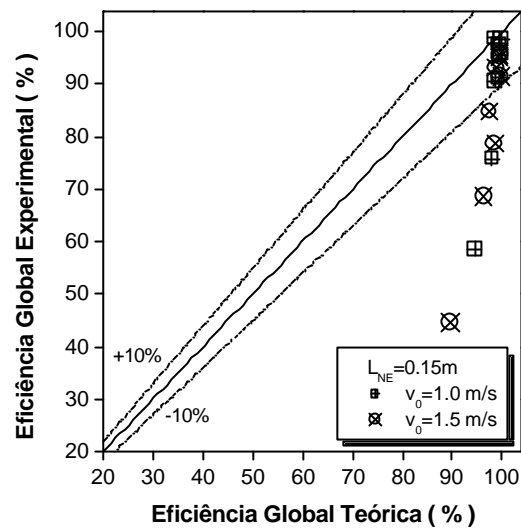


Figura 4.49- Comparação com o modelo de Nóbrega para  $L = 0,15\text{ m}$  para o novo valor de campo elétrico.

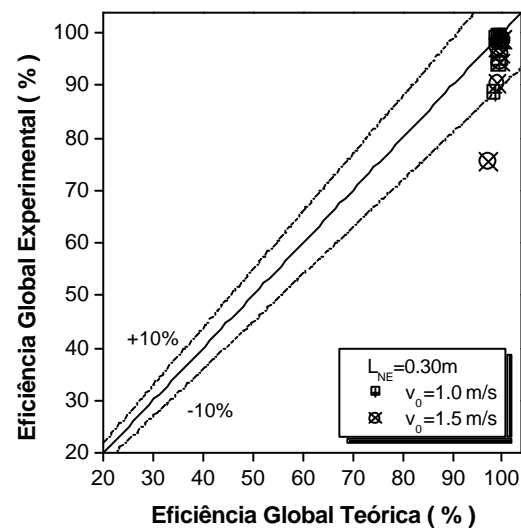


Figura 4.50 - Comparação com o modelo de Nóbrega para  $L = 0,30\text{ m}$  para o novo valor de campo elétrico.

Todos os modelos obtiveram valores mais próximos aos dados experimentais para esta situação. Entretanto o modelo de Nóbrega (2002) manteve

a tendência de superestimar a eficiência global e o de Zhibin e Guoquan (1992 e 1994) apresentou os desvios mais acentuados para o precipitador com maior comprimento. Assim, com exceção de dois pontos experimentais (para os quais o valor de  $E_{\text{médio}}$  foi menor que  $E_{ps}$ ), aquele que representou com maior precisão os dados experimentais foi o modelo de Deutsch, o modelo mais simples e amplamente empregado.

Este resultado é diferente do comumente encontrado na literatura, no qual o modelo de Deutsch sempre subestima os valores experimentais. Este resultado ocorre principalmente para a faixa submicrométrica, como observado por Riehle (1997), Kim e Lee (1999) e Nóbrega (2002), quando avaliaram a eficiência fracionária. A divergência quanto à eficácia do modelo de Deutsch entre este estudo e os demais citados, pode ser explicada pelo parâmetro medido. Neste trabalho foi avaliada a eficiência global, e não a fracionária. A eficiência global mede a porcentagem mássica total removida. Uma vez que as partículas maiores e mais facilmente removidas da corrente são as que apresentam maior massa, isso pode ter minimizado o efeito das menores não coletadas.

## **4.2 Etapa 2: Desempenho do Precipitador na Remoção de Nanopartículas**

### **4.2.1 Calibração do Gerador de Partículas**

A determinação do diâmetro das partículas geradas pelo “electrospray”, em função da concentração de sal na solução de alimentação era necessária, pois o equipamento não determinava o diâmetro gerado, apenas garantia que o material particulado era monodisperso. O método empregado foi a coleta das partículas para que as mesmas pudessem ser fotografadas no Microscópio Eletrônico de

Transmissão e, posteriormente, ser determinado o seu tamanho através do analisador de imagens Image Pro-Plus como mencionado no Capítulo Materiais e Métodos.

A captura das partículas para preparação da amostra foi realizada através da alimentação da corrente de gás com as partículas geradas sobre uma grade própria para análise no MET. A saída de ar foi colocada bem próxima ao porta-amostra, de forma a aumentar a probabilidade de captura das partículas. O mecanismo de coleta que predomina neste caso, dentre os descritos por Pich (1987) (interceptação, impactação inercial, deposição gravitacional, difusional, electrostática, London – van der Waals), é o mecanismo de difusão, causado pelo movimento Browniano, uma vez que o tamanho das partículas era reduzido e a distância da saída de ar à grade era pequena.

Após determinar as condições ótimas de operação, ou seja, a tensão na qual o gerador estava operando no modo jato-cônico, condições apresentadas no Apêndice I, foram realizados os ensaios de geração de partículas para cada solução analisada. Para tanto, foram preparadas diversas soluções com concentrações diferentes de modo que fosse possível construir uma curva de calibração referente ao diâmetro de partículas produzido pelo gerador em função da concentração da solução base. As concentrações testadas foram 0,5, 1,0, 1,5 e 5,0 g/l. Este conjunto possuía tanto a menor quanto a maior concentração utilizada nos testes de determinação da eficiência, de modo que fosse possível abranger o diâmetro máximo e o mínimo, aumentando a precisão da calibração. Os pontos intermediários não foram igualmente espaçados dentro da faixa estudada porque



quanto maior a concentração, maior a tendência ao entupimento dos capilares, e assim optou-se pelas concentrações menores para poupar os mesmos.

As fotografias obtidas com o emprego do MET para cada uma das concentrações analisadas estão apresentadas no Apêndice J. A título de ilustração a fotografia obtida para a concentração 5,0 g/l, bem como a sua microanálise que comprovava a presença de partículas de NaCl estão apresentadas na Figura 4.51 e Figura 4.52, respectivamente.

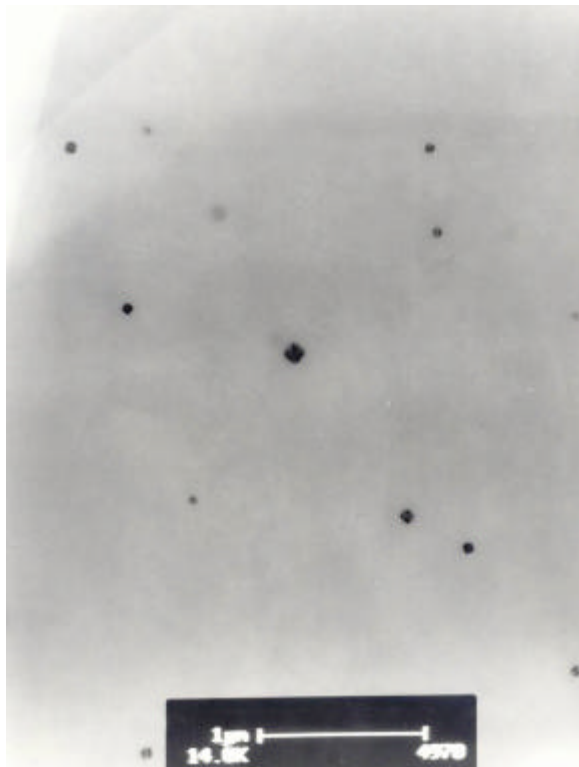


Figura 4.51 – Partículas obtidas com a solução salina de concentração igual a 5,0 g/l.

A determinação do diâmetro das partículas foi realizada através da análise das imagens, utilizando-se o software Image Pro-Plus, que possibilitou a

contagem do número de partículas e a medição do diâmetro médio de cada uma delas.

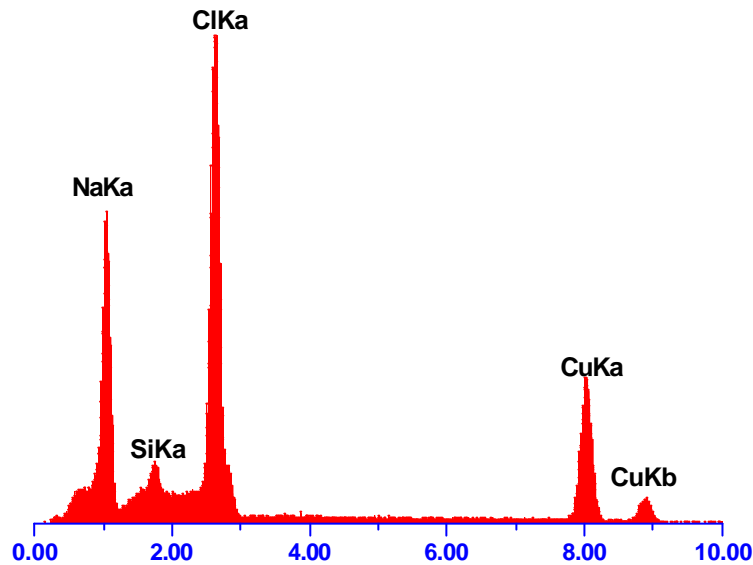


Figura 4.52 - Microanálise para a amostra com concentração igual a 5,0 g/l.

A partir dos diâmetros determinados para as concentrações analisadas, foi construído um gráfico relacionando o diâmetro da partícula com a concentração de cloreto de sódio na solução e ajustada uma curva, que serviu como calibração para as demais concentrações. A relação entre o diâmetro e a concentração foi linear, este mesmo comportamento foi observado por Chen et al. (1995) que desenvolveram o gerador empregado neste estudo e por Yoo et al. (1997) utilizando um atomizador modelo 3076, da TSI.

Os diâmetros para todas as concentrações utilizadas, obtidos através da equação apresentada na Figura 4.53, são apresentados na Tabela 4.4. Nesta também consta número de Knudsen para cada um dos diâmetros obtidos. Para o cálculo deste adimensional que representa a interação entre a partícula e o fluido

que a cerca é necessário, de acordo com a Equação 2.4, o valor do caminho livre médio do gás, que para as condições experimentais ( $P = 1\text{atm}$  e  $T = 299\text{ K}$ , aproximadamente), foi igual a  $0,0676\ \mu\text{m}$ .

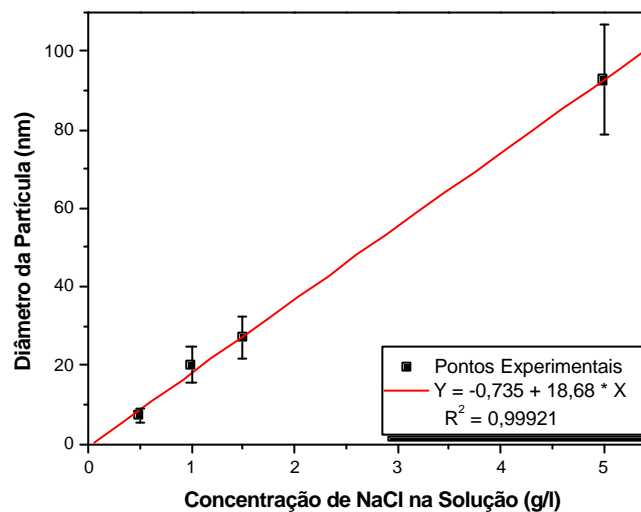


Figura 4.53 - Determinação do diâmetro em função da concentração de NaCl na solução.

Outro método de determinação do diâmetro, através de um balanço de massa no gerador, foi empregado com o intuito de certificar que o diâmetro medido estava correto. Para tanto foi obtida a massa de solução consumida por tempo pelo gerador, para a concentração de  $1,5\text{ g/l}$ , escolhida para a verificação. O valor medido foi de  $0,45\text{ mg/min}$ . Nos cálculos foi utilizado o número nominal de partículas geradas por tempo ( $10^7\ \#/cm^3$ ), fornecido pelo fabricante. A vazão de gás neste ensaio foi de  $2,3\text{ l/min}$ , sendo o diâmetro calculado para estas condições igual a  $29,9\text{ nm}$ , muito próximo ao obtido com a análise de imagens, validando os valores.

Tabela 4.4 – Diâmetro das partículas para diferentes concentrações e seus respectivos números de Knudsen.

Concentração da Solução (g/l)	Diâmetro das partículas (nm)	Número de Knudsen (Kn)
0,5	8,6	15,74
1,0	17,9	7,55
1,5	27,3	4,96
2,0	36,6	3,69
2,5	45,9	2,95
3,0	55,3	2,45
3,5	64,7	2,09
4,0	73,9	1,83
4,5	83,3	1,63
5,0	92,7	1,46

#### 4.2.2 Determinação da curva corrente-tensão

Os ensaios de determinação das curvas de corrente-tensão foram refeitos, para esta nova etapa do trabalho, devido as alterações nas condições experimentais. Em função da necessidade de um meio gasoso extremamente limpo, foram utilizados filtros para remoção de partículas que também diminuam a umidade do meio, para valores em torno de 7% e temperatura de 27° C.

Como a umidade do ar foi alterada, uma nova curva foi adicionada aos gráficos já apresentados, para avaliação desta característica do ar, na curva de corrente-tensão. O intuito foi verificar se a tendência de aumento da corrente se mantinha. Através da Figura 4.54 e Figura 4.55 pode-se observar que, ao contrário do esperado, para o precipitador maior, uma diminuição da umidade relativa para valores em torno de 7%, não acarretou alteração significativa nos valores de

corrente. Segundo Oglesby e Nichols (1978), o valor da corrente é função da mobilidade elétrica dos íons presentes no meio, a qual tende a aumentar com a elevação da temperatura. Com isto, é possível que a queda da temperatura em aproximadamente 5°C possa ter influenciado os resultados, mascarando um eventual aumento. Nóbrega et al. (2000) obtiveram um aumento de aproximadamente 10% no valor da corrente com um incremento de 12°C na temperatura do ar. Entretanto, para o precipitador menor a tendência se manteve, havendo considerável aumento da corrente gerada.

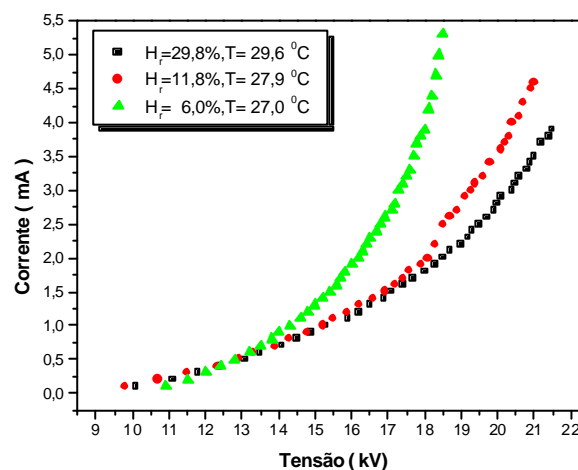


Figura 4.54 – Influência da umidade do ar na relação entre a corrente e a tensão aplicada para  $L_{ne} = 0,15$  m,  $2r_{se} = 0,45$  mm e  $s/2c = 1,0$ ,  $v = 0,5$  m/s.

Devido ao efeito da umidade no valor da corrente gerada, novos ensaios foram realizados, para determinar os pontos de operação para esta etapa do trabalho. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.56 a Figura 4.58. Além das configurações utilizadas anteriormente, um novo espaçamento entre os fios foi acrescentado nos ensaios, com o intuito de esclarecer o efeito do parâmetro  $s/2c$  avaliado na primeira etapa. Visando abranger a análise dos

parâmetros geométricos do precipitador, também foi acrescentada uma nova variável, a distância entre as placas do precipitador (2s), importante no projeto deste tipo de equipamento.

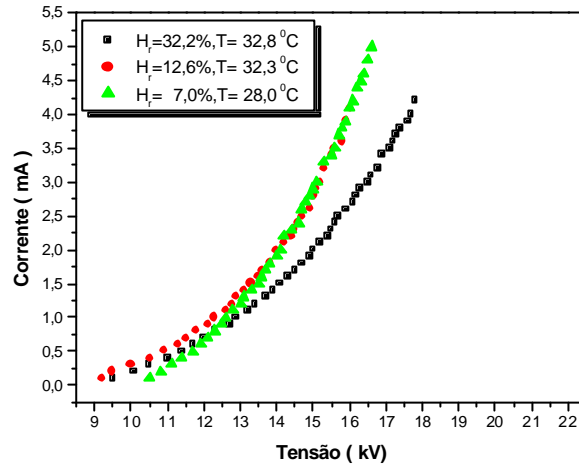


Figura 4.55 – Influência da umidade do ar na relação entre a corrente e a tensão aplicada para  $L_{ne} = 0,30\text{ m}$ ,  $2s = 0,04\text{ m}$ ,  $2r_{se} = 0,45\text{ mm}$  e  $s/2c = 1,0$ ,  $v = 0,5\text{ m/s}$ .

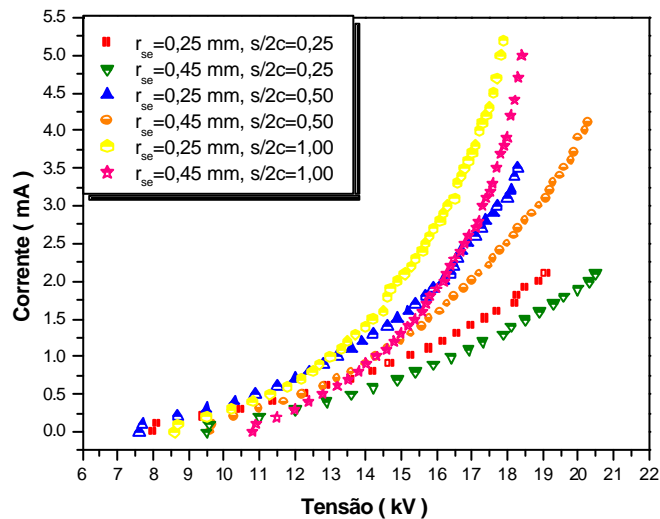


Figura 4.56 - Comparação das curvas corrente-tensão para  $L_{ne} = 0,15\text{ m}$ ,  $2s = 0,04\text{ m}$ ,  $v = 0,5\text{ m/s}$  para  $T = 27^\circ\text{C}$  e  $H_f = 6\%$ .

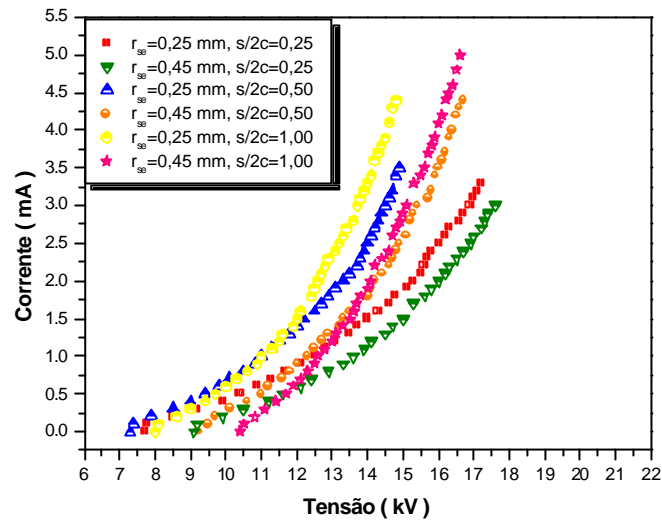


Figura 4.57 - Comparação das curvas corrente-tensão para  $L_{ne} = 0,30$  m,  $2s = 0,04$  m,  $v = 0,5$  m/s para  $T = 27^\circ$  C e  $H_f = 7\%$ .

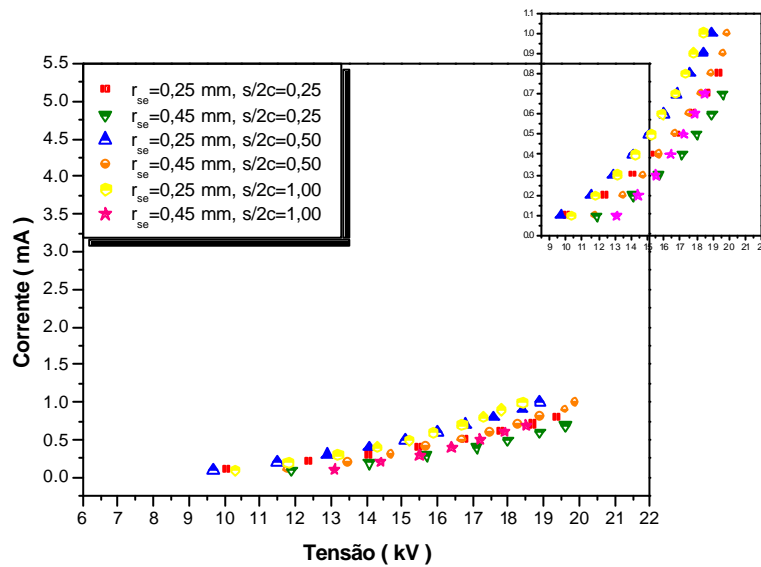


Figura 4.58 - Comparação das curvas corrente-tensão para  $L_{ne} = 0,30$  m,  $2s = 0,06$  m e  $v = 0,5$  m/s, para  $T = 25^\circ$  C e  $H_f = 12\%$ .

O comportamento apresentado pelas curvas foi o mesmo apresentado anteriormente, ou seja, o eletrodo mais fino causa uma elevação da corrente e o

início da mesma, para valores mais baixos de tensão. Entretanto, devido ao valor mais baixo da umidade nesta etapa, a corrente elétrica foi um pouco mais elevada.

Quando empregado um precipitador com uma largura maior, os valores de corrente foram muito mais baixos do que os gerados pelos precipitadores mais estreitos. Apesar da umidade nesta condição ter sido um pouco mais alta e a temperatura mais baixa, a diferença, como observado nos testes de avaliação do efeito da umidade, não foi grande o suficiente para justificar tamanha diminuição. Isto se deve ao fato dos íons e elétrons terem que percorrer uma distância maior para atingir o eletrodo de coleta, gerando um menor campo elétrico para uma mesma tensão aplicada, já que desconsiderando o efeito da carga espacial, o campo diminui com a distância em direção à região de coleta.

A nova relação  $s/2c$  avaliada apresentou valores mais baixos de corrente elétrica para todos os precipitadores utilizados, seguindo a tendência de maximizar a corrente quando a relação tende a 1. Uma inversão de comportamento ocorreu para o equipamento com  $2s = 0,06$  m. A relação  $s/2c$  igual a 1 não apresentou valores mais altos quando comparados a outras relações, chegando até a ser mais baixa que a relação  $s/2c = 0,5$  para o fio grosso. Isto mostra que realmente existe uma configuração que maximiza a corrente gerada e que ela depende da largura do precipitador, como sugerido por Miller (1998). Infelizmente, por limitações devido ao tamanho do equipamento, não foi possível realizar ensaios com um número de fios que resultasse em uma relação  $s/2s$  maior que a unidade, de forma a avaliar se, com um maior número de fios, há uma interferência tal entre os campos de cada eletrodo que acarretaria em uma



diminuição da corrente, comprovando que a máxima corrente ocorre para  $s/2c$  igual a 1.

#### 4.2.3 Resultados de eficiência

As condições experimentais utilizadas neste estudo foram determinadas a partir de testes preliminares. Nesta etapa, a variável velocidade de escoamento do ar foi igual a 0,125, 0,25 e 0,5 m/s. Estes valores, menores do que o utilizado na indústria e os utilizados na etapa anterior, foram escolhidos devido a limitações do compressor de ar, que não mantinha a velocidade mais alta, em função da perda de carga causada por uma válvula agulha colocada na unidade experimental, para regular a velocidade e desviar uma alíquota de ar para o gerador de partículas.

Os ensaios foram realizados empregando o eletrodo de 0,25 mm, pois como pode ser observado na Etapa 1, o fio mais grosso apresenta o mesmo comportamento do fio fino, porém necessita de uma maior tensão para gerar o mesmo campo elétrico, implicando maior consumo elétrico para atingir as mesmas eficiências.

A condição elétrica mantida constante foi a densidade de corrente, que, juntamente com a potência por unidade de área de coleta, foi a variável que manteve as condições elétricas semelhantes entre os diferentes precipitadores, segundo estudos de Falaguasta (2001). Os valores de densidade utilizados foram 1,8, 2,8 e 3,8 mA/m<sup>2</sup>. Apesar destes valores corresponderem a uma pequena faixa da curva de corrente-tensão para os precipitadores estudados, foram escolhidos em função da elevada eficiência obtida, mesmo para tensões não muito altas, como pode ser observado no Apêndice L. O uso de tensões mais altas acarretaria

altíssima eficiência de forma a não ser possível a comparação entre as diversas configurações empregadas.

Os parâmetros geométricos e de operação foram avaliados para três diâmetros de partículas, iguais a 8,6, 17,9 e 27,3 nm. Estes representam valores de concentração igualmente espaçados e compreendidos na porção menor do espectro analisado, de forma a estudar o efeito dos menores diâmetros no desempenho do precipitador.

Antes de iniciar os ensaios de determinação da eficiência, testes foram realizados com o intuito de avaliar o desempenho do gerador e o comportamento da concentração das partículas ao longo do equipamento de forma a evitar erros nas medidas e compreender melhor o funcionamento dos equipamentos. Estes resultados podem ser vistos no Apêndice M.

Nesta etapa, foi determinada a eficiência do precipitador eletrostático na remoção de partículas na faixa nanométrica. Assim como para o  $PM_{2,5}$ , a eficiência para este tamanho de partículas foi extremamente alta, atingindo valores de até 99,99%, o que comprova que o precipitador é um equipamento versátil, que pode ser empregado para várias faixas de tamanho, apresentando elevada eficiência. Este fato também é importante, pois serve como respaldo para o uso deste aparelho na limpeza de gases, principalmente em ambientes internos e na coleta de nanopartículas formadas em meio gasoso, para uso industrial. Cabe ressaltar que os testes foram realizados com velocidade abaixo das comumente empregadas, sendo válidos somente para esta faixa. Seria interessante, para seu emprego em maior escala, a realização de testes que avaliassem velocidades maiores, com a finalidade de reduzir os custos de implantação do equipamento.

Esta seria uma opção interessante dada à elevada eficiência obtida e ao alto valor agregado às nanopartículas.

O estudo avaliou o efeito, no desempenho do equipamento, das variáveis: velocidade de escoamento do ar, densidade de corrente, comprimento do precipitador, largura do mesmo e relação  $s/2c$ . Os gráficos obtidos são apresentados a seguir em diferentes tópicos, separados de acordo com o parâmetro analisado.

Os ensaios foram realizados em uma temperatura média de 26° C e umidade relativa de 10%

#### Efeito da densidade de corrente e velocidade de escoamento do ar

Os resultados referentes ao efeito da densidade de corrente e da velocidade são apresentados na Figura 4.59 a Figura 4.67 e representam os dados obtidos com o diâmetro de 8,6 nm. Como os demais resultados possuem as mesmas tendências apresentadas, as demais concentrações são apresentadas apenas no Apêndice N.

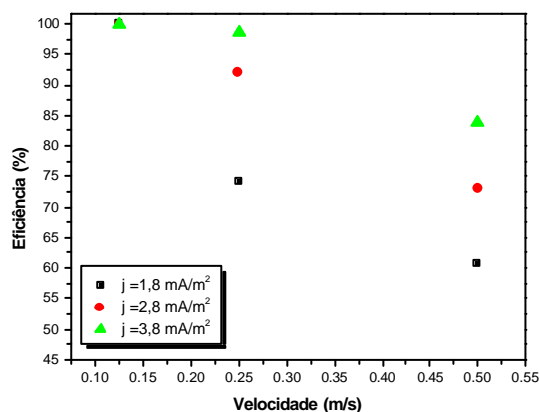


Figura 4.59 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 15$  cm,  $s/2c = 0,25$ ,  $2s = 4$  cm e  $d_p = 8,6$  nm.

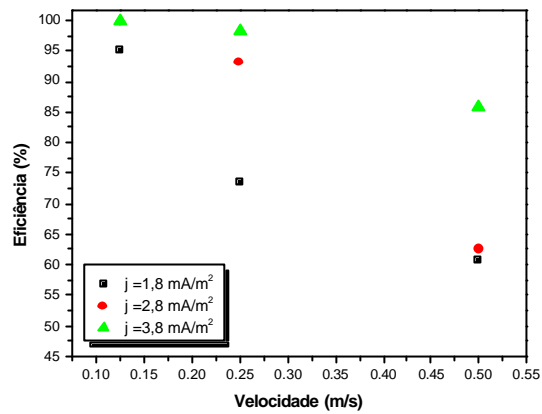


Figura 4.60 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 15$  cm,  $s/2c = 0,5$ ,  $2s = 4$  cm e  $d_p = 8,6$  nm.

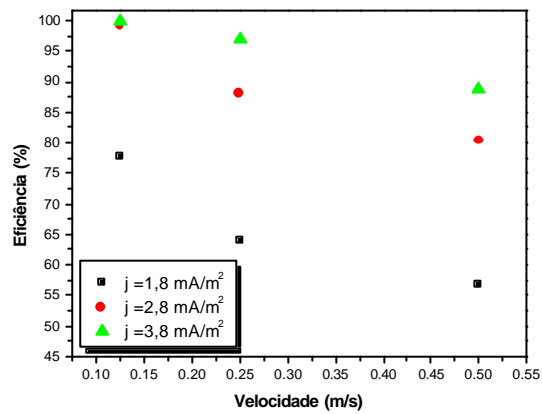


Figura 4.61 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 15$  cm,  $s/2c = 1,0$ ,  $2s = 4$  cm e  $d_p = 8,6$  nm.

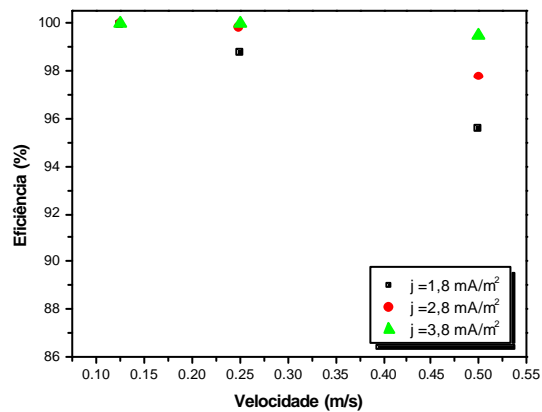


Figura 4.62 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30$  cm,  $2s = 4$  cm,  $s/2c = 0,25$  e  $d_p = 8,6$  nm.

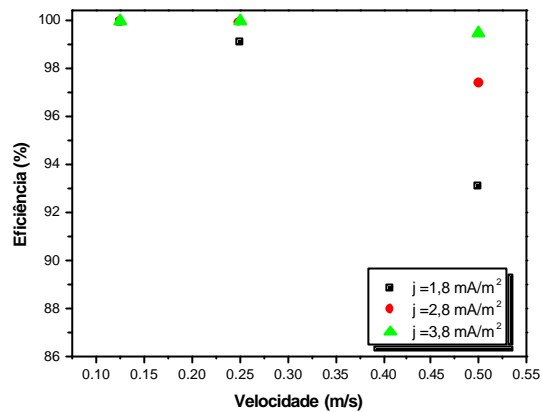


Figura 4.63 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30$  cm,  $2s = 4$  cm,  $s/2c = 0,5$  e  $d_p = 8,6$  nm.

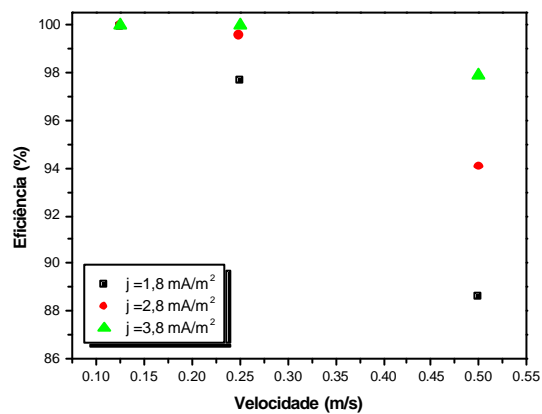


Figura 4.64 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30$  cm,  $2s = 4$  cm,  $s/2c = 1,0$  e  $d_p = 8,6$  nm.

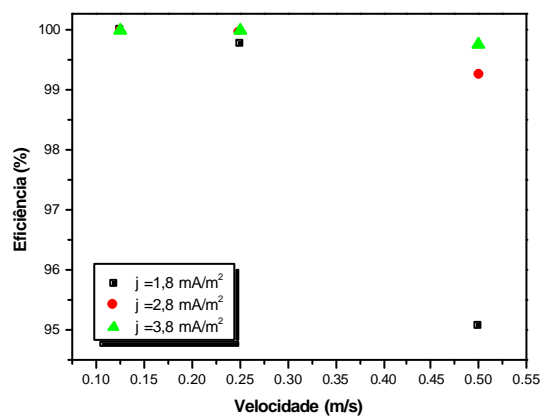


Figura 4.65 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30$  cm,  $2s = 6$  cm,  $s/2c = 0,25$  e  $d_p = 8,6$  nm.

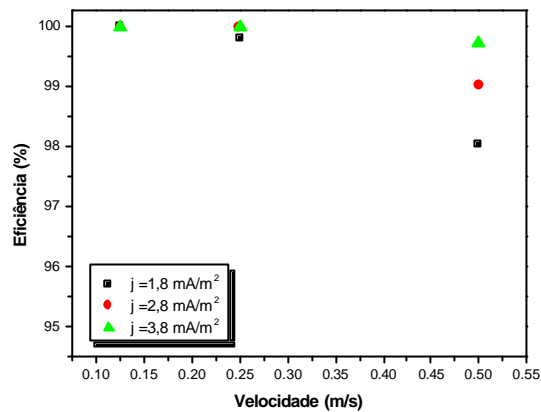


Figura 4.66 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30$  cm,  $2s = 6$  cm,  $s/2c = 0,5$  e  $d_p = 8,6$  nm.

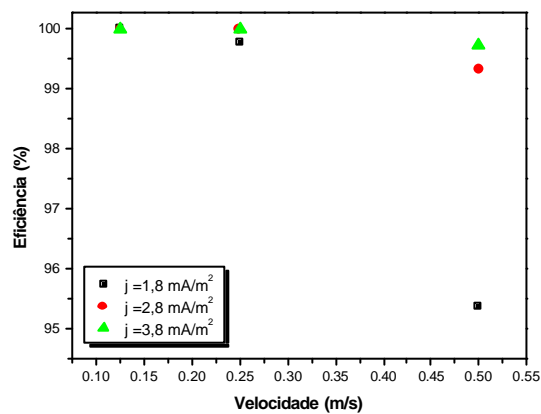


Figura 4.67 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30$  cm,  $2s = 6$  cm,  $s/2c = 1,0$  e  $d_p = 8,6$  nm.

Pode-se observar que, como esperado, com o aumento da densidade de corrente aplicada, há um aumento da eficiência. Porém, para velocidades tão baixas quanto  $0,125$  m/s, o efeito não é significativo, podendo acarretar apenas maior consumo de energia elétrica. A partir de um aumento da velocidade para  $0,25$  m/s, um aumento da eficiência com a densidade de corrente começa a ser perceptível, para os precipitadores com largura igual a  $4$  cm, tornando-se numericamente importante quando a velocidade é de  $0,5$  m/s.

As eficiências obtidas foram muito altas, principalmente para a velocidade mais baixa, na qual foi possível obter valores tão elevados quanto 99,99% de eficiência. Valores acima de 95% de eficiência predominaram para todas as condições quando se operou com precipitadores de 30 cm de comprimento. Este resultado é importante, uma vez que mostra ser possível a coleta eficiente de partículas nanométricas, sendo de grande interesse para o setor industrial que gera tal material particulado em fase gasosa, uma vez que, com o aperfeiçoamento e adequação da técnica para cada caso específico, há a possibilidade que a coleta de tais partículas seja viável. Também é possível a remoção deste material, de forma a reduzir a poluição ambiental causada por ele, se produzido em grande quantidade. E finalmente, pode ser empregado para coleta de nanopartículas em laboratórios, com a finalidade de estudar suas várias qualidades e aplicações.

Dentre os trabalhos presentes na literatura, que avaliaram o efeito do diâmetro das partículas, os que utilizaram NaCl foram o de Yoo et al. (1997) e Zhuang et al (2000).

Yoo et al. (1997) removeram partículas de NaCl de 30 a 200 nm em um precipitador de duplo estágio, em escala piloto, utilizando corona positiva. Os autores obtiveram eficiências que variaram de 93 a 98%, para velocidades de 3 m/s, tensão de carregamento de 12kV e de coleta de 6kV, havendo uma queda da eficiência para valores de até 75%, com o aumento da velocidade para 4,1 m/s.

O trabalho de Zhuang et al. (2000) avaliou a remoção de NaCl, com tamanho compreendido entre 50 e 200 nm, em um precipitador cilíndrico trabalhando com corona negativa. As eficiências obtidas variaram entre 70 e 80%, para uma tensão de 9 kV e velocidade de 0,35 m/s.

Os resultados obtidos neste estudo são compatíveis com os apresentados, sendo mais próximos às condições experimentais empregadas por Zhuang et al. (2000). Estes autores utilizaram um precipitador cilíndrico tipo tubo-fio, com 15 cm de comprimento e 3 cm de diâmetro. Apesar de não ser a mesma geometria empregada neste estudo, o tamanho dos equipamentos eram bem próximos. Comparando os resultados obtidos pelos autores citados, que trabalharam com 6 kV/cm, com os do precipitador menor, operando com velocidade de 0,25 e 0,5 m/s e tensão de 9,3 kV, equivalente a um campo pseudo-homogêneo de 4,65 kV/cm, pôde-se concluir que as eficiências obtidas neste trabalho (compreendidas entre 79 e 99,99%) são um pouco maiores do que as do artigo em questão, que operou com maior campo.

#### Efeito da relação $s/2c$

O parâmetro  $s/2c$  foi alvo de algumas pesquisas, contudo não há uma tendência clara sobre o mesmo, que apresentou comportamentos divergentes como anteriormente relatado. Para este tamanho de partículas, observou-se (Figura 4.68 a Figura 4.76) que não há uma tendência clara, e que os resultados foram aleatórios, pois não seguem um mesmo comportamento para um mesmo precipitador ou tamanho de partículas, obtido pelas diferentes concentrações.



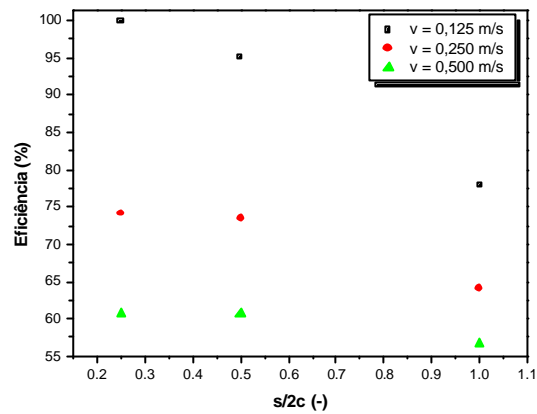


Figura 4.68 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=15$  cm,  $2s = 4$  cm,  $j = 1,8$  mA/m<sup>2</sup> e  $d_p = 8,6$  nm.

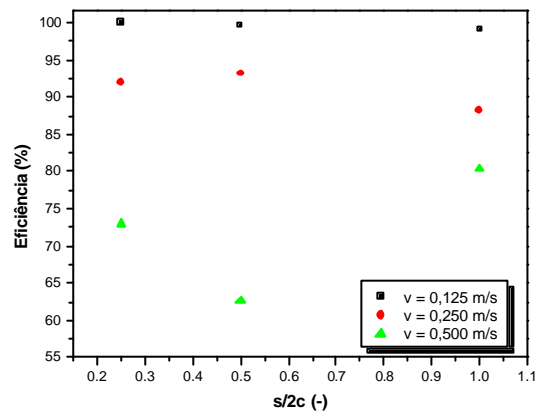


Figura 4.69 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=15$  cm,  $2s = 4$  cm,  $j = 2,8$  mA/m<sup>2</sup> e  $d_p = 8,6$  nm.

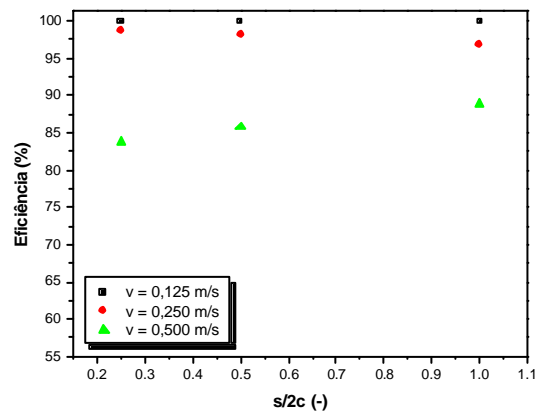


Figura 4.70 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=15$  cm,  $2s = 4$  cm,  $j = 3,8$  mA/m<sup>2</sup> e  $d_p = 8,6$  nm.

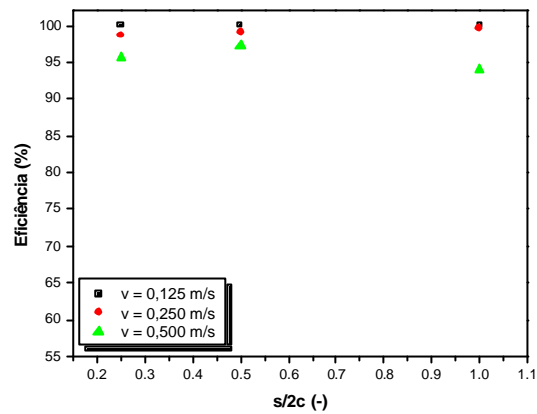


Figura 4.71 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 4$  cm,  $j = 1,8$  mA/m<sup>2</sup> e  $d_p = 8,6$  nm.

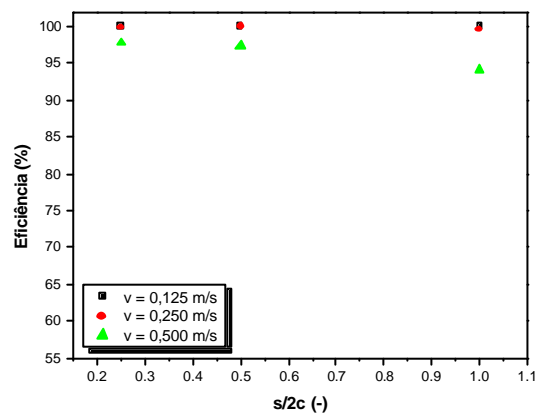


Figura 4.72 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 4$  cm,  $j = 2,8$  mA/m<sup>2</sup> e  $d_p = 8,6$  nm.

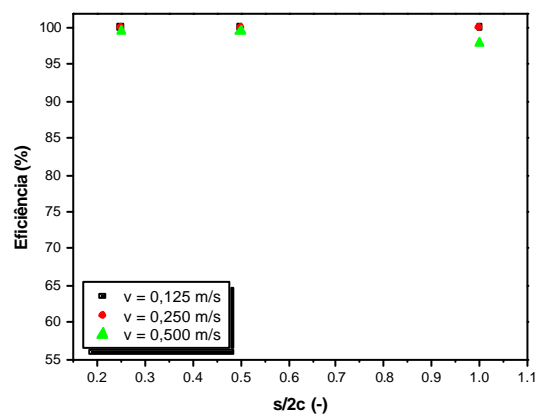


Figura 4.73 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 4$  cm,  $j = 3,8$  mA/m<sup>2</sup> e  $d_p = 8,6$  nm.

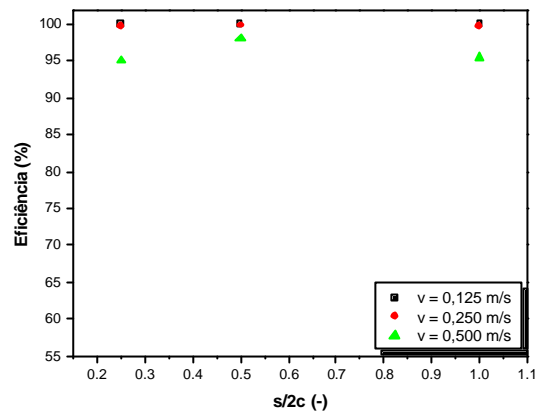


Figura 4.74 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 6$  cm,  $j = 1,8$  mA/m<sup>2</sup> e  $d_p = 8,6$  nm.

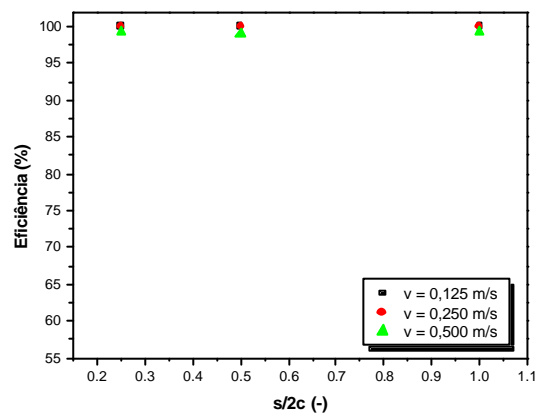


Figura 4.75 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 6$  cm,  $j = 2,8$  mA/m<sup>2</sup> e  $d_p = 8,6$  nm.

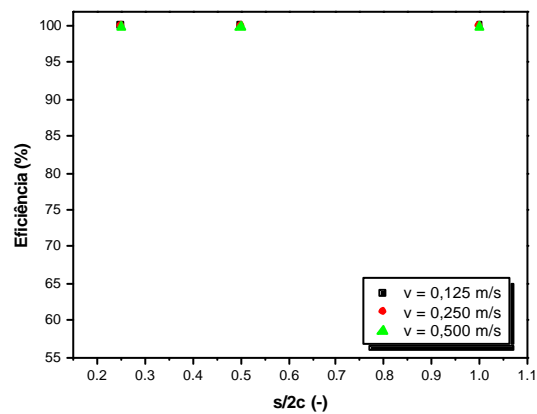


Figura 4.76 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 6$  cm,  $j = 3,8$  mA/m<sup>2</sup> e  $d_p = 8,6$  nm.

### Efeito da largura e comprimento do precipitador

O aumento do comprimento do precipitador acarreta uma elevação da eficiência para os valores mais altos de velocidade, sendo seu efeito praticamente desprezível na faixa analisada para uma velocidade tão baixa quanto 0,125 m/s. Isto ocorre devido a um menor tempo de residência das partículas dentro do equipamento mais curto, não sendo muitas vezes suficiente para que as partículas atinjam as placas de coleta. Contudo, este efeito é compensado pela diminuição da velocidade, a ponto de não ser significativamente visível para a menor velocidade avaliada. Estas tendências podem ser visualizadas através da Figura 4.77 a Figura 4.85. Nelas os precipitadores foram codificados, para diminuir espaço na legenda, sendo o precipitador com  $L=0,15$  m e  $2s=0,04$  m, chamado de Ppequeno, o com  $L=0,30$  m e  $2s=0,04$  m, Pgrande e o com  $L=0,30$  m e  $2s=0,06$  m, Plargo.

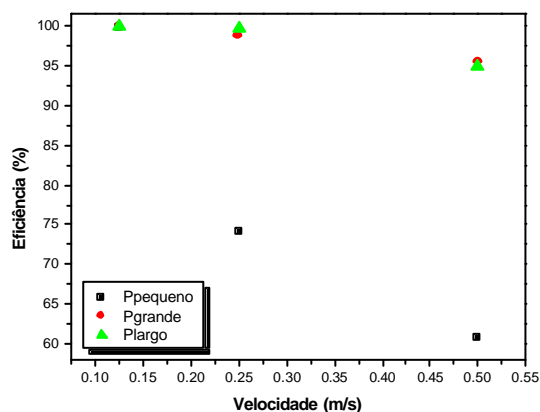


Figura 4.77 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,25$ ,  $j=1,8$  mA/m<sup>2</sup> e  $d_p = 8,6$  nm.

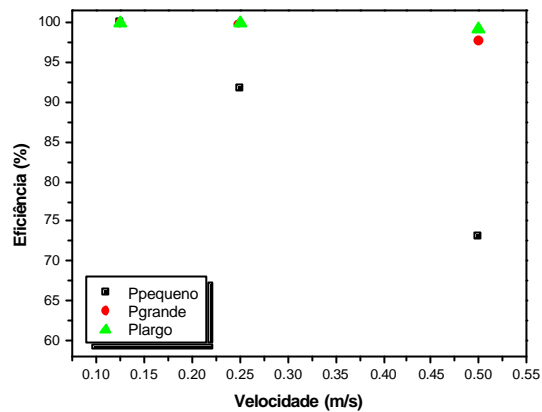


Figura 4.78 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,25$ ,  $j=2,8 \text{ mA/m}^2$  e  $d_p = 8,6 \text{ nm}$ .

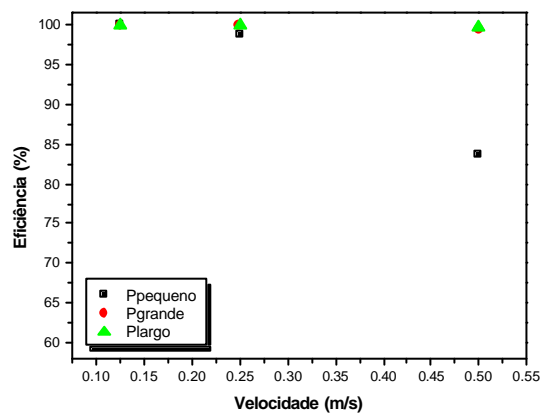


Figura 4.79 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,25$ ,  $j=3,8 \text{ mA/m}^2$  e  $d_p = 8,6 \text{ nm}$ .

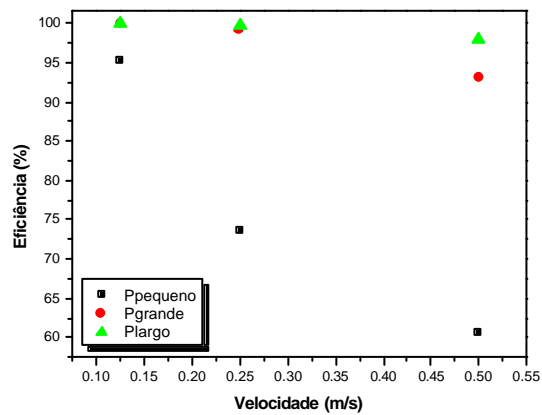


Figura 4.80 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,5$ ,  $j=1,8 \text{ mA/m}^2$  e  $d_p = 8,6 \text{ nm}$ .

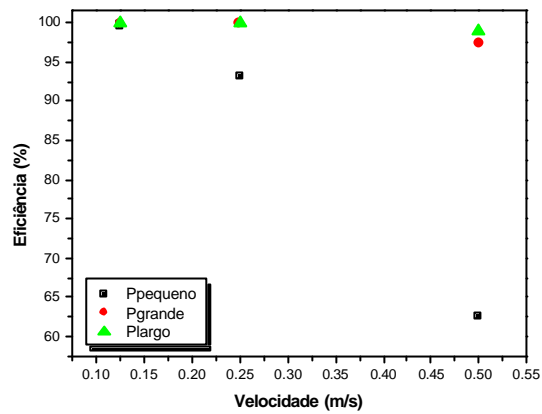


Figura 4.81 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,5$ ,  $j=2,8 \text{ mA/m}^2$  e  $d_p = 8,6 \text{ nm}$ .

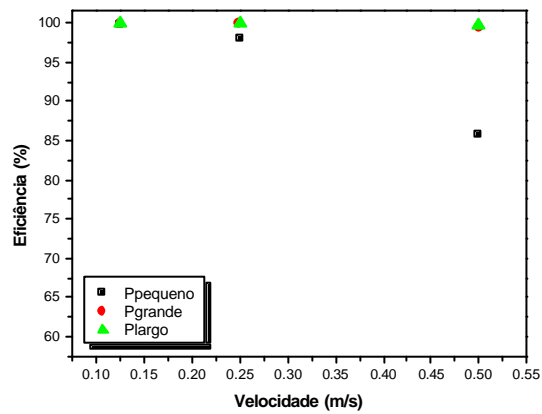


Figura 4.82 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,5$ ,  $j=3,8 \text{ mA/m}^2$  e  $d_p = 8,6 \text{ nm}$ .

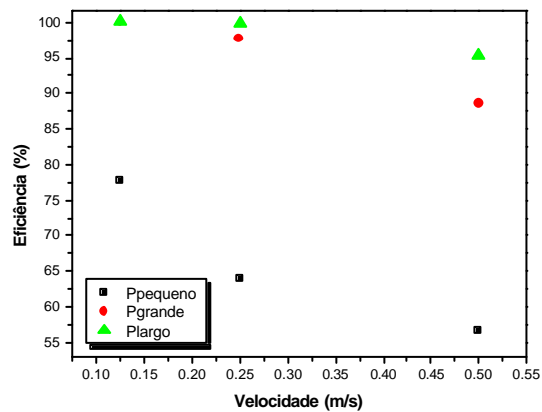


Figura 4.83 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 1,0$ ,  $j=1,8 \text{ mA/m}^2$  e  $d_p = 8,6 \text{ nm}$ .

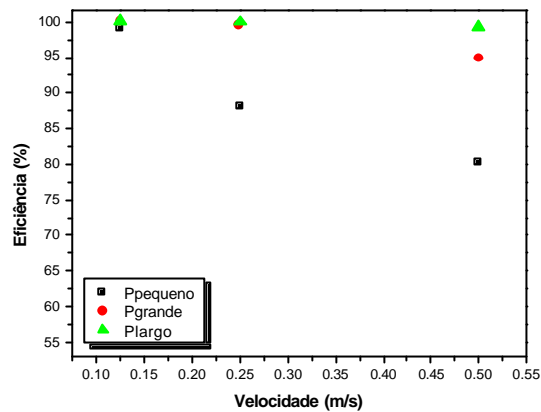


Figura 4.84 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 1,0$ ,  $j=2,8 \text{ mA/m}^2$  e  $d_p = 8,6 \text{ nm}$ .

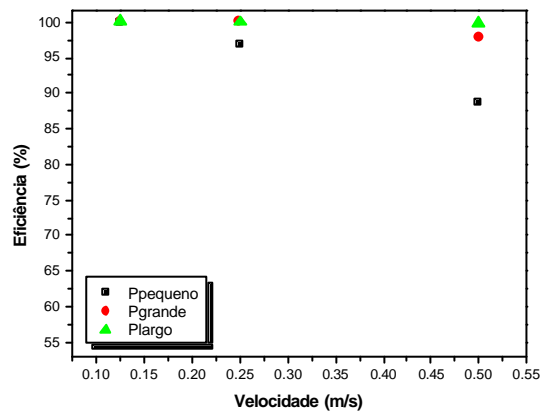


Figura 4.85 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 1,0$ ,  $j=3,8 \text{ mA/m}^2$  e  $d_p = 8,6 \text{ nm}$ .

A largura é um importante parâmetro a ser avaliado no desempenho do precipitador. Neste estudo, o seu efeito não foi tão pronunciado e tendeu a uma elevação da eficiência de acordo com um maior espaçamento entre as placas. Isto contraria o previsto no modelo de Deutsch, de acordo com Leonard et al. (1980). Este fenômeno conhecido como não deutschiano de acordo com Chang e Bai (2000), foi experimentalmente observado por vários pesquisadores.

Navarrete et al. (1997) constataram que o precipitador mais largo foi mais eficiente quando o material particulado possuía elevada resistividade, e tão

eficiente quanto, para um material com menor resistividade, se operado com a mesma área específica de coleta (área de coleta / vazão de gás). Nóbrega (2002) também observou a supremacia do precipitador mais largo, principalmente quando operando com baixos campos elétricos. Contudo, Patel et al. (1985), observaram que o precipitador com um duto mais largo é mais sensível à corona reversa, por precisar de maior tensão para gerar um mesmo campo elétrico, aumentando a coleta de partículas, o que gera, conseqüentemente, um maior campo nesta região, acelerando a corona reversa e deteriorando o desempenho do equipamento. Na ausência de tal fenômeno, o precipitador mais largo mostrou-se mais eficiente tanto quando operado com campo elétrico constante quanto quando mantida a densidade de corrente. Este comportamento é contrário à simulação feita por Chang e Bai (2000), no qual o precipitador com menor espaçamento apresenta a melhor performance. Este mesmo resultado foi observado através da aplicação de um modelo por Abdel-Sattar (1991).

A partir dos resultados deste trabalho pode-se concluir que as partículas tão pequenas quanto 10 nm apresentam a mesma tendência das partículas maiores, avaliadas nos estudos apresentados anteriormente, de uma melhor eficiência com o aumento da largura do duto.

Petersen (1981) e Ko e Ihm (1997) atribuem a melhoria obtida com dutos mais largos, a despeito da maior resistência à passagem da corrente e das partículas, ao aumento da carga iônica espacial no interior de tais dutos, o que acarreta elevação do campo elétrico junto às placas, melhorando a captura das partículas através da elevação da velocidade de migração das mesmas, compensando o efeito da turbulência.



Esta teoria é confirmada através do cálculo do campo elétrico, que comprova a tendência do precipitador mais largo em favorecer o aumento do campo nas placas devido ao efeito dos íons e partículas carregadas. Apesar do valor do campo para o precipitador ser menor quando avaliada somente a tensão aplicada, o valor final após a inclusão do efeito da carga é bem maior que para a condição mais estreita. Os valores de  $E_{\text{médio}}$  calculados utilizando a Equação 2.25 a 2.41 estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Campo elétrico para os precipitadores com  $2s=0,04$  e  $0,06$  m.

		$2s = 0,06$ (m)			$2s = 0,04$ (m)		
		$E_{\text{tensão}}$	$E_{\text{carga}}$	$E_{\text{final}}$	$E_{\text{tensão}}$	$E_{\text{carga}}$	$E_{\text{final}}$
$s/2c=0,25$	j1	0,18	5,96	6,15	0,27	3,13	3,41
	j2	0,21	7,98	8,20	0,28	4,67	4,95
	j3	0,23	9,81	10,05	0,29	6,10	6,39
$s/2c=0,5$	j1	0,95	3,22	4,17	1,08	1,74	2,82
	j2	1,06	4,44	5,51	1,11	2,62	3,72
	j3	1,15	5,56	6,71	1,15	3,41	4,56
$s/2c=1,0$	j1	1,58	1,75	3,34	2,03	0,91	2,94
	j2	1,78	2,41	4,19	2,08	1,37	3,44
	j3	1,91	3,05	4,95	2,15	1,79	3,94

A largura do precipitador apresenta, segundo Golkowski e Chojnowski (1983), um valor ótimo, que varia de acordo com as propriedades do pó e da partícula.

Foram construídas figuras (Figura 4.86 a Figura 4.88) em função da área específica de coleta ( $A_{\text{ne}}/Q$  ou SCA) para os três precipitadores, para a relação  $s/2c$  igual a 0,5 e todas as densidades de corrente empregadas. As demais

condições não foram apresentadas por possuírem valores muito próximos aos descritos, não acrescentando muito mais informação.

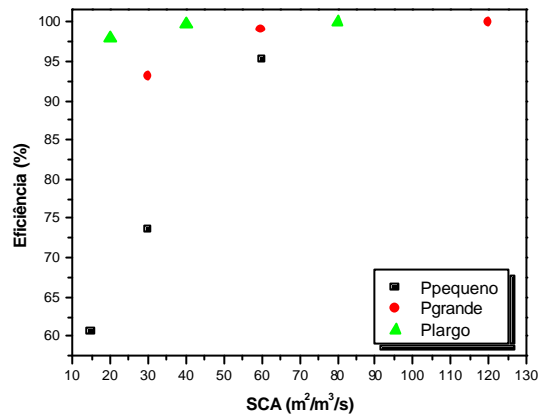


Figura 4.86 - Área específica de coleta para  $j=1,8 \text{ mA/m}^2$  e  $d_p = 8,6 \text{ nm}$ .

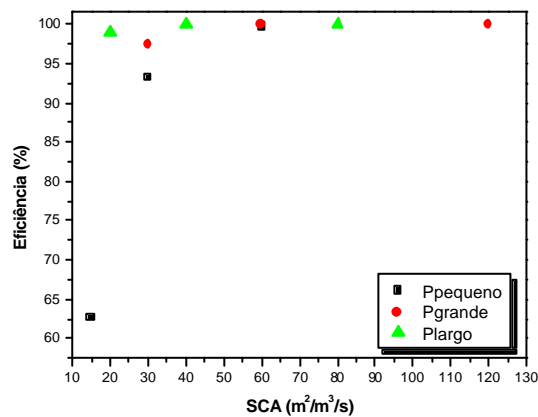


Figura 4.87 - Área específica de coleta para  $j=2,8 \text{ mA/m}^2$  e  $d_p = 8,6 \text{ nm}$ .

Através destas figuras, pode ser observado que, apesar de ser sutil a elevação na eficiência do precipitador mais largo, este utiliza uma área específica menor que o precipitador com largura igual a 4 cm, para obter a mesma eficiência

de remoção de partículas. Há uma redução de aproximadamente 33% na área, para cada velocidade estudada.

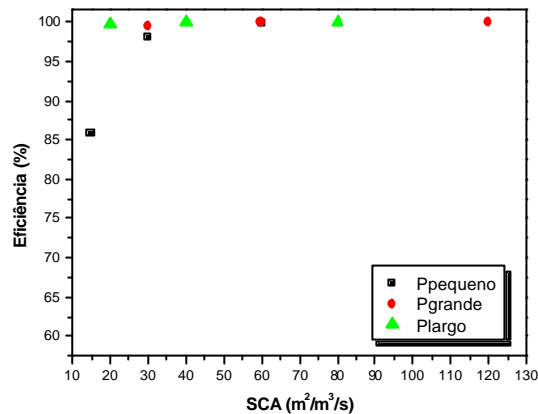


Figura 4.88 - Área específica de coleta para  $j=3,8 \text{ mA/m}^2$  e  $d_p = 8,6 \text{ nm}$ .

A potência consumida por unidade de vazão também é menor que para a condição menos estreita, principalmente para os menores valores de densidade de corrente, quando comparada com o precipitador de mesmo comprimento. A Figura 4.89 a Figura 4.91 mostram a comparação da potência para os equipamentos estudados. Pôde-se constatar que, em alguns casos, houve uma economia de energia de até 17%, utilizando o precipitador mais largo. Apesar deste necessitar de maior tensão para iniciar a passagem de corrente corona pelo precipitador, ele trata uma vazão maior com a mesma potência, gerando uma menor potência consumida por vazão.

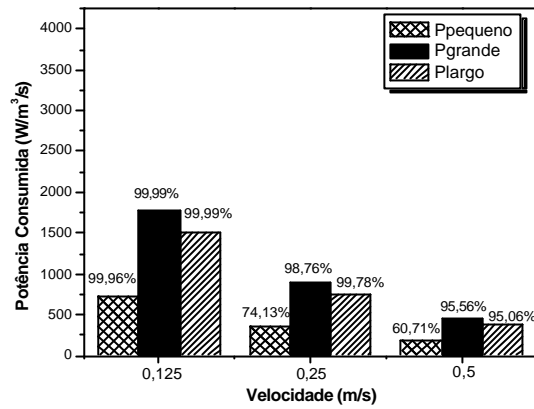


Figura 4.89 - Potência consumida por unidade de vazão para  $j=1,8 \text{ mA/m}^2$  e  $d_p = 8,6 \text{ nm}$ .

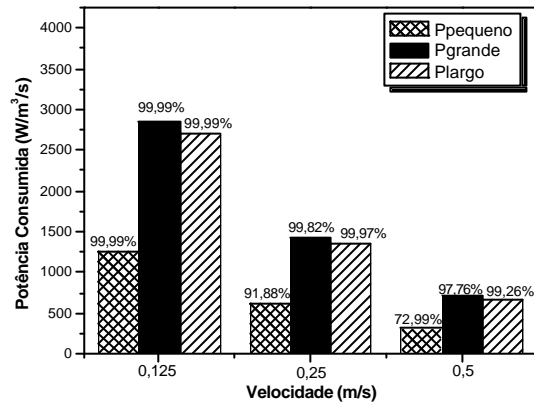


Figura 4.90 - Potência consumida por unidade de vazão para  $j=2,8 \text{ mA/m}^2$  e  $d_p = 8,6 \text{ nm}$ .

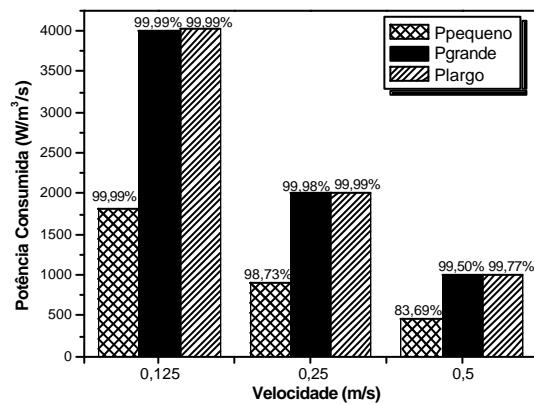


Figura 4.91 - Potência consumida por unidade de vazão para  $j=3,8 \text{ mA/m}^2$  e  $d_p = 8,6 \text{ nm}$ .

Outra vantagem em optar pelo duto mais largo é a diminuição do número de dutos necessários para tratar a vazão total de gás. Esta ação implica, de acordo com Offen e Altman (1991) e Petersen (1981), em menor gasto com a implantação do precipitador eletrostático, quando se tratar de médios e grandes volumes de gás. Segundo Petersen (1981), os gastos com aumento da geração de alta tensão, acarretados pelo maior espaçamento, podem ser muito elevados para precipitadores de pequeno porte.

#### **4.2.3.1 Eficiência fracionária de remoção das partículas**

Com a finalidade de verificar o comportamento do precipitador em remover partículas de diferentes diâmetros abaixo de 100 nm, foi determinada a eficiência fracionária. Para tanto foram realizados testes com diferentes concentrações de sal na solução de geração das partículas e como o material gerado é monodisperso, as eficiências calculadas foram compostas para avaliar a variação da remoção das partículas com o diâmetro das mesmas.

As curvas de eficiência construídas estão apresentadas na Figura 4.92, e foram obtidas utilizando o precipitador menor, com relação  $s/2c$  igual a 1 e operando com velocidade de escoamento do ar de 0,5 m/s.

Nota-se que, com a diminuição do diâmetro, há um aumento da eficiência até os diâmetros entre 18 e 27 nm. A partir deste ponto, ocorre novamente uma queda da eficiência do precipitador. Há, ainda, uma ligeira tendência ao aumento da eficiência quando o diâmetro atinge 73 nm, para o menor valor de densidade de corrente.

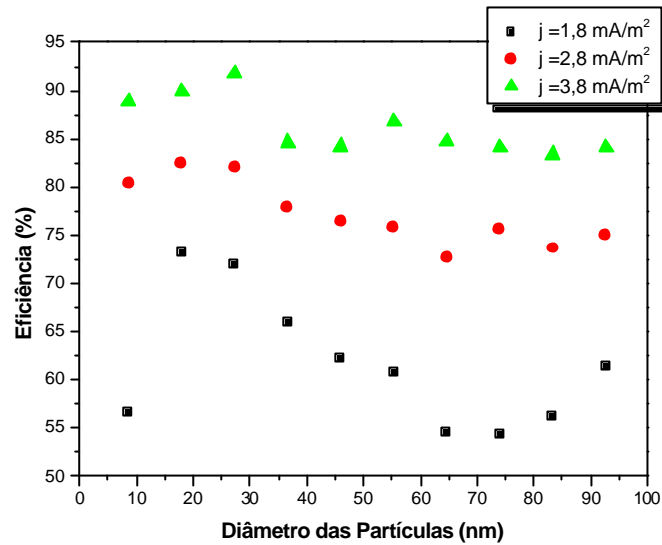


Figura 4.92 - Eficiência fracionária para  $L = 0,15\text{m}$ ,  $s/2c = 1$ ,  $2s = 0,04 \text{ m}$  e  $v = 0,5 \text{ m/s}$ .

O aumento da eficiência com a diminuição do diâmetro pode ser explicado pelo fato de que, com a diminuição do tamanho, maior é a mobilidade da partícula. Em contrapartida também há uma redução de sua carga, de modo que ocorre o ponto de mínimo. Neste estudo, não foi possível afirmar que o ponto de mínimo está localizado na região correspondente a 73 nm, porque avalia somente uma fração muito fina de partículas, não obtendo valor de eficiência até valores de 1  $\mu\text{m}$ . Cabe ressaltar que apenas a condição de menor densidade de corrente apresentou o ponto de mínimo, as outras mantiveram a eficiência constante após determinado diâmetro.

O perfil mencionado já foi observado por pesquisadores como Nóbrega (2002), Mizuno (2000) e Chang e Bai (1999). Que encontraram valores muito mais altos para o ponto de mínimo em termos de diâmetro de partícula. Contudo,

estes trabalhos não avaliaram o comportamento abaixo do diâmetro de 100 nm, o qual apresentou nova queda da eficiência, com a diminuição do diâmetro.

A queda da eficiência também foi observada por Yoo et al. (1997) e Zhuang et al. (2000). Os primeiros observaram ainda que, quando operando o precipitador em regime turbulento, há um aumento da eficiência com a diminuição das partículas, até atingir o diâmetro de aproximadamente 50 nm e que, após os 30 nm, a eficiência cai novamente. Para os últimos, a inflexão ocorria para 75 nm. De acordo com Yoo et al. (1997) este fato ocorre devido à dificuldade de que partículas menores que o limite sugerido sejam carregadas.

Esta inflexão da curva não consta nas curvas de Huang e Chen (2001), entretanto, os pesquisadores avaliaram a eficiência até 30 nm.

O ponto de inflexão da curva deste trabalho está compreendido entre 18 e 27 nm, muito próximo ao valor observado por Yoo et al. o que também justificaria a ausência de queda nas curvas de Huang e Chen.

O diâmetro para o qual ocorreu a queda da eficiência variou entre as curvas obtidas, sendo aparentemente maior para a maior densidade de corrente. Zhuang et al. (2000), trabalhando com a alumina, também observaram que a reversão no comportamento da curva de eficiência pode variar em função da tensão aplicada, caindo de 70 para 50 nm, com a diminuição da tensão de 10 para 9,8kV.

#### **4.2.3.2 Carga da partícula**

A partir de medidas de carga, Alonso et al. (1997) observaram que o carregamento das partículas na faixa nanométrica atinge um equilíbrio para um

tempo de residência igual a 0,3 s. Este tempo é o mesmo tanto para o carregamento quanto para a neutralização das cargas. Neste estudo, o tempo de residência mínimo foi de exatamente 0,3 s, para o menor precipitador operando com a maior velocidade, sendo, para as demais condições, pelo menos o dobro deste valor, de modo que o carregamento atingiu o equilíbrio para todas as condições estudadas.

Para a faixa de partículas analisadas nesta etapa não há uma equação que defina a carga adquirida para cada tamanho, mas sim uma probabilidade de cada partículas ser carregada ou não por diferentes íons. Para concluir este cálculo é necessário determinar o coeficiente de combinação entre a partícula e o íon, ou seja, a probabilidade dos mesmos colidirem. Este termo por sua vez é função de  $b_{\min}$ , distância entre o centro da partícula e a trajetória do íon que garante o encontro entre as espécies. Este valor foi determinado a partir da Equação 2.58, variando o raio dentro da esfera limitante, a partir do raio da partícula. Um exemplo da curva obtida para partículas com 27 nm de diâmetro e com uma carga elementar é dada pela Figura 4.93. Este procedimento foi repetido para todas as condições, sendo  $b_{\min}$  o menor valor de  $b$  encontrado no intervalo mencionado.

Alguns íons que atingem as partículas podem combinar-se com as mesmas, carregando-as, e a eficiência com que esse processo ocorre é medido pelo coeficiente de combinação entre o íon e a partícula ( $\eta$ ). Através da Figura 4.94, pode-se observar que esse valor é baixo para esse tamanho de partículas, diminuindo com o aumento do número de elétrons. A ordem de grandeza dos coeficientes obtidos é próxima da obtida por Adachi et al. (1985).



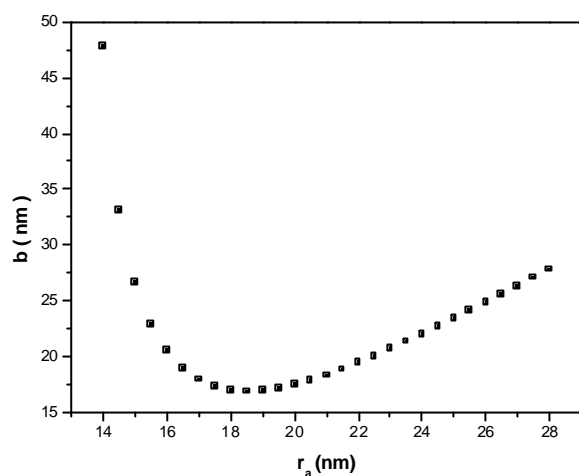


Figura 4.93 – Variação de  $b$  com  $r_a$ .

A tendência de que não ocorra o carregamento é alta, mas isso tende a diminuir com o aumento da partícula. A Figura 4.95 apresenta a probabilidade das partículas adquirirem de uma a dez cargas elementares. Há uma probabilidade máxima para um determinado diâmetro adquirir certa carga. A probabilidade de que uma partícula assuma carga acima de sete elétrons é quase zero mesmo para os maiores diâmetros estudados.

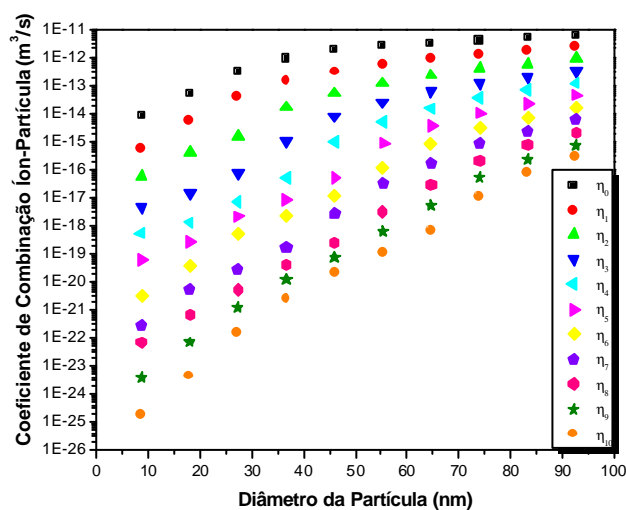


Figura 4.94 - Coeficiente de combinação entre o íon e a partículas para as condições estudadas.

As probabilidades foram um pouco mais altas, se comparadas com as obtidas por Adachi et al.. Os autores trabalharam, entretanto, com valores de campo elétrico 10 vezes menores que os deste estudo. Quando comparados com os valores de Zhuang et al. (2000), as probabilidades foram bem mais próximas.

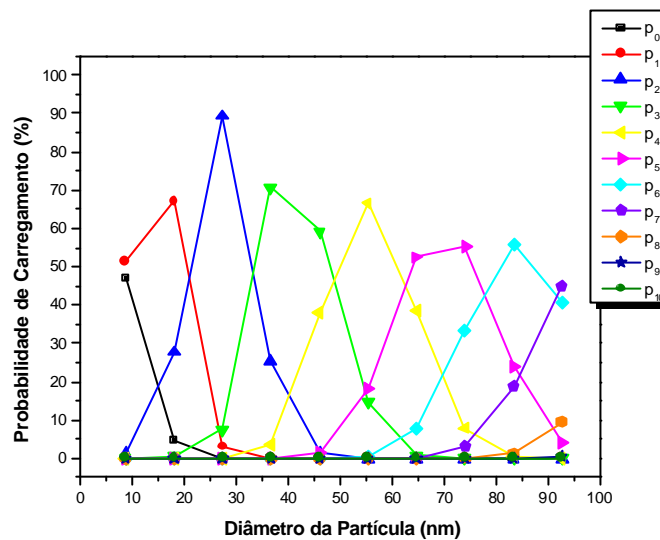


Figura 4.95 – Probabilidade de carregamento para a condição  $L=0,15\text{m}$ ,  $s/2c=1,0$  e  $j=3,8\text{ mA/m}^2$ .

#### 4.2.3.3 Comparação com os modelos presentes na literatura

Os modelos de Deutsch, Zhibin e Guoquan e Nóbrega foram aplicados aos dados experimentais com intuito de verificar a capacidade dos mesmos em prever a eficiência para as condições estudadas e verificar a adequação de cada um aos dados obtidos neste trabalho. Para tanto foi utilizado o campo elétrico calculado pelas Equações 2.26 a 2.42 para cada uma das densidades aplicadas. Estes valores estão explicitados na Tabela 4.6.

Ademais do campo, foram utilizadas as probabilidades calculadas conforme o item anterior no cálculo da eficiência. Foram determinadas várias

eficiências para diferentes valores de carga adquirida para cada diâmetro de partícula, no caso de 0 a 10 cargas elementares, e o valor final foi obtido com o emprego das probabilidades como apresentado na Equação 4.1.

Tabela 4.6 –  $E_{\text{médio}}$  em kV/cm para  $L=0,15$  m,  $2s = 0,04$  m e  $s/2c = 1,0$  e diferentes valores de densidade de corrente.

$E_{\text{médio}}$ (kV/cm)		
$j=1,8$ (mA/m <sup>2</sup> )	$j=2,8$ (mA/m <sup>2</sup> )	$j=3,8$ (mA/m <sup>2</sup> )
2,91	3,42	3,89

$$\eta_{\text{dpf}} = \sum_{p=0}^{10} \eta_{\text{dpi}} \cdot \frac{n_p}{n_T} \quad (4.1)$$

Além dos modelos mencionados, foi empregado também o modelo para escoamento laminar, no qual a eficiência é igual ao número de Deutsch (De). Este foi empregado porque o escoamento apresentou número de Reynolds igual a aproximadamente 1600, menor que 1900, o que caracteriza o regime laminar para gases escoando em dutos retangulares de acordo com Perry (1984). Os resultados estão apresentados na Figura 4.96 a Figura 4.99.

O modelo de Nóbrega, apesar dos altos valores de eficiência, apresentou comportamento condizente com aquele apresentado pelas duas maiores densidades aplicadas, tendendo a ser constantes para os diâmetros analisados. Entretanto, os modelos de Deutsch e Zhibin e Guoquan apresentaram eficiências mais baixas e, portanto mais próximas às obtidas neste trabalho experimental, além de apresentarem um perfil que continha o ponto de máximo. O modelo

laminar apresentou um comportamento contrário aos experimentais, além dos valores também serem maiores. Novamente, o modelo que melhor se ajustou aos pontos experimentais foi o modelo de Deutsch.

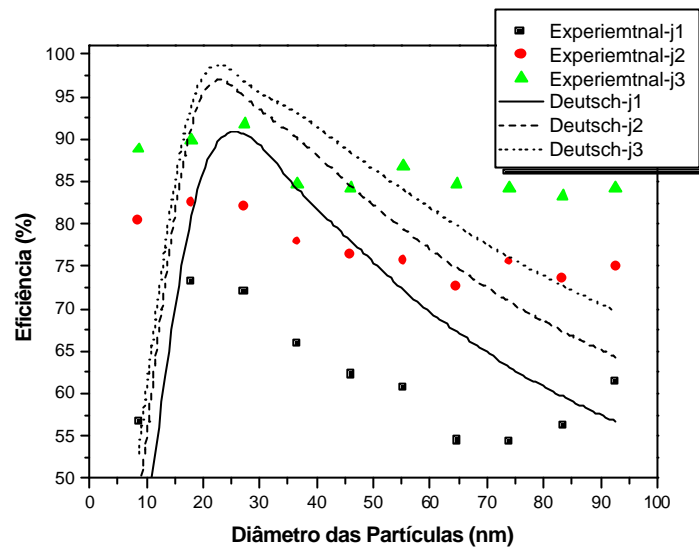


Figura 4.96 - Comparação dos dados experimentais obtidos para as nanopartículas com o modelo de Deutsch.

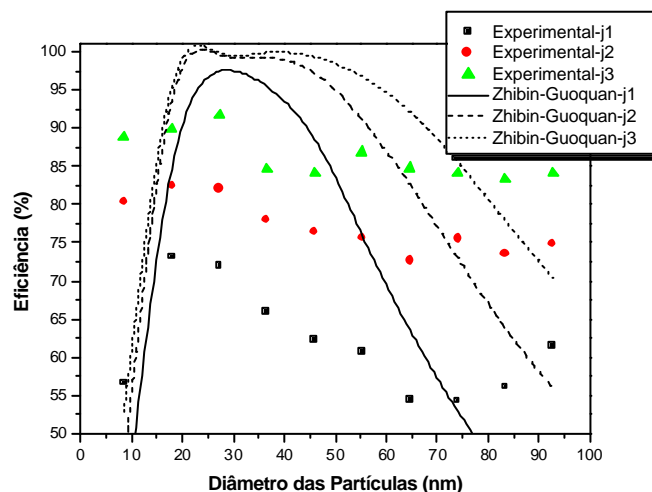


Figura 4.97 - Comparação dos dados experimentais obtidos para as nanopartículas com o modelo de Zhibin e Guoquan.

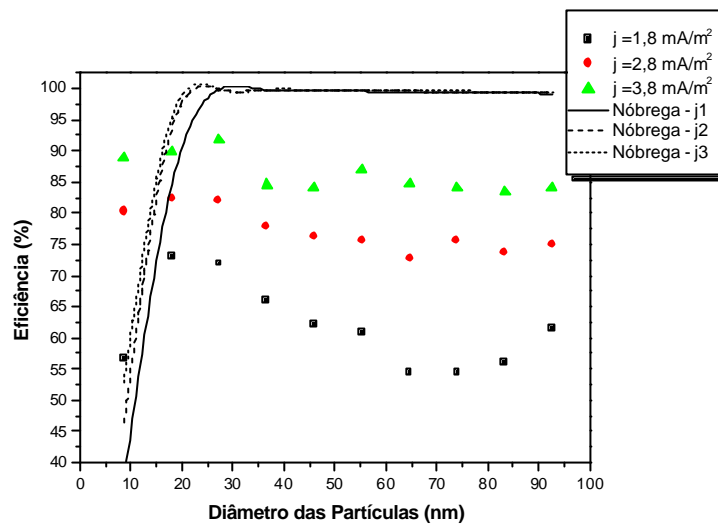


Figura 4.98 - Comparação dos dados experimentais obtidos para as nanopartículas com o modelo de Nóbrega.

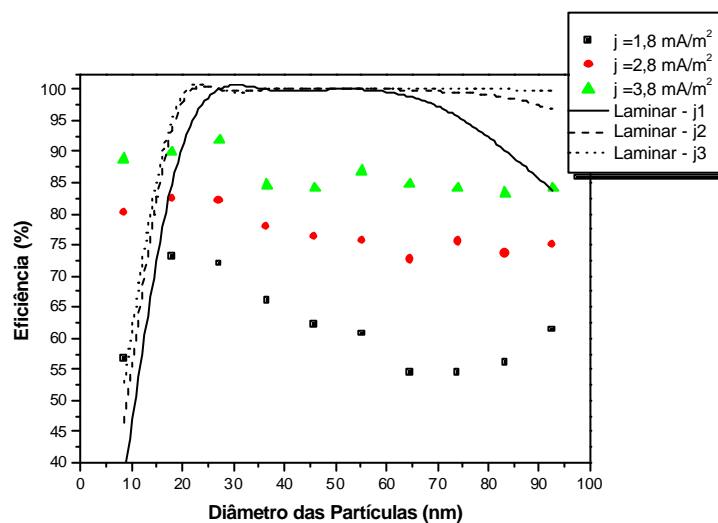


Figura 4.99 - Comparação dos dados experimentais obtidos para as nanopartículas com o modelo laminar.

Segundo Leonard et al. (1983), para partículas submicrométricas a simplificação feita por Deutsch de distribuição uniforme de partículas é válida, de modo que o aperfeiçoamento dos modelos pela adição do efeito da difusividade não implica em melhores ajustes para a faixa de diâmetros avaliada neste estudo.

Zhuang et al. (2000) desenvolveu um modelo para determinação da eficiência fracionária, porém este modelo previu valores bem mais altos do que os obtidos experimentalmente pelos autores, valores estes próximos aos obtidos neste trabalho. Yoo et al. (1997) aplicaram os modelos de Deutsch, Leonard et al., Cooperman e Zhibin e Guoquan aos seus dados experimentais e o que melhor se ajustou aos dados foi o de Leonard et al., que apresentou os maiores valores de eficiência para partículas de 10 a 1000 nm.

Os dados deste trabalho, bem como os de Yoo et al. e Zhuang et al., para o NaCl e a SiO<sub>2</sub>, estão comparados com o modelo de Deutsch na Figura 4.100. O modelo apresenta desvios consideráveis para todos os dados, ajustando-se melhor aos dados de Yoo et al.. Nota-se, de um modo geral, uma tendência de superestimar as eficiências.

Pensou-se que o erro apresentado pelo modelo em prever o comportamento da eficiência fracionária para as partículas abaixo de 100 nm se devesse ao emprego do fator de correção de Cunningham, que não representa bem a relação entre as partículas e o fluido para valores de Kn distantes de 1. Para avaliar a veracidade desta suposição, a equação de Li e Wang (2003a e b) para o cálculo da força de arraste foi utilizada na determinação da velocidade teórica de migração. Para determinar os parâmetros diâmetro característico da molécula e energia característica de interação entre as moléculas, foram utilizados a temperatura e o volume no ponto de fusão do sólido, sendo iguais a 801° C e 26,7 cm<sup>3</sup>/mol para o NaCl, de acordo com Huang et al. (1998).

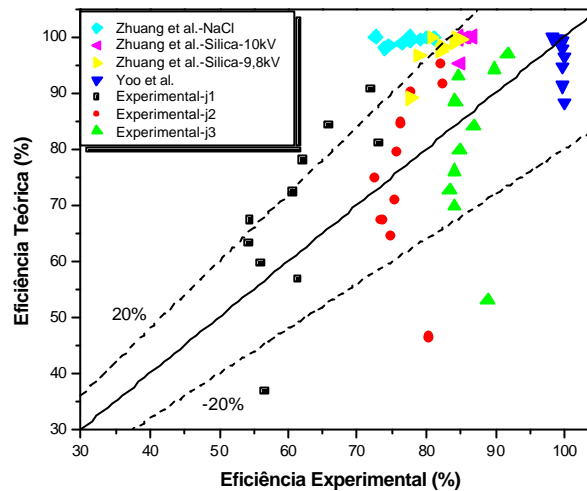


Figura 4.100 - Comparação dos dados da literatura e deste estudo com o modelo de Deutsch.

O resultado obtido com o emprego da nova equação está apresentado na Figura 4.101, a partir da qual se pode observar que não houve uma alteração significativa do modelo, mantendo o mesmo comportamento apresentado anteriormente.

Os dados comparados com o modelo teórico estão compreendidos na faixa de Knudsen correspondente a região de transição, faixa na qual a equação de Li e Wang (2003a, b) não está totalmente definida através de uma base teórica, e sim, a partir de ajuste aos dados experimentais de Millikan, cujos diâmetros variavam até 300 nm. Para estes tamanhos, os valores de Kn são próximos a 1, região na qual é válido o ajuste de Cunningham e representam apenas a menor faixa da região de transição. Assim, com o intuito de tornar os dados previstos pelo modelo mais próximos aos dados experimentais apresentados, uma alteração na equação foi proposta.

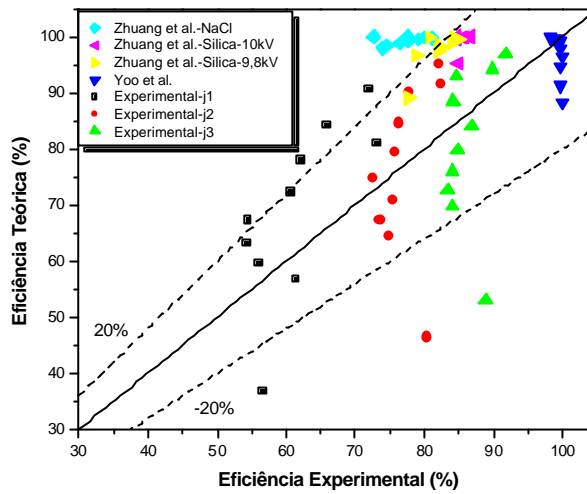


Figura 4.101 - Comparação dos dados experimentais com o modelo de Deutsch, utilizando a equação de Li e Wang.

Optou-se por modificar a parte empírica da Equação 2.22 de Li e Wang, mantendo, contudo, a função proposta. Para tanto, foram determinados os valores de  $w$  que minimizavam o erro entre o modelo e os pontos experimentais deste trabalho e a partir deles determinou-se uma curva para representar a variação de  $w$  com o número de Knudsen.

Além das alterações do  $w$ , também foi inserida uma constante multiplicando  $\alpha'$ , de forma que o comportamento na função não fosse alterado para  $Kn$  tendendo a infinito nem a zero. O valor da constante adotado foi igual a 1,6. Dessa forma, a correlação resultante pode ser observada na Equação 4.2.

$$k_d = \frac{1,5 \cdot a'}{(1 + a'^{(0,49Kn)})^{1/(0,49Kn)}} \cdot k_{d\infty} \quad (4.2)$$



O modelo de Deutsch foi recalculado utilizando a nova correlação e comparado com os dados experimentais. O resultado obtido está apresentado na Figura 4.102.

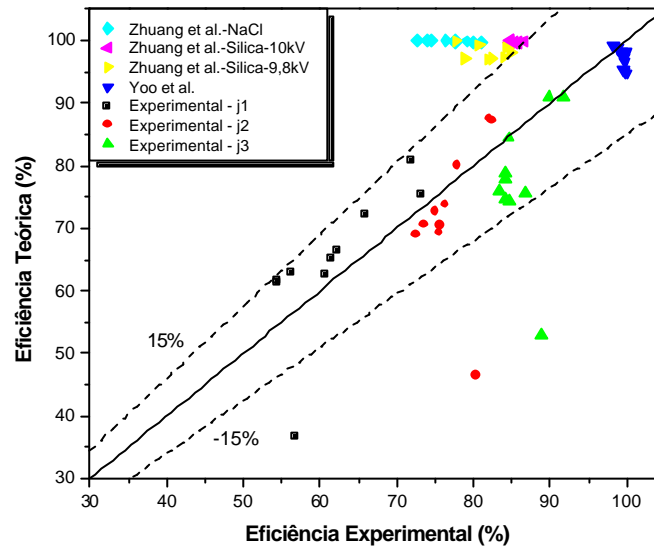


Figura 4.102 - Comparação dos dados experimentais com o modelo de Deutsch, utilizando a equação de Li e Wang modificada.

A equação com as novas modificações apresentou uma sensível melhora na reprodução dos dados experimentais deste trabalho, fazendo com que os mesmos se distribuíssem melhor em torno da curva que representa a igualdade entre o modelo e os dados. Os pontos de Yoo et al. também obtiveram uma melhora considerável, porém os dados de eficiência de Zhuang et al., continuaram, de modo geral, sendo superestimados pelo modelo.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A partir do estudo realizado foi possível obter as conclusões listadas a seguir, divididas em etapas 1 e 2.

Etapa 1:

- O precipitador apresentou elevada eficiência de remoção para a faixa submicrométrica;
- Os efeitos do comprimento do precipitador e da velocidade de escoamento do ar apresentaram os comportamentos esperados, acarretando maior eficiência de remoção com o aumento do comprimento e diminuição da velocidade;
- A relação  $s/2c$  não apresentou uma tendência clara para a faixa analisada;
- O modelo que melhor representou os dados experimentais foi o de Deutsch;
- A suposição de que o campo elétrico no precipitador placa-fio seja igual ao campo pseudo-homogêneo não corresponde ao comportamento real do campo para a configuração em questão;
- Quando levadas em consideração a geometria e a carga espacial, no cálculo do campo, elétrico, os modelos apresentaram um melhor ajuste aos dados experimentais, e, portanto a equação de Kihm et al. (1985) e (1987), com a carga proposta por Riehle (1997) representam melhor o

campo elétrico no interior do equipamento.

Etapa 2:

- O precipitador eletrostático é um equipamento apto para a remoção de nanopartículas, obtendo elevados valores de eficiência de remoção;
- A eficiência fracionária tende a elevar-se com a diminuição do diâmetro, até aproximadamente 20 nm, após o que há uma queda, causada pelo baixo carregamento das partículas;
- A relação  $s/2c$  não apresentou influência na eficiência de remoção das partículas, enquanto um maior espaçamento entre as placas favoreceu a coleta;
- Dos modelos presentes na literatura, aquele que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o modelo clássico de Deutsch, quando utilizado o coeficiente de arraste dado por uma versão modificada da equação de Li e Wang (2003a e b).

Propõe-se como continuidade deste trabalho:

- Estudar diversos materiais para avaliar se apresentam o mesmo desempenho do material estudado;
- Realizar ensaios com um equipamento em maior escala;
- Ampliar a faixa de velocidade estudada, com o intuito de minimizar o equipamento;

- 
- Avaliar maiores espaçamentos entre as placas coletoras;
  - Determinar a eficiência do  $PM_{2,5}$  utilizando equipamentos que meçam o diâmetro e concentração da partícula em meio gasoso;
  - Medir a carga elétrica adquirida pelas partículas durante o processo de carregamento que ocorre no precipitador;
  - Trabalhar com partículas de maiores diâmetros;
  - Utilizar uma equação para o cálculo do campo elétrico que utilize a distribuição de cargas espaciais ao longo do equipamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-SALAM, M., (1992), “Influence of Humidity on Charge Density and Electric Field in Electrostatic Precipitators”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 25, p. 1318-1322.
- ABDEL-SATTAR, S., (1991), “Influence of Geometrical Parameters upon Electrostatic Precipitator Efficiency”, *COMPEL – The International Journal for Computation and mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, v. 10, nº1, p. 27-43.
- ADACHI, M.; KOUSSAKA, Y.; OKUYAMA, K., (1985), “Unipolar and bipolar Diffusion Charging of Ultrafine Aerosol Particle”, *Journal of Aerosol Science*, v.16, nº 2, p. 109-123.
- ALLEY, E.R., (1998), *Air Quality Control Handbook*, McGraw-Hill, New York.
- ALONSO, M.; KOUSSAKA, K.; NOMURA, T.; HASHIMOTO, N.; HASHIMOTO, T., (1997), “Bipolar Charging and Neutralization of Nanometer-Sized Aerosol Particles”, *Journal of Aerosol Science*, v.28, nº 8, p. 1479-1490.
- ALONSO, M.; HASHIMOTO, T.; KOUSSAKA, Y.; HIGUCHI, M.; NOMURA, T.; (1998), “Transient Bipolar Charging of a Coagulating Nano meter Aerosol”, *Journal of Aerosol Science*, v.29, n.º 3, p. 263-270.
- ARNOSTI JR., S.; NÓBREGA, S. W.; FALAGUASTA, M. C. R.; COURY, J. R., (2001), “Performance Evaluation of a Plate-Type Electrostatic Precipitator”, *Filtech Europe, International Conference and Exhibition, Düsseldorf, Germany*, p.160-167.
- ASTM D 257, (1991), *Annual Book of ASTM Standards, Section 10: Electrical Insulation and Electronics, volume 10:01 Electrical Insulation I: D69-D2484*, Director Robert A. Storer, American Society for Testing and materials, Philadelphia, 569 p.
- BANG, J.J.; MURR, L.E., (2002), ‘Collecting and Characterizing Atmospheric Nanoparticles’, *JOM Journal of the Mineral Metals & Materials Society*, v. 54, nº 12, p. 28-30.
- BAPAT, J. D. (2001), “Application of ESP for Gas Cleaning in Cement Industry – with Reference to India”, *Journal of Hazardous Materials B81*, p. 285-308.
- BASSET, J. D.; AKUTSU, K.; MASUDA, S., (1977), “A Preliminary Study of Re-Entrainment in an Electrostatic Precipitator”, *Journal of Electrostatics*, v. 3, p.311-325.

- BERMINGHAM, S.; BRUINSMA, D.; KRAMER, H.; ROSMALEN, G.V.; WITKAMP, G.; DERENZO, S.; GIULIETTI, M.; SECKLER, M. M.; RÉ, M. I.; CEKINSKI, E., (2002), “Industrial Crystallization and Precipitation”, Apostila de Curso do IPT – TU DELFT.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N., (1960), Transport Phenomena, John Wiley & Sons, New York.
- BLANCHARD, D.; DUMITRAN, L.M.; ATTEN, P., (2001), “Effect of Electro-Aero-Dynamically Induced Secondary Flow on Transport of Fine Particles in an Electrostatic Precipitator”, Journal of Electrostatic, v. 51-52, p. 212-217.
- BRUNO, R. L., (2005), Material Particulado Atmosférico na Cidade de São Carlos – SP. Quantificação e Identificação de Fontes, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 178 p.
- CAROTTA, M. C.; MARTINELLI, G.; CREMA, L.; MALAGÚ, C.; MERLI, M.; GHIOTTI, G.; TRAVERSA, E., (2001), “Nanostructured Thick-Film Gas Sensors for Atmospheric Pollutant Monitoring: Quantitative Analysis on Field Tests”, Sensors and Actuators B, n.º 76, p. 336-342.
- CARSON, R., (1962), Primavera Silenciosa, 2ª ed., Edições Melhoramentos, São Paulo, 305 p.
- CASTANHO, A. D. A.; ARTAXO, P., (2001), “Wintertime and Summertime São Paulo Aerosol Source Apportionment Study”, Atmospheric Environment, v. 35, p.4889-4902.
- CASTLE, G. S. P., (2001), “Industrial Applications of Electrostatics: the Past, Present and Future”, Journal of Electrostatics, v.51, p. 1-7.
- CELLI, C. E., (1999), Monitoramento do Material particulado Respirável Suspenso na atmosfera do Centro da Cidade de São Carlos – SP, Dissertação de Mestrado, Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 123 p.
- CERDA, E.E.V., (2004), Estudo do Perfil de Concentração em um Precipitador Placa-Fio, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 84 p.
- CHANG, C-L.; BAI, H. (2000), “Effects of Some Geometric Parameters on the Electrostatic Precipitator Efficiency at Different Operation Indexes”, Aerosol Science and Technology, v. 33, p. 228-238.
- CHANG, J. –S., (2003), “Next Generation Integrated Electrostatic Gas Cleaning Systems”, Journal of Electrostatics, v. 57, p. 273-291.

- CHEN, D.; PUI, D. Y. H.; KAUFMAN, S. L., (1995), "Electrospraying of Conducting Liquids for Monodisperse Aerosol Generation in the 4 nm to 1,8  $\mu\text{m}$  Diameter Range", *Journal Aerosol Science*, v. 26, n.º 6, p. 963-977.
- CLIFT, R.; GRACE, J. R.; WEBER, M.E., (1978), "Bubbles, Drops, and Particles", Academic Press, New York, 380 p.
- COURY, J. R., (1983), *Electrostatic Effects in granular Bed Filtration of Gases*, Thesis of Doctor of Philosophy, University of Cambridge, 234 p.
- COURY, J. R.; PISANI JR., R.; HUNG, Y-T, (2004), Cyclones, in: WANG, L. K.; PEREIRA, N.C., HUANG, Y-T., *Air Pollution Control Engineering, Handbook of Environmental Engineering*, v. 1, Human Press, New Jersey.
- D'AMATO, G. (2000), "Urban Air Pollution and Plant-Derived Respiratory Allergy", *Clinical and Experimental Allergy*, v. 30, p. 628-636.
- DAVIES, R. (2001), "Particle Science and Technology – a View at the Millennium", *Powder Technology*, v. 119, p.45-57.
- DEPPERT, K.; SCHMIDT, F.; KRINKE, T.; DIXHENS, J.; FISSAN, H., (1996), "Electrostatic Precipitator for Homogeneous Deposition of Ultrafine Particles to Create Quantum-Dot Structure", *Journal Aerosol Science*, v. 27, s. 1, p. s151-s152.
- DONALDSON, K.; LI, X. Y.; MacNEE, W., (1998), "Ultrafine (Nanometer) Particle Mediated Lung Injury", *Journal Aerosol Science*, v. 29, nº 5/6, p. 553-560.
- DOYLE, A.; MOFFETT, D. R.; VONNEGUT, B., (1964), "Behavior of Evaporating Electrically Charged Droplets", *Journal of Colloid Science*, v. 19, p. 136-143.
- DUMITRAN, L. M.; BLANCHARD, D.; ATTEN, P.; NOTINGHER, P., (2000), "Estimate of Effective Migration Velocity of Fine Particles from Fractional Efficiency Measurements in an Electrostatic Precipitator", *IEEE*, p. 559-562.
- FALAGUASTA, M. C. R., (2001), *Estudo do Aumento de Escala de um Precipitador Eletrostático do Tipo Placa-Fio*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, 170 p.
- FERIN, J.; OBERDÖRSTER, G.; PENNEY, D. P.; SODERHOLM, S. C.; GELEIN, R.; PIPIER, H. C., (1990), "Increased Pulmonary Toxicity of Ultrafine Particles? I. Particle Clearance Translocation, Morphology", *Journal of Aerosol Science*, v.21, nº3, p. 381-384.

- FLAGAN, R. C.; SEINFELD, J. H., (1988), *Fundamentals of Air Pollution Engineering*, Prentice Hall, Englewoods Cliffs, New Jersey.
- FLINT, Y. (1966), *Essential of Crystallography*, translated by Snigirevskaya, Peace Publishers, Moscow, p. 255.
- FRIEDLANDER, S. K., (2000), *Smoke, Dust, and Haze Fundamentals of Aerosol Dynamics*, 2<sup>o</sup> ed., Oxford University Press, 407 p.
- FUCHS, N. A., (1964), *The Mechanics of Aerosol*, Dover Publications Inc., Toronto, 408 p.
- GOLKOWSKI, C.; CHOJNOWSKI, M., (1983) “The Role of Electrostatic Spacing in the Performance of the Electrostatic Precipitator”, *Journal of Electrostatic*, v. 14, p 339-348.
- GOO, J.H.; LEE, J. W., (1997), “Stochastic Simulation of Particle Charging and Collection Characteristics for a Wire-Plate Electrostatic Precipitator of Short Length”, *Journal of Aerosol Science*, v. 28, n<sup>o</sup> 5, p. 875-893.
- GOOCH, P.J.; FRANCIS, N.L., (1975), “A Theoretically Based Mathematical Model for Calculation of Electrostatic Precipitator Performance”, *Journal of the Air Pollution Control Association*, p. 108-113.
- HARRISON, R. M.; YIN, J., (2000), “Particulate Matter in the Atmosphere: Which Particle Properties are Important for its Effects on Health?”, *The Science of the Total Environmental*, v. 249, p. 85-101.
- HERNANDEZ-SIERRA, A.; ALGUACIL, F. J.; ALONSO, M., (2003), “Unipolar Charging of Nanometer Aerosol Particles in a Corona Ionizer”, *Journal of Aerosol Science*, v. 34. p. 733-745.
- HIDY, G. M.; BROCK, J. R., (1970), *The Dynamics of Aerocolloidal Systems*, Pergamon Press, 1<sup>st</sup> edition, Great Britain, 379 p.
- HINDS, W. C., (1999), *Aerosol Technology Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles*, 2<sup>a</sup> ed., John Wiley & Sons, New York, 483 p.
- HINDS, W. C., (1982), *Aerosol Technology Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles*, John Wiley & Sons, New York, 422 p.
- HOFERER, B.; WEINLEIN, A.; SCHWAB, A. J., (1999), “Separation of Fine Dust with AC-Energization Electrostatic Precipitators”, *High Voltage Engineering Symposium, Conference Publication n<sup>o</sup> 467, IEEE Transactions on Industry Applications*, 5.402.S28 – 5.405.S28



- HOWARD, A. G.; STATHAM, P. J., (1993), *Inorganic Trace Analysis: Philosophy and Practice*, John Wiley and Sons, England, 182 p.
- HUANG, J.; ZHU, X.; BARTELL, S., (1998), "Molecular Dynamics Studies of the Kinetics of Freezing of (NaCl)<sub>108</sub> Clusters", *Journal of Physics Chemical A*, v. 102, p. 2708-2715.
- HUANG, S-H.; CHEN, C-C., (2001), "Filtration Characteristics of a Miniature Electrostatic Precipitator", *Aerosol Science and Technology*, v. 35, p. 792-804.
- HUGHES, L. S.; CASS, G. R.; GONE, J.; AMES, M.; OLMEZ, I., (1998), "Physical and Chemical Characterization of Atmospheric Ultrafine Particles in the Los Angeles Area", *Environmental Science & Technology*, v. 32, n° 9, p. 1153-1161.
- HUSSIN, A.; SCHEIBEL, H. G.; BECKER, K. H.; PORTSTENDÖRFER, J., (1983), "Bipolar Diffusion Charging of Aerosol Particles – I: Experimental Results within the Diameter Range 4-30 nm", *Journal of Aerosol Science*, v. 14, n° 5, p. 671-677.
- INCULET, I. I.; CASTLE, P.; SLANINA, M.; DUCA, M., (2002), "Pseudoelectret Filter for Micrometer-Sized Particles in Exhaust Gases at 210 °C", *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 38, n° 1, 64-68.
- JAWOREK, A.; KRUPA, A.; ADAMIAK, K., (1996), "Particle Trajectories and Collection Efficiency of Submicron Particles on a Charged Spherical Collector", *IEEE Transactions on Industry Applications*, p.2036-2043.
- JEDRUSIK, M.; SWIERCZOK, A.; MODZEL, P., (1998), "Migration Velocity and Visualization of the Trajectory of Fly Ash Particles Inside an Electrostatic Precipitator", *Journal of Electrostatic*, v. 44, p. 77-84.
- JOHN, A.C.; KUHLBUSCH, T.A.J.; FISSAN, H.; SCHMIDT, K.-G., (2001), "Size-Fractional Sampling and Chemical Analysis by Total-Reflection X-Ray Fluorescence Spectrometry of PM<sub>x</sub> in Ambient Air and Emissions", *Spectrochimica Acta Part B*, v. 56, p. 2137-2146.
- KANAZAWA, S.; OHKUBO, T.; NOMOTO, Y.; ADACHI, T., (1993), "Submicron Particle Agglomeration and Precipitation by Using a Bipolar Charging Method", *Journal of Electrostatic*, v. 29, p. 193-209.
- KARTHIKEYAN, J.; BERNDT, C. C.; TIKKANEN, J.; WANG, J. Y.; KING, A. H.; HERMAN, H., (1997a), "Nanomaterial Powders and Deposits Prepared by Flame Spray Processing of Liquid Precursors", v. 8, n. 1, p. 61-74.
- KARTHIKEYAN, J.; BERNDT, C. C.; TIKKANEN, J.; REDDY, S.; HERMAN, H., (1997b), "Plasma Spray Synthesis of Nanometrical Powders and

- Deposits”, *Material Science of Nanomaterial Powders and Deposits A*, v. A238, p. 275-286.
- KIHM, K. D.; MITCHNER, M.; SELF, S.A.; (1985), “Comparison of Wire-Plate and Plate-Plate Electrostatic Precipitator in Laminar Flow”, *Journal of Electrostatics*, v. 17, p. 193-208.
- KIHM, K. D.; MITCHNER, M.; SELF, S.A.; (1987), “Comparison of Wire-Plate and Plate-Plate Electrostatic Precipitator in Turbulent Flow”, *Journal of Electrostatics*, v. 19, p. 21-32.
- KIM, S. H.; LEE, K. W.; (1999), “Experimental Study of Electrostatic Precipitator Performance and Comparison with Existing Theoretical Models”, *Journal of Electrostatics*, v. 48, p. 3-25.
- KITTELSON, D. B., (1998), “Engines and Nanoparticles: a Review”, *Journal of Aerosol Science*, v. 29, n°5/6, p. 575-588.
- KO, J-H; IHM, S-K., (1997), “A Two-Dimensional Model for Polydisperse Particles on the Effective Migration Rate of the Electrostatic Precipitator with Wider Plate-Spacing”, *Aerosol Science and Technology*, v. 26, n° 5, p. 399-402.
- KRUIS, F. E.; FISSAN, H., PELED, A., (1998), “Synthesis of Nanoparticles in the Gas Phase for Electronic, Optical and Magnetic Applications – a Review”, *Journal of Aerosol Science*, v. 29, n°5/6, p. 511 - 535.
- KULKARNI, P.; NAMIKI, N.; OTANI, Y.; BISWAS, P., (2002), “Charging of Particles in Unipolar Coronas Irradiated by In-Situ Soft X-Rays: Enhancement of Capture Efficiency of Ultrafine particles”, *Journal of Aerosol Science*, v. 33, p. 1279-1296.
- LACKOWSKI, M., (2001), “Unipolar Charging of Aerosol particles in Alternating Electric Field”, *Journal of Electrostatics*, v. 51, p. 225-231.
- LAITINEN, A.;HAUTANEN, J.; KESKINEN, J.; KAUPPINEN, E.; JOKIEMI, J.; LEHTINEN, K., (1996), “Bipolar Charged Aerosol Agglomeration with Alternating Electric Field in Laminar Gas Flow”, *Journal of Electrostatic*, v. 38, p. 303 – 315.
- LAU, A. K.; VIZCARRA, A. T.; LO, K. V.; LUYMES, J., (1996), “Recirculation of Filtered Air in Pig Barns”, *Canadian Agricultural Engineering*, v. 38, n° 4, p. 297 - 304.
- LEONARD, G.; MITCHNER, M.; SELF, S. A.; (1980), “Particle Transport in Electrostatic Precipitators”, *Atmospheric Environmental*, v. 14, p. 1289-1299.

- LI, Z.; WANG, H. (2003a), “Drag Force, Diffusion Coefficient, and Electric Mobility of Small Particles. I. Theory Applicable to the Free-molecule Regime”, *Physical Review E*, The American Physical Society, v. 68, p.061206-1 – 11.
- LI, Z.; WANG, H. (2003b), “Drag Force, Diffusion Coefficient, and Electric Mobility of Small Particles. II. Application”, *Physical Review E*, v. 68, p.061207-1 – 13.
- LIANG, X.; LOOY, P. C.; JAYARAM, S.; BEREZIN, A. A.; MOZES, M. S.; CHANG, J., (2002), “Mercury and Other Trace Elements Removal Characteristics of DC and Pulse-Energized Electrostatic Precipitator”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 38, n° 1, p. 69-76.
- LIDE, D. R., (1997), “CRC Handbook of Chemistry and Physics”, CRC Press, 18 ed., New York.
- LIND, L., (1997), Aerodynamic Factors Affecting Performance, in: PARKER, K. R. *Applied Electrostatic Precipitation*, London, Chapman & Hall, p. 113-150.
- LIU, L.; GUO, J.; LI, J.; SHENG, L., (2000), “The effect of wire heating and configuration on ozone emission in a negative ion generator”, *Journal of Electrostatics*, v. 48, p. 81-91.
- MACAIRE, R.; MARTIN, D., (1997), “New Technologies for the Electrostatic Precipitator Pulsed Energization in Energetics”, *Energy Conversion and Management*, v. 38, n° 5, p. 511-516.
- MAINELIS, G.; ADHIKARI, A.; WILLEKE, K.; LEE, S.; REOPONEN, T.; GRINSHPUN., S., (2002), “*Journal of Aerosol Science*, v. 33, p. 1417-1432.
- MARPLE, V. A.; LIU, B. Y. H.; RUBOW, K. L., (1978), “A Dust Generator for Laboratory Use”, *American Industrial Hygiene Association Journal*, v. 39, p. 26-32.
- MARQUARD, A.; MEYER, J.; KASPER, G., (2003), “Effect of Aerosol Concentration on the Electrostatic Precipitation of Nanoparticles”, *Filtech Europe*, p. II 100-107.
- MASUDA, S.; HOSOKAWA, S. (1995), *Electrostatic Precipitation*, in: CHANG, J.; KELLY, A. J.; CROWLEY, J. M., *Handbook of Electrostatic Processes*, Marcel Dekker Inc., New York, 763 p.
- MEDLIN, A.J.; FLETCHER, C. A. J.; MORROW, R., (1998), “Electrodynamic Modelling of Fine Particles Collection in Electrostatic Precipitator”, 7<sup>th</sup> ICESP, POHANG.

- MILLER, J.; HOFERER, B.; SCHWAB, A. J. (1998), "The Impact of Corona Electrode Configuration on Electrostatic Precipitator Performance", *Journal of Electrostatics*, Elsevier, v. 44, p. 67-75.
- MIZUNO, A., (2000), "Electrostatic Precipitation", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 7, nº 5, p. 615-624.
- NAVARRETE, B.; CAÑADAS, L.; CORTÉS, V.; SALVADOR, L.; GALINDO, J., (1997), "Influence of Plate Spacing and Ash Resistivity on the Efficiency of Electrostatic Precipitator", *Journal of Electrostatics*, v. 39, p. 65-81.
- NEAS, L. M., (2000), "Fine Particulate Matter and Cardiovascular Disease", *Fuel Processing Technology*, v. 65, p. 55- 67.
- NEMMAR, A.; HOYLAERTS, M.F.; HOET, P.H.M.; VERMYLEN, J.; NEMERY, B., (2003), "Size Effect of Intratracheally Instilled Particles on Pulmonary Inflammation and Vascular Thrombosis", *Toxicology and Applied Pharmacology*, v. 186, p. 38-45.
- NÓBREGA, S. W., (2002), *Estudo do Desempenho de um Precipitador Eletrostático do Tipo Placa-Fio na Remoção de um Material Particulado Polidisperso*, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 166 p.
- OBERDÖRSTER, G.; FERIN, J.; FINKELSTEIN, G.; WADE, P.; CORSON, N. (1990), "Increased Pulmonary Toxicity of Ultrafine Particles? II. Lung Lavage Studies", *Journal of Aerosol Science*, v.21, nº3, p. 384-387.
- OFFEN, G. R.; ALTMAN, R., (1991), "Issues and Trends in Electrostatic Precipitation Technology for U.S. Utilities", *Journal of Air and Waste Management Association*, v. 41, nº 2, p. 222-227.
- OGLESBY, S. Jr.; NICHOLS, G. B., (1978), *Electrostatic Precipitation*, New York, Marcel Dekker INC., 367 p.
- OKUBO, M.; YAMAMOTO, T.; KUROKI, T.; FUKUMOTO, H., (2001), "Electric Air Cleaner Composed of Nonthermal Plasma Reactor and Electrostatic Precipitator", *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 38, nº 5, p. 1505-1511.
- PARKER, K. R., (1997), *Why an Electrostatic Precipitator?*, in PARKER, K. R.: *Applied Electrostatic Precipitation*, London, Chapman & Hall, p. 1-9.
- PARKER, K. R.,(2000), "Effective Capture of Respirable-Sized Particulates Using Electrostatic Precipitator Technology", *Engineering Science and Education Journal*, v. 9, nº 1, p. 33 - 40.

- PATEL, S. N.; RAHMLOW, Jr. T. D.; KJENDAL, R. A.; MEEHAN, J. J.; (1985), "The Effect of Back Corona in a Laboratory Scale Electrostatic Precipitator", IEEE Transactions on Industry Applications, v. IA-21, p. 935-938.
- PERRY, R. H.; GREEN, D., (1984), Perry's Chemical Engineering Handbook, 5<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, Malaysia.
- PESQUISA FAPESP, Ciência e Tecnologia no Brasil, Agosto de 2003, nº 90, Revolução em pequena Escala, Marili Ribeiro, p. 60-65.
- PETERSEN, H.H., (1981), "New Trends in Electrostatic Precipitation: Wide Duct Spacing, Precharging, Pulse Energization", IEEE Transactions on Industry Applications, v. IA-17, nº 5, p. 496-501.
- PEUKERT, W.; WADENPOHL, C., (2001), "Industrial Separation of Fine Particles with Difficult Dust Properties", Powder Technology, v. 118, p. 136 – 148.
- PISANI JR., R., (1997), Desenvolvimento de uma Unidade Experimental para o Tratamento do Poluente Gasoso Dióxido de Enxofre com Calcário Dolomítico, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos – Ufscar, 92 p.
- POWERSPAN CORPORATION, Clean Energy Technology, disponível em: <<http://www.powerspancorp.com>>.
- POZZA, S. A., (2005), Identificação das Fontes de Poluição na Cidade de São Carlos – SP, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (Ufscar), 104p.
- PREINING, O., (1998), "The Physical Nature of Very, Very Small Particles and its Impact on their Behavior", Journal Aerosol Science, v. 29, nº 5/6, p. 481-495.
- PROST, W.; KRUIS, F.E.; OTTEN, F.; NIELSCH, K., RELLINGHAUS, B.; AUER, U.; PELED, A.; WASSERMANN, E.F.; FISSAN, H., (1998), "Monodisperse Aerosol Particle Deposition: Prospects for Nanoelectronics", Microelectronic Engineering, v. 41/42, p. 535-538.
- PUI, D. Y. H.; CHEN, D. R., (1997), "Nanometer Particles: a New Frontier for Multidisciplinary Research", Journal of Aerosol Science, v. 28, nº 4, p. 539-544.
- RAYLEIGH, LORD, (1945), Theory of Sound, vol. II, First American Edition, Dover Publication, 504 p.

- REISCHL, G.P.; MÄKELÄ, J.M.; KARCH, R.; NECID, J., (1996), “Bipolar Charging of Ultrafine Particles in the Size Range Below 10 nm”, *Journal Aerosol Science*, v. 27, n° 6, p. 931-949.
- REIST, P. C., (1993), *Aerosol Science and Technology*, 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill, United States of America, 379 p.
- RENWICK, L.; DONALDSON, K.; CLOUTER, A., (2001), “Impairment of Alveolar Macrophage Phagocytosis by Ultrafine Particles”, *Toxicology and Applied Pharmacology*, v.172, p. 119-127.
- REYES, V., (1997), *Electrical Operation of Precipitators*, in: PARKER, K. R. *Applied Electrostatic Precipitation*, London, Chapman & Hall, p. 192-248.
- RESOLUÇÃO CONAMA n° 3, de 28 de junho de 1990, “Dispõe sobre Padrões de Qualidade do Ar, Previsto no PRONAR”, Publicação D.O.U., de 22 de agosto de 1990, disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>.
- RIEHLE, C.; LÖFFLER, F., (1992), “Electrical Similarity Concerning Particle Transport in Electrostatic Precipitators”, *Journal of Electrostatics*, v.29, p. 147-165.
- RIEHLE, C.; LÖFFLER, F., (1992b), “The Effective Migration Rate in Electrostatic Precipitators”, *Aerosol Science and Technology*, v. 16, p. 1-14.
- RIEHLE, C., (1997), *Basic and Theoretical Operation of ESPs*, in: PARKER, K. R., *Applied Electrostatic Precipitation*, London, Chapman & Hall, p. 25-87.
- RIUL Jr., A.; GALLARDO SOTO, A. M.; MELLO, S. V.; BONE, S.; TAYLOR, D. M.; MATTOSO, L.H.C., (2003), “An Electronic Tongue using Polyrrole and Polyaniline”, *Synthetic Metals*, n° 132, p. 109-116.
- RUGG, D. E.; DURHAM, M. D.; RINARD, G. A.; SPARKS, L. E.; (1982), “An Experimental Study of Electrostatic Precipitator Performance with Pulse Excitation”, *Atmospheric Environmental*, v. 16, n° 5, p. 1251-1256.
- RUUSKANEN, J.; TUCH, T.; BRINK, H. T.; PETERS, A.; KHLYSTOV, A.; MIRME, A.; KOS, G. P. A.; BRUNEKREEF, B.; WICHMANN, H. E.; BUZORIUS, G.; VALLIUS, M.; KREYLING, W. G.; PEKKANEN, J., (2001), “Concentration of Ultrafine, Fine and PM<sub>2.5</sub> Particles in Three European Cities”, *Atmospheric Environment*, v. 35, p. 3729-3738.
- SAUGHNESSY, E. J.; DAVIDSON, J. H.; HAY, J. C., (1985), “The Fluid Mechanics of Electrostatic Precipitators”, *Aerosol Science and Technology*, v. 4, p. 471-476.

- SEINFELD, J. H., (1986), Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution, John Wiley & Sons, New York.
- SHI, J. P.; EVANS, D. E.; KHAN, A. A; HARRISON, R. M., (2001), “Sources and Concentration of Nanoparticles (< 10 nm diameter) in Urban Atmosphere”, Atmospheric Environmental, v. 35, p. 1193-1202.
- SLOSS, L. L.; SMITH, I. M., (2000), “PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>: an International Perspective”, Fuel Processing Technology, v. 65, p. 127-141.
- SOLDATI, A.; ANDREUSSI, P.; BANERJEE, S., (1993), “Direct Simulation of Turbulent Particle Transporting Electrostatic Precipitators”, AIChE Journal, v. 39, n° 12, p. 1910-1919.
- SPARKS, L. E.; RAMSEY, G. H.; DANIEL, B. E.; (1979), “Collection of Fly Ash with High precipitator Preceded by the EPA/SoRI Precharger”, Journal of the Air Pollution Control Association, v. 29, n° 7, p. 745-747.
- ST. GEORGES, S. D.; FEDDES, J. J. R., (1995b) “Electrical Properties of Organic and Respirable Swine Dust”, Canadian Agricultural Engineering, v. 37, n° 2, p. 97-102.
- THANH, L. C. (1979a), “Back Corona Part I: Its Formation”, Journal of Electrostatics, v. 6, p 139-160.
- THANH, L. C. (1979b), “Back Corona Part II: Its effects on Sparkover Voltage”, Journal of Electrostatics, v. 6, p 161-179.
- TSI, “Manual de Operação do Electrospray Aerosol Generator, Modelo 3480”, disponível em: <<http://www.tsi.com>>.
- TURNER, R. K, (1995), Sustainable Environmental Economics and Management, John Wiley & Sons, England, 395 p.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), (1996), United States of America; Center on Air Pollution (CICA.), Air Pollution Technology Fact Sheet, disponível em: <<http://www.epa.com>>.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), (2000), “Quality Assurance Project Plan for EPA Particle Matter “Supersite”: PM<sub>2.5</sub> Technology Assessment and Characterization Study in New York”, disponível em: <<http://www.epa.com>>.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), “What is PM<sub>2.5</sub>?”, disponível em: <<http://www.epa.com>>.

- VALLE, C. E., (1995), Como se Preparar para as Normas ISO 14000 Qualidade Ambiental, 2<sup>a</sup> edição, Pioneira, São Paulo, 137 p.
- VINCENT, J. H. (1980), “Electrostatic Precipitator Performance from the Point of View of Gas Treatment Time”, Journal of the Air Pollution Control Association, v. 30, n. 4, p. 395-396.
- WALTERS, S.; AYRES, J. (1996), The Health Effects of Air Pollution. In: HARRISON, R.M., ed., Pollution: Causes, Effects and Control, The Royal Society of Chemistry, 3<sup>a</sup> ed., Cambridge, UK.
- WATANABE, T.; TOCHIKUBO, F.; KOIZUMI, Y.; TSUCHIDA, T.; HAUTANEN, J.; KAUPPINEN, E. I., (1995), “Submicron Particle Agglomeration by an Electrostatic Agglomerator”, Journal of Electrostatics, v. 34, p. 367-383.
- WHITE, H. J., (1963), Electrostatic Precipitation, United States of America, Addison-Wesley Publishing Company, INC., 375 p.
- WILLIAMS, D. B.; CARTER, C. B., (1996), “Transmission Electron Microscopy”, Plenum Press, New York, 729 p.
- WILSON, M. R.; LIGHTBODY, J. H.; DONALDSON, K.; SALES, J.; STONE, V., (2002), “Interactions between Ultrafine Particles and Transition Metals in Vivo and in Vitro”, Toxicology and Applied Pharmacology, v. 184, p. 172-179.
- YOO, K. H.; LEE, J. S.; OH, M. D., (1997), “Charging and Collection of Submicron Particles in Two-Stage Parallel-Plate Electrostatic Precipitator”, Aerosol Science and Technology, v. 27, p. 308-323.
- ZHAO, M. Z.; PFEFFER, R. (1996), “A Semi-Empirical Approach to Predict the Total Collection Efficiency of Electrostatic Precipitators”, Chemical Engineering Communications, v. 148-150, p.315-331.
- ZHIBIN, Z.; GUOQUAN, Z.; (1992), New Model of Electrostatic Precipitation Efficiency Accounting for Turbulent Mixing”, Journal of Aerosol Science, v. 23, n° 2, p. 115-121.
- ZHIBIN, Z.; GUOQUAN, Z.; (1994), “Investigation of the Collection Efficiency of na Electrostatic Precipitator with Turbulent Effects”, Aerosol Science and Technology, v. 20, p. 169-176.
- ZHIQIANG, Q.; SIEGMANN, K.; KELLER, A.; MATTER, U.; SCHERRER, L.; SIEGMANN, H. C., (2000), “Nanoparticle Air pollution in Major Cities and its Origin”, Atmospheric Environment, v. 34, p. 443-451.



- ZHUANG, Y.; KIM, Y. J.; LEE, T. G.; BISWAS, P., (2000), “Experimental and Theoretical Studies of Ultra-Fine Particle Behavior in Electrostatic Precipitators”, *Journal of Electrostatics*, v. 48, p. 245-260.
- ZUKERAN, A.; CHANG, J-S.; BEREZIN, A. A.; ITO, T., (1997), “Control of Ultrafine Particles from Incense Smoke by Air Cleaning Electrostatic Precipitator”, *Journal of Aerosol Science*, v. 28, s. 1, p. S289-S290.
- ZUKERAN, A.; LOOY, P. C.; CHAKRABARTI, A.; BEREZIN, A. A.; JAYARAM, S.; CROSS, J. D.; ITO, T.; CHANG, S-J., (1999), “Collection Efficiency of Ultrafine Particles under DC and Pulse Operating Modes”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 35, nº 5, p. 1184-1191.

## APÊNDICE A

### A Diferentes Configurações Testadas para a Unidade Experimental da Etapa 1

A primeira configuração utilizada para determinação da eficiência do precipitador eletrostático na remoção de  $PM_{2,5}$  consistiu em um alimentador do tipo leito fluidizado para a dispersão da alumina na corrente gasosa e em um filtro colocado em linha cuja finalidade foi capturar as partículas não coletadas pelo precipitador. Este filtro foi inserido no sistema através de um módulo em acrílico, localizado após o precipitador e continha uma tela para suporte do meio filtrante, como pode ser visualizado na Figura A.1.

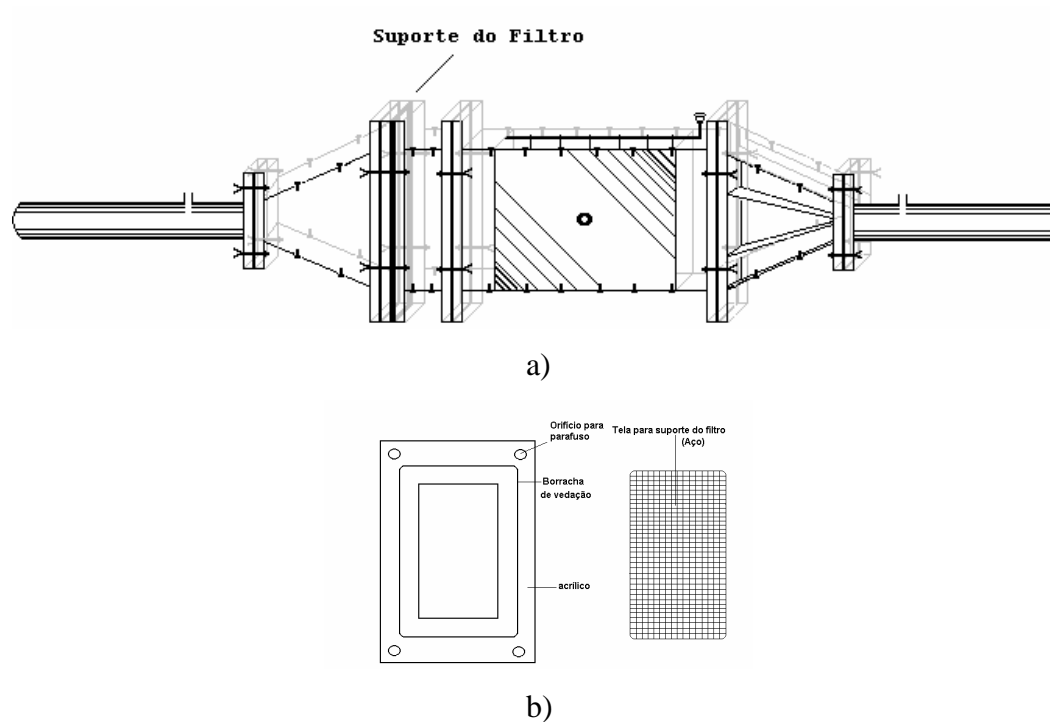


Figura A.1– Esquema da unidade experimental: a) suporte do filtro em linha e b) detalhe do suporte.

Esta tentativa não apresentou sucesso, pois a perda de carga, causada pelo meio filtrante, foi elevada e aumentava com a retenção do material particulado. Devido a este aumento da perda de carga e a uma limitação do soprador, não foi possível manter constante a velocidade de escoamento do ar. Assim, optou-se pela eliminação do meio filtrante e a pela realização de uma amostragem isocinética das concentrações de entrada e saída do precipitador, de forma que fosse possível determinar a eficiência do equipamento.

O alimentador de partículas utilizado inicialmente foi o de leito fluidizado, modelo 3400 da TSI. Este equipamento é geralmente empregado na dispersão de material particulado com diâmetro abaixo de  $20\ \mu\text{m}$ . Um esquema com o corte do equipamento está representado na Figura A.2

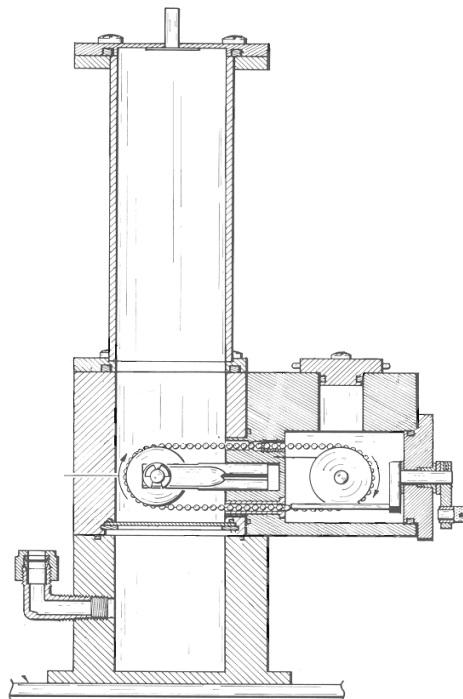


Figura A.2 – Vista do corte transversal do alimentador de partículas do tipo leito fluidizado.

O seu funcionamento consistia na alimentação do material particulado, contido em um depósito, a um leito de contas. Este era formado por esferas, de uma liga de cobre com zinco, maiores que o pó utilizado. A alimentação foi realizada através de uma correia, cuja velocidade podia ser variada. O ar passava pelo leito, com uma velocidade suficiente para fluidizá-lo, sem, contudo, arrastar as suas esferas. O movimento das mesmas fazia com que o pó fino se desaglomerasse e pudesse ser arrastado com a corrente gasosa. Isto resultava em uma alimentação de partículas homogênea e constante.

A concentração de pó gerada por este tipo de alimentador pode ser alterada através da variação da velocidade da correia de alimentação, que possui velocidade de referência de 0 a 100, pois a mesma não é a velocidade real do equipamento. Porém, percebeu-se durante os ensaios que outra variável influi nas condições de alimentação do equipamento, a quantidade de pó no reservatório que alimenta a correia. Dependendo da altura alcançada pelo material particulado no reservatório, essa variável pode se tornar mais significativa do que a variação da velocidade da correia. Na Figura A.3 apresenta-se a variação da alimentação quando se coloca uma determinada massa de pó no reservatório e opera-se o mesmo até que a massa adicionada fosse consumida. Pode-se observar que a queda é significativa, podendo ser maior se a velocidade de alimentação do leito fluidizado e a quantidade de material particulado forem maiores.

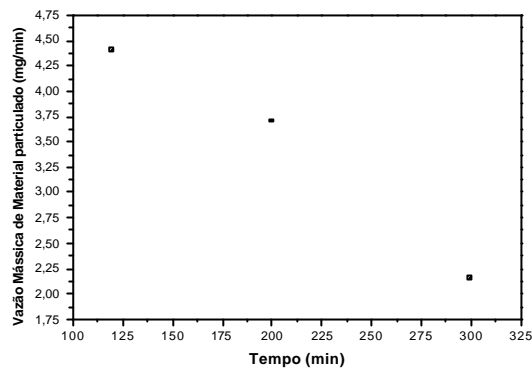


Figura A.3 – Variação da vazão mássica com o tempo para uma certa quantidade de material particulado inserida no reservatório no tempo inicial.

A calibração da concentração de pó gerada pelo alimentador foi obtida através de ensaios de filtração. Cada experimento foi iniciado após duas horas de operação, período, de acordo com Marple et al. (1978), que o leito entra em regime para as maiores velocidades de operação da correia. Como mostrado na Figura A.3, é importante que a quantidade de material fosse mantida constante, entretanto não sabia-se o quanto era consumido, pois tal parâmetro era o objetivo dos ensaios, assim tentou-se manter a quantidade de pó através da altura do mesmo no reservatório. Afirmar o quão constante conseguiu-se manter o nível no reservatório é complicado, uma vez que o controle foi visual. A altura escolhida foi baixa em função da grande resistência que a alumina oferecia à agitação promovida por pás para evitar aglomerados que poderiam existir no reservatório.

Os resultados de vazão mássica obtidos para as maiores velocidade de referência estão apresentados na Figura A.4. A calibração foi realizada apenas para as maiores velocidades da correia, pois elas forneceriam as maiores vazões mássicas, aumentando a quantidade de material dentro do precipitador, reduzindo

o tempo de operação do mesmo para que fosse coletado material suficiente para a pesagem e diminuindo erros de pesagem, devido a maior massa coletada.

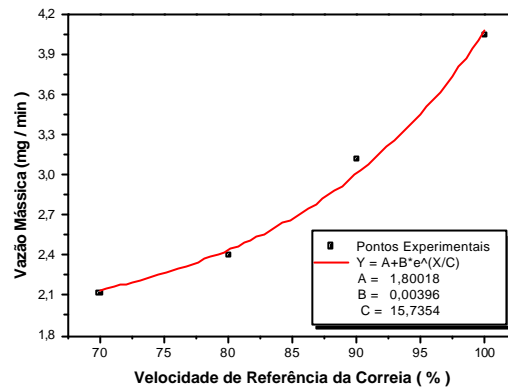


Figura A.4 – Calibração do alimentador do tipo leito fluidizado.

Observa-se pela figura que a vazão diminuiu com a queda da velocidade da correia. Esta queda apresentou um comportamento não linear, mais especificamente exponencial, sendo o coeficiente de correlação da curva obtida igual a 0,99252. Há uma tendência da alimentação tornar-se constante para as velocidades menores.

Cada ponto mostrado no gráfico da Figura A.4 é a média de pelo menos dois pontos, uma vez que realizou-se alguns testes para a velocidade igual a 100 e ela se mostrou bem constante, como pode ser observado na Figura A.5. Portanto, o alimentador garante uma certa estabilidade para que os experimentos sejam realizados nas mesmas condições e o método de controle visual não é tão falho. Para a determinação do ponto correspondente à velocidade de referência de 100, o dado de vazão mássica menor foi descartado devido a apresentar uma diferença muito maior quando comparado com os outros cinco dados.

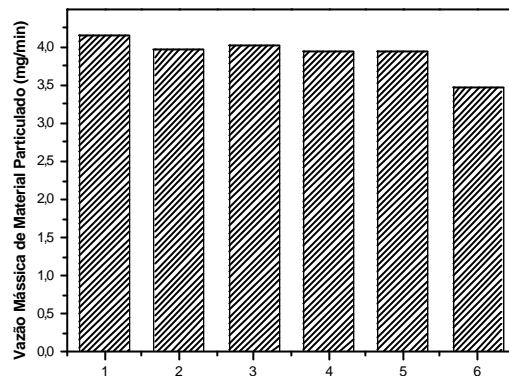


Figura A.5 – Pontos experimentais representando a estabilidade da geração de material particulado para a velocidade de referência igual a 100.

Entretanto, este alimentador não pôde ser utilizado durante os ensaios, devido às alterações climáticas, que acarretaram em uma maior umidade do ar. Como a alumina tem uma grande tendência a absorver umidade, o pó tornava-se aglomerado e causava o entupimento do canal de alimentação pelo qual passava a correia e impossibilitava a mesma de alimentar o leito com mais material particulado, tornando o experimento inviável.

Para contornar este problema, foi testado outro alimentador de pó, o do tipo prato rotativo, que possuía um princípio mais simples, porém menos preciso. Este apresentava maior probabilidade de obtenção de bons resultados para o material em questão, devido a ser um equipamento mais robusto e com maior orifício para a passagem do pó, o que desfavorece o entupimento.

## APÊNDICE B

### B Determinação da Resistividade

As resistividades dos materiais utilizados neste estudo foram obtidas através do método descrito por Coury, (1983), no qual é determinada a resistência à passagem de corrente por uma camada de sal e, a partir deste resultado, é obtida a resistividade utilizando a Equação B.1. Este método é baseado no mesmo princípio do teste para cálculo da resistividade ASTM D 257 da American Society for Testing e Materials, porém neste último o eletrodo para determinação da resistência é muito mais complexo, por isso ele não foi utilizado.

$$R = \frac{r \cdot L}{A} \quad (\text{B.1})$$

na qual,

$R$  é a resistência elétrica em  $\Omega$ ;

$A$  é a área da seção na qual escoava corrente elétrica em  $\text{m}^2$ ;

$L$  a largura da camada de sal em m.

Para a realização do ensaio de determinação da resistividade utilizou-se uma célula composta por duas placas de cobre, cuja área era de  $25 \text{ cm}^2$ , mantendo uma distância entre elas de 1 cm de largura, inseridas em uma base de acrílico, a qual possuía conectores para a fonte de alta tensão e o aterramento, conforme apresentado na Figura B.1. O espaço entre as placas era preenchido com o material a ser analisado e a célula deixada em dessecador por 4 horas. Após este prazo, aplicava-se a alta tensão, sendo então determinada a corrente gerada.



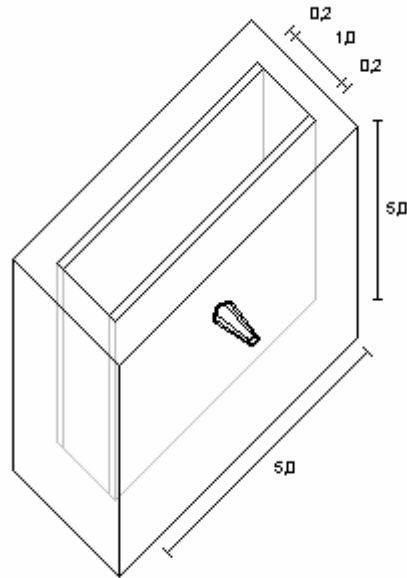


Figura B.1– Célula para determinação da resistividade.

A curva de tensão por corrente elétrica para o cloreto de sódio está apresentada na Figura B.2, na qual o coeficiente angular da reta obtida representa a resistência do cloreto à passagem de corrente e é igual a  $8,13 \cdot 10^7 \Omega$ .

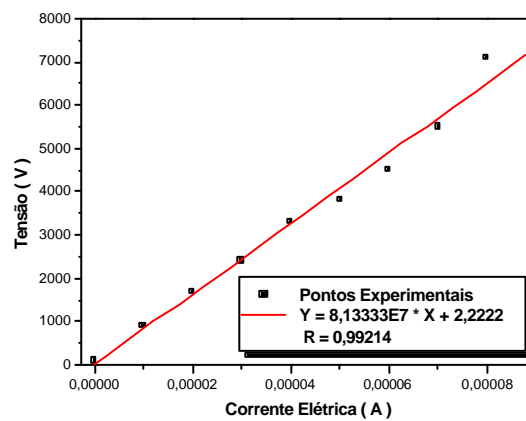


Figura B.2 – Determinação da resistência elétrica à passagem de corrente para uma camada de cloreto de sódio.

O valor da resistividade, obtido após o emprego da Equação B.1, é igual a  $2 \cdot 10^7 \Omega \cdot m$ . Este valor está próximo à resistividade do cloreto de sódio apresentada por Zhuang et al. (2000), que varia de  $10^6$  a  $10^7 \Omega \cdot m$ , confirmando a validade do método.

O mesmo ensaio foi realizado para a determinação da resistividade da alumina, porém os resultados foram muito distantes do valor proposto por Zhuang et al. (2000) e igual a  $10^{10} \Omega \cdot m$ . Desse modo, vários testes foram realizados para avaliar a possível influência da umidade na resistividade da alumina.

Os ensaios foram realizados com a alumina sem nenhum tratamento e após ter sido seca em estufa a  $150^\circ \text{C}$  por 2 horas, por 1 dia e por 7 dias. Além do efeito da umidade, também foi avaliado o efeito do empacotamento da alumina na célula. Em um ensaio, o material foi colocado no recipiente de análise com o emprego de uma espátula, enquanto que, no outro ensaio, utilizou-se um êmbolo para reduzir os espaços vazios. Neste último ensaio foi gasto o dobro de massa de pó que no ensaio para a mesma condição, porém sem o emprego do embolo. Os resultados da resistência são apresentados nas Figura B.3 a Figura B.7, e as suas respectivas resistividades, na Tabela B.1.

Pela Tabela B.1 pode-se observar que a resistividade aumentou com o tempo de secagem. Logo nas primeiras horas de secagem, o aumento foi de até 1400%, sendo o aumento mais significativo. Com a exposição por 24 horas na estufa não houve alteração, enquanto que com tempo de secagem igual a 1 semana a alteração chegou a 185%. O empacotamento do material na célula não influenciou a resistividade.

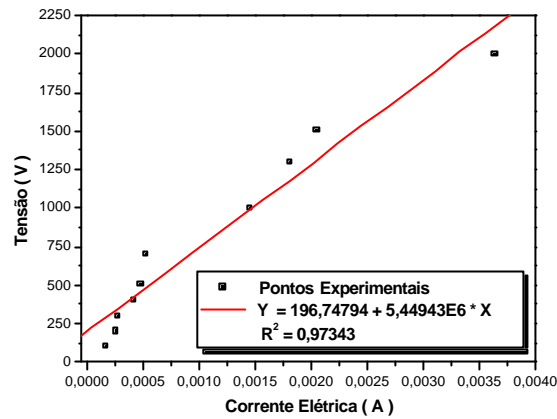


Figura B.3– Resistência da alumina sem ter sido seca em estufa.

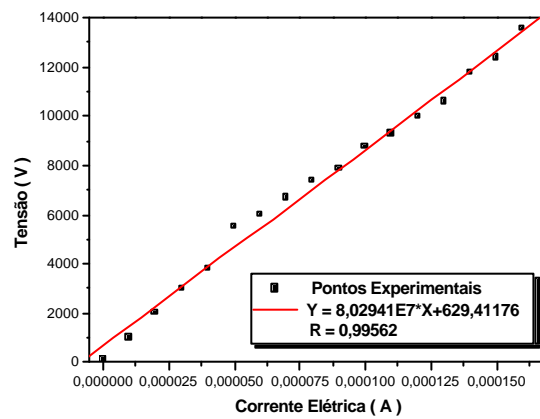


Figura B.4 – Resistência da alumina após 2 horas em estufa.

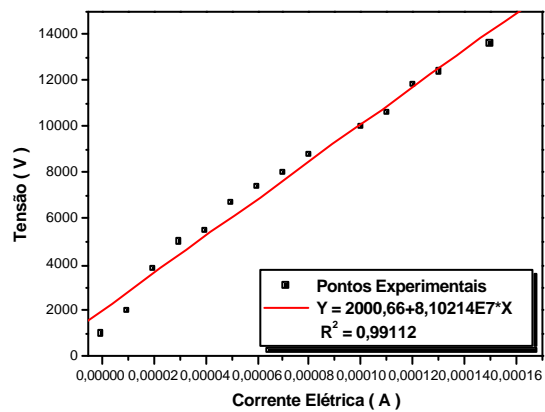


Figura B.5 – Resistência da alumina após 1 dia em estufa.

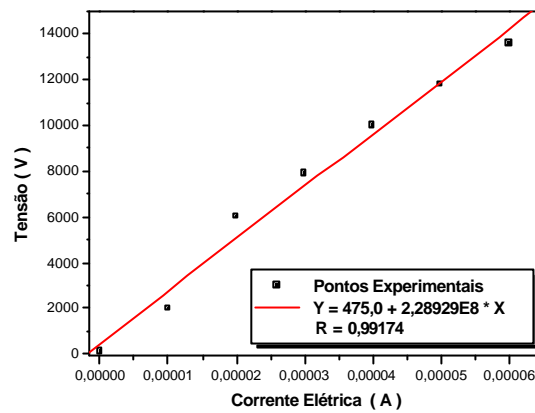


Figura B.6 – Resistência da alumina após 7 dias em estufa.

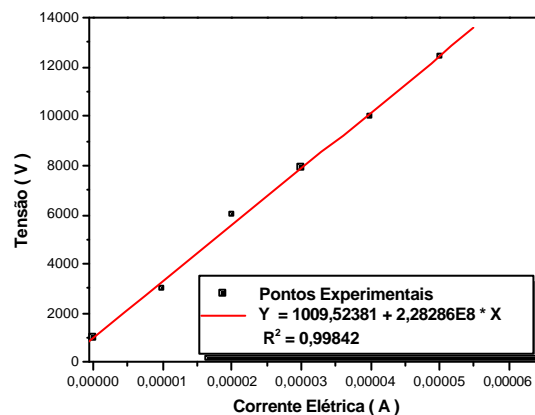


Figura B.7 – Resistência da alumina após 7 dias em estufa e preenchida com o emprego de um êmbolo.

Mesmo com a secagem do material, a resistividade da alumina ficou muito abaixo do valor apresentado na literatura. Segundo a ASTM D 257, são vários os fatores que podem influenciar a resistividade, além da célula não ser a mesma sugerida por este padrão, ainda há influência da temperatura, da umidade, da

desuniformidade do material, da polaridade da tensão aplicada, da intensidade da tensão aplicada e do tempo de aplicação.

Tabela B.1 – Resistividade da alumina.

<b>Testes</b>	<b>Resistividade (W.m)</b>
Sem estufa	$1,4 \cdot 10^6$
2 horas	$2,0 \cdot 10^7$
1 dia	$2,0 \cdot 10^7$
7 dias	$5,7 \cdot 10^7$
7 dias/maior massa	$5,7 \cdot 10^7$

Uma vez que, para o cloreto de sódio, o método utilizado apresentou resultados satisfatórios, o valor obtido através do seu emprego foi o assumido para a resistividade da alumina. O valor adotado, igual a  $3,85 \cdot 10^7 \Omega \cdot m$ , foi uma média entre os valores para os ensaios que utilizaram a alumina após a secagem. Um valor exato para a resistividade é de difícil determinação, uma vez que o material ficou mais de um dia na estufa antes da realização dos ensaios e, além disso, pela existência de umidade no ar dentro do equipamento, que a alumina pode adsorver, alterando sua resistividade. Portanto, o valor da resistividade é uma aproximação, pois é extremamente difícil reproduzir as condições em que é realizado cada experimento.

A determinação da resistividade do material é importante, pois é através deste parâmetro que se determina a possibilidade ou não das partículas serem coletadas por um precipitador eletrostático. Materiais que apresentam uma elevada resistividade não são eficientemente removidos por causarem, quando coletados nas placas, o fenômeno da corona reversa (Sparks et al. 1979). Por outro lado, aqueles com resistividades abaixo de  $10^2 \Omega.m$  também possuem menores chances de serem removidos, uma vez que, segundo Batel (1976) apud St. Georges e Feddes (1995), perdem rapidamente as cargas adquiridas quando entram em contato com os eletrodos de coleta, sendo facilmente ressuspensas para a corrente gasosa.

O valor considerado alto para a resistividade é, segundo Macaire e Martin (1997), igual a  $10^9 \Omega.m$ , porém, Bapat (2001) adota um valor com uma ordem de grandeza menor como aquele referente ao ponto no qual se iniciariam as perdas de eficiência. O valor medido para a alumina está abaixo desta faixa, enquanto que o proposto na literatura está bem acima. Cabe ressaltar que, durante a realização dos testes de determinação da eficiência utilizando este material particulado, foi possível obter o resultado desejado sem grandes problemas, sendo este mais um indício de que a alumina, nas condições utilizadas, apresentava uma resistividade menor do que a proposta na literatura.

## APÊNDICE C

### C Detalhes do Gerador de Partículas

O funcionamento do gerador possui vários estágios, que estão diretamente ligados à tensão aplicada, e podem ser determinados a partir da forma geométrica da ponta do capilar, vista por uma janela, presente no equipamento. Quando a tensão é muito baixa, o estágio é chamado de modo gotejante, e é caracterizado pelo formato arredondado da ponta do capilar, devido à baixa frequência com que as gotas saem do capilar. Com o aumento da tensão, há uma elevação da corrente medida, que era praticamente zero no estágio anterior, e um aumento da frequência com que as gotas deixam o capilar. Este estágio, denominado modo pulsante, é muito instável. O próximo estágio, obtido com o aumento da tensão, é o modo jato-cônico (Figura C.1). Durante este estágio, a corrente se mantém praticamente constante com o aumento da tensão, e a forma de saída do capilar é cônica. O aumento da tensão após este modo não é aconselhável, devido à formação de um alto campo elétrico, que caracteriza o modo corona, deixando a geração de aerossol muito instável. De acordo com Chen et al. (1995) o modo jato cônico é o que apresenta melhores resultados, quando se avalia quão monodisperso é o aerossol gerado.

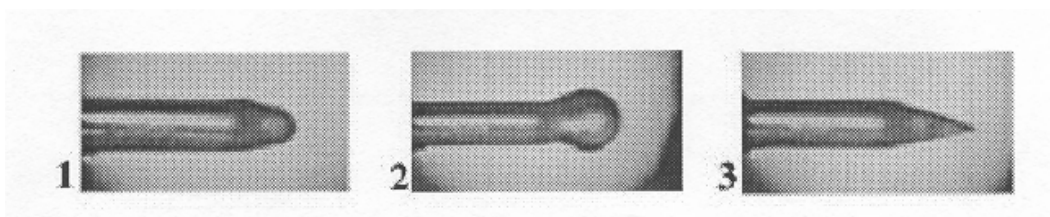


Figura C.1– Representação dos modos de operação do gerador: 1) sem escoamento de líquido, 2) modo gotejante e 3) modo jato cônico (Manual da TSI).

O gerador possui uma fonte de Polônio 210 para neutralizar as cargas, que emite raios alfa e possui energia igual a 5 millicurie. Esta fonte promove carregamento bipolar e tem uma meia-vida de 138 dias. A etapa de neutralização do gerador de partículas é necessária para que as cargas, na superfície das gotas, sejam reduzidas, evitando que as forças repulsivas entre as mesmas possam causar o efeito de desintegração Rayleigh, diminuindo a concentração de aerossol monodisperso (TSI). De acordo com Rayleigh (1945), as cargas têm dois efeitos sobre as gotas: quando em pequenas quantidades, elas causam não a repulsão, mas a coalescência das gotas, aumentando o tamanho das mesmas; o outro efeito é que as cargas elétricas tendem a diminuir a esfericidade das gotas, tornando-as instáveis. Com a evaporação do líquido, eleva-se a densidade de cargas na superfície das gotas, aumentando o efeito causado pelas cargas sobre as mesmas e, quando este se iguala à tensão superficial da gota, ocorre a desestabilização. A partir deste ponto, a gota pode ejetar parte de sua massa inicial em várias gotas menores, cujo número dependerá da massa inicial (Doyle et al. 1964) e, assim, influenciar a distribuição granulométrica do material gerado.

O resultado de todo o processo que ocorre no gerador é um aerossol composto de partículas monodispersas, neutras e estáveis.



## APÊNDICE D

### D Determinação do método de análise

A determinação do diâmetro das partículas, geradas pelo electrospray, em função da concentração de sal na solução de alimentação, era necessária, pois o equipamento não determinava o diâmetro gerado, apenas garantia que o material particulado era monodisperso. Na ausência de equipamentos que determinassem o diâmetro das partículas em suspensão gasosa, optou-se pela coleta destas partículas e análise em microscópio. Foram testados os microscópios: eletrônico de varredura (MEV), eletrônico de transmissão (MET) e o de força atômica (Figura D.1). As partículas foram produzidas e coletadas em porta-amostras, dentro do precipitador em operação. Para cada microscópio analisado foi inserido um tipo de porta-amostra compatível com a análise a ser realizada. Os primeiros testes não detectaram partículas e novos testes foram realizados com maiores tempos de exposição. Estes também não apresentaram bons resultados.

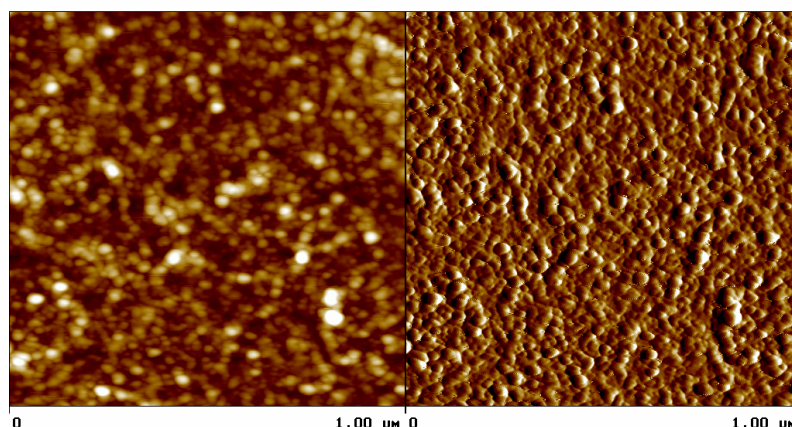


Figura D.1– Foto obtida com o microscópio de força atômica.

Nesta fase, descartou-se o porta-amostra de vidro para o microscópio de força atômica e utilizou-se somente os dos microscópios eletrônicos, por serem feitos de material condutor, acreditando que isto aumentasse a probabilidade da coleta. Porém, o MEV não estava em boas condições e não foi possível detectar partículas no tamanho gerado pelo electrospray, somente as contaminações, que eram bem maiores (Figura D.2).

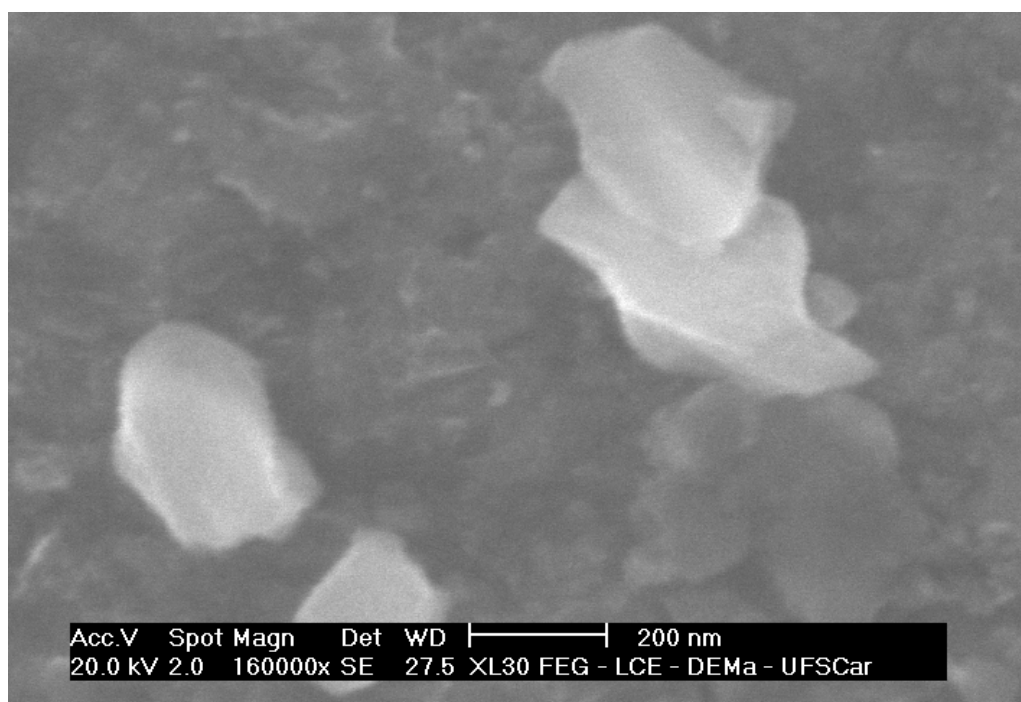


Figura D.2 – Imagem de contaminantes obtida com o MEV.

Nas análises realizadas no MET, foi possível detectar algumas partículas em um dos ensaios, mas não foi possível reproduzir o mesmo resultado. As partículas em questão estão apresentadas na Figura D.3.

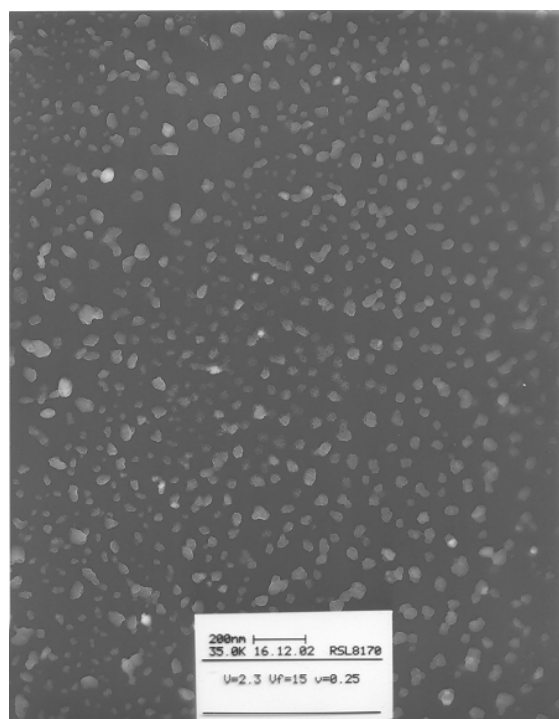


Figura D.3 – Primeiras partículas observadas com o emprego do MET.

Depois das tentativas sem sucesso de observar as partículas, tentou-se determinar o padrão de difração das mesmas, (Figura D.4), e compará-lo com o padrão do cloreto de sódio. Apesar da amostra apresentar um padrão condizente com a forma cúbica, a distância entre os pontos do diagrama apresentou valores um pouco distantes do padrão do cloreto de sódio. Realizou-se, então, a microanálise do porta-amostra, no qual estavam depositadas as partículas já visualizadas, e não foi possível a detecção de NaCl. Portanto, concluiu-se que as partículas coletadas consistiam em contaminação.



Figura D.4 – Difratoograma da amostra.

Como o força atômica não podia realizar a microanálise e o MEV não apresenta boa detecção para toda a faixa de partículas geradas, os esforços foram concentrados no MET. Além dos motivos citados existem trabalhos anteriores, como o de Prost et al. (1998) e Bang e Murr (2002), que obtiveram bons resultados na caracterização de nanopartículas utilizando o microscópio eletrônico de transmissão.

Acreditando que a dificuldade em coletar as partículas fosse devida à baixa concentração de sal gerada e à grande área de coleta do precipitador, os testes seguintes foram realizados na saída do gerador, abandonando-se o precipitador. Para garantir que as partículas fossem depositadas sobre a grade do MET e que não se desviassem do anteparo juntamente com o ar, a saída do gerador foi colocada quase

que estrangulada sobre o porta amostra. As análises no MET novamente não obtiveram resultados positivos. Depois de todos estes ensaios, creditou-se a dificuldade a uma possível falha do gerador, sendo o único ponto passível de mau funcionamento, o capilar. Este foi trocado por um novo e nenhum resultado positivo foi obtido. Foi questionada a qualidade dos capilares e, como resposta ao entupimento de todas as peças de reposição, optou-se pela passagem de ar na forma de pulso reverso. Os capilares foram regenerados, com exceção daquele que estava no gerador durante os testes iniciais. Repetiram-se os testes com a coleta realizada na saída do gerador e finalmente foi possível detectar partículas de NaCl.

Assim, o microscópio utilizado, para a determinação da imagem das partículas, foi aquele que se mostrou mais apto, o microscópio eletrônico de transmissão, uma vez que o MEV não conseguiu apresentar um bom foco para partículas tão pequenas e o força atômica não possuía a microanálise para caracterizar o material.

## APÊNDICE E

### **E Descrição do Microscópio Eletrônico de Transmissão**

O MET é um equipamento que aumenta imagens, de forma que se possam distinguir detalhes menores que 0,1 mm, o limite de visualização do olho humano. Possui uma resolução tão boa que se podem distinguir objetos da ordem de nanômetros e até angstroms. Ele possui ainda a vantagem de poder definir a composição dos elementos contidos na amostra e determinar qual a estrutura cristalográfica do material. Uma fotografia deste microscópio é apresentada na Figura E.1.

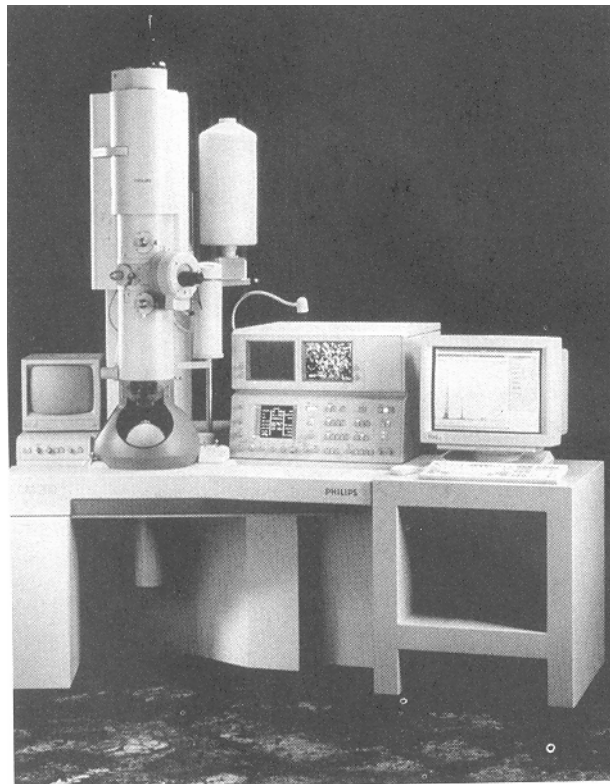


Figura E.1 – Fotografia do microscópio eletrônico de transmissão (Williams e Carter 1996)

A limitação deste equipamento é o alto custo das análises, uma vez que todos os materiais utilizados nas mesmas são importados.

Segundo Williams e Carter (1996) e a Apostila do Curso Microscopia Eletrônica: Transmissão e Varredura, do DEMA UFSCar, o princípio de funcionamento deste equipamento utiliza tanto a característica de partícula, quanto à característica de onda apresentada pelo elétron e consiste na geração de um feixe de elétrons, geralmente através do aquecimento de um filamento de tungstênio ou de LaB<sub>6</sub>. Existem outros métodos de geração de elétrons (aplicação de um alto campo elétrico, por exemplo), porém a técnica citada anteriormente é a mais empregada.

O feixe criado passa por lentes eletromagnéticas que o conduzem até a amostra. Essas primeiras lentes que entram em contato com o feixe são as condensadoras, que permitem a escolha do tamanho do feixe e o ângulo de convergência do mesmo com o plano da amostra. Elas são de difícil construção, por isso o equipamento precisa ser ajustado antes de cada análise para a correção de aberrações que podem ser causadas por estas lentes. Uma vez em contato com a amostra, os elétrons são espalhados e, transmitidos e captados por outra lente, a objetiva, que irá formar a imagem.

As lentes eletromagnéticas formam a imagem de modo equivalente às lentes óticas, porém o aumento proporcionado pelas primeiras depende da corrente elétrica aplicada à bobina de excitação, associada às mesmas.

A imagem pode ser formada através do deslocamento da abertura da objetiva, que permite apenas a passagem dos elétrons que atravessam a amostra sem serem desviados, os elétrons transmitidos. Essa imagem é denominada de

campo claro. Quando a imagem é formada apenas pelos elétrons espalhados, é chamada de campo escuro.

O espalhamento depende da intensidade do feixe de elétrons, do número atômico da amostra, de sua densidade, da espessura e da forma cristalina. Ele ainda pode ocorrer com ou sem perda de energia, são os chamados espalhamentos inelásticos e elásticos. Os inelásticos deterioram o poder de resolução do microscópio.

Os elétrons espalhados podem ser difratados, isto ocorre devido ao comportamento do elétron similar à onda e é caracterizado pelo desvio de direção da mesma pelo arranjo dos átomos da amostra. As ondas desviadas formam ondas construtivas em determinadas direções, nestes casos são chamadas de ondas em fase, caracterizando os padrões de difração que irão informar sobre os planos cristalinos, importantes para análises cristalográficas.

Após a formação da imagem, as lentes intermediárias e a projetora são utilizadas para o aumento e a reprodução da mesma. Para que a imagem possa ser visualizada pelo operador, é utilizada a catodoluminescência, através da qual a energia dos elétrons (raios catódicos) é transformada em luz. A imagem visualizada pode ser gravada através da exposição de filmes fotográficos aos elétrons, que sensibilizam a emulsão do filme, gerando a fotografia.

Quando a interação entre os elétrons e a amostra é inelástica, ocorre a geração de, entre outros fenômenos, raios X. Os raios X são importantes porque a partir deles pode ser determinada, quali e quantitativamente, a composição da amostra analisada.



A geração destes raios ocorre devido à transferência de energia do feixe para os elétrons mais próximos ao núcleo. Se a energia for maior do que a energia crítica, o átomo é levado a um estado de energia que faz com que um elétron seja emitido, deixando o átomo ionizado. O átomo tende a ir para um estado mais estável, rearranjando os elétrons na sua nuvem e deslocando um elétron das camadas mais externas para o lugar daquele que foi emitido. Neste processo ocorre a liberação de energia, os raios X, que são característicos para cada elemento, uma vez que cada um possui um arranjo mais estável, ligado à distribuição dos elétrons ao redor do núcleo.

A microanálise, ou a determinação dos elementos que compõem a amostra, começa com a seleção de uma área na amostra, na qual é aplicado o feixe de elétrons. Os raios X gerados são detectados e transformados em sinais elétricos, enviados por sua vez para um computador que irá separar os espectros de cada elemento e construir uma curva com a resposta da análise.

Ainda pode ser realizada uma nanodifração, que fornece informações sobre áreas da amostra menores que 10 nm.

Entretanto, a microanálise não é eficiente quando a amostra contém elementos considerados leves, pois a emissão de energia é baixa e não pode ser detectada. Elementos abaixo do Na na tabela periódica não são detectados.

A técnica possui outras limitações, como a interferência de raios X, gerados pelo próprio equipamento, por outras partes de amostras que não sejam a analisada, ou mesmo por elétrons secundários, gerados na superfície da amostra.

Quando a quantidade de material é muito pequena, os picos de energia de cada elemento podem ficar muito próximos ao ruído gerado. Nestes casos, a

análise deve ser mais longa e a escala do gráfico reduzida, para que possa ser percebida a evolução dos picos com o tempo, o que não ocorre com os ruídos.

Outra vantagem do MET é a quantificação do elemento presente, uma vez que esta é proporcional à intensidade dos picos, pois os mesmos dependem da concentração do elemento na amostra. Existe uma técnica para o cálculo, baseado na intensidade dos picos, que fornece um bom grau de confiança para os resultados obtidos.

O feixe de elétrons pode, contudo, danificar a amostra em maior ou menor grau, dependendo de sua intensidade e da composição do material. É comum ocorrer a quebra das ligações químicas, principalmente em polímeros, na ionização de materiais que se recombina para formar novos compostos e mesmo na mudança de um estado cristalino para o amorfo. Neste caso, a análise da amostra torna-se inviável, pois esta não será mais a mesma.

## APÊNDICE F

### **F Calibração do alimentador de material particulado do tipo prato rotativo**

A calibração do alimentador do tipo prato rotativo foi realizada com o equipamento dentro da caixa mencionada no capítulo Materiais e Métodos, e sua finalidade foi garantir uma umidade mais baixa que a ambiente, para que fosse possível trabalhar com alumina, pois, para altos valores de umidade do ar, ela se torna um material de difícil manuseio. Os ensaios foram realizados com umidade em torno de 20%, porém, para as maiores velocidades de rotação do prato a quantidade de material alimentado foi maior, resultando em entupimento do ejetor, mesmo para a umidade citada. Assim, optou-se por trabalhar com as velocidades mais baixas, para as quais tal fenômeno demorava a ocorrer. As velocidades de rotação do prato são apresentadas no equipamento como valores de referência variando de 10 em 10% até 100%. Na Tabela F.1 estão apresentadas as velocidades de referência e os respectivos períodos do prato, para os valores utilizados na calibração.

A curva obtida está apresentada na Figura F.1 e cada ponto representa a média de três dados experimentais para cada velocidade referente aos períodos apresentados.

A alimentação do prato apresentou um comportamento exponencial, muito próximo ao obtido por Pisani Jr. (1997), sendo o valor do coeficiente de correlação da curva, ajustada aos pontos experimentais, igual a 0,996.

Tabela F.1– Períodos de rotação do prato rotativo.

<b>Velocidade de Referência (%)</b>	<b>Período do Prato (s)</b>
10	155
20	118
30	94
40	81

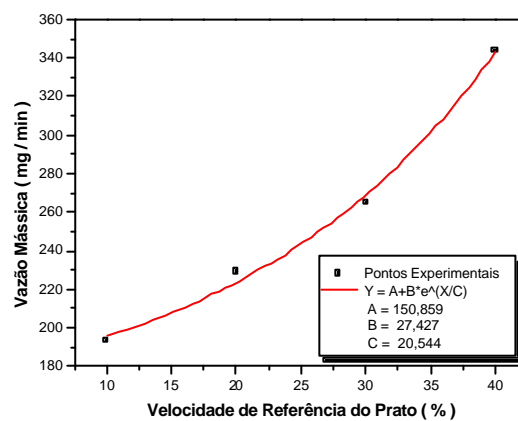


Figura F.1- Calibração do alimentador do tipo prato rotativo.

Entretanto, como a massa alimentada era pouca, optou-se por trabalhar com a mesma massa alimentada em todas as condições, de modo a não ser necessário trabalhar com elevado tempo de amostragem.

## APÊNDICE G

### G Ensaio de Reprodutibilidade

#### G.1 Ensaios da Etapa 1

A Tabela G.1 apresenta os valores dos ensaios de reprodutibilidade para os experimentos realizados com a alumina. Foram realizadas réplicas de algumas condições, abrangendo ensaios com diferentes comprimentos, diâmetro de fio, espaçamento entre eles, velocidades e campos elétricos. Obteve-se um bom resultado, estando os dados bem próximos. A maior variação encontrada foi igual a 1,91%, proporcionando uma grande confiabilidade nos testes realizados.

Tabela G.1– Ensaio de reprodutibilidade para a alumina.

<b>Ensaio 1 (h<sub>T</sub> %)</b>	<b>Ensaio 2 (h<sub>T</sub> %)</b>
98,66	98,51
90,44	89,04
95,74	95,83
95,60	96,20
96,17	95,94
95,89	95,68
97,2	97,86
90,38	91,49
88,50	90,19

## G.2 Ensaios da Etapa 2

Também foram realizados ensaios de reprodutibilidade para os testes utilizando o cloreto de sódio. Nesta etapa, assim como a anterior foi coberta todas as variáveis estudadas, sem, contudo realizar os ensaios para todas as condições. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela G.2 e o máximo desvio foi de 5%, um pouco maior que o anterior, mas suficiente para validar os testes realizados.

Tabela G.2– Ensaio de reprodutibilidade para o cloreto de sódio.

<b>Ensaio 1 (h<sub>T</sub> %)</b>	<b>Ensaio 2 (h<sub>T</sub> %)</b>
56,663	59,535
80,316	79,488
88,816	91,297
63,999	60,173
88,150	86,806
77,812	75,053
95,134	92,306
98,949	98,750
99,998	99,999
98,968	98,007
99,995	99,994
99,994	99,995
99,999	99,998
99,989	99,991
99,999	99,999
99,996	99,996
99,998	99,995

## APÊNDICE H

### H Resultados Experimentais

#### H.1 Resultados obtidos para a Etapa 1

A Tabela H.1 a Tabela H.2 apresentam os resultados de eficiência global referentes a Etapa 1.

Tabela H.1– Valores da eficiência global para  $L_{ne} = 0,15$  cm, sendo  $v_1=1,0$  m/s e  $v_2=1,5$  m/s.

Eficiência Global ( % )								
Variáveis	$r_{se} = 0,25$ (mm)				$r_{se} = 0,45$ (mm)			
	$E_{ps} = 6$ (kV/cm)		$E_{ps} = 8$ (kV/cm)		$E_{ps} = 6$ (kV/cm)		$E_{ps} = 8$ (kV/cm)	
	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$
$v_1$	91,12	90,60	98,66	98,74	75,85	58,63	95,60	97,60
$v_2$	78,72	84,77	91,44	95,74	68,60	44,50	95,15	93,21

Tabela H.2– Valores da eficiência global para  $L_{ne} = 0,30$  cm, sendo  $v_1=1,0$  m/s e  $v_2=1,5$  m/s.

Eficiência Global ( % )								
Variáveis	$r_{se} = 0,25$ (mm)				$r_{se} = 0,45$ (mm)			
	$E_{ps} = 6$ (kV/cm)		$E_{ps} = 8$ (kV/cm)		$E_{ps} = 6$ (kV/cm)		$E_{ps} = 8$ (kV/cm)	
	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$	$s/2c = 0,5$	$s/2c = 1,0$
$v_1$	98,00	99,48	99,32	-	94,07	88,50	98,50	98,91
$v_2$	95,89	97,20	98,70	-	90,38	75,50	98,59	94,36

## H.2 Resultados obtidos para a Etapa 2

Os resultados obtidos na Etapa 2 estão apresentados na Tabela H.3 a Tabela H.12.

Tabela H.3 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com  $L=0,15$  m e concentração de sal =0,5 g/l.

Eficiência (%)								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
56,663	63,999	77,812	60,680	73,518	95,134	60,714	74,134	99,962
80,316	88,150	99,045	62,595	93,130	99,691	72,991	91,881	99,992
88,816	96,870	99,878	85,762	98,133	99,836	83,699	98,726	99,996
Concentração de Entrada *10 <sup>-3</sup> (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
1,40	2,77	6,55	1,28	1,81	4,76	1,63	3,11	9,14
1,56	3,56	5,20	0,93	2,01	5,80	1,27	3,41	10,17
1,46	3,52	4,98	0,65	1,83	4,97	1,26	4,03	11,1
Concentração de Saída (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
606,70	996,30	1453,30	503,83	479,86	232,40	638,40	806,00	3,48
306,20	421,86	49,64	346,25	137,86	17,94	341,67	276,60	0,81
163,28	110,22	6,09	92,92	34,13	8,15	204,85	51,27	0,46

Tabela H.4 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com  $L=0,30$  m,  $2s=0,04$ m e concentração de sal = 0,5 g/l.

Eficiência (%)								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
88,624	97,647	99,955	93,096	99,113	99,996	95,568	98,756	99,988
94,052	99,576	99,994	97,392	99,959	99,999	97,764	99,822	99,997
97,910	99,981	99,996	99,504	99,994	99,999	99,499	99,979	99,999

Continua na página seguinte.



Tabela H.4 - Continuação.

Concentração de Entrada *10 <sup>-3</sup> (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
1,53	2,73	6,05	0,97	3,49	7,41	1,21	2,49	5,23
1,21	2,76	5,89	0,97	3,41	7,49	1,23	2,46	3,97
1,23	2,62	7,15	1,23	3,23	7,77	0,99	2,55	3,62

Concentração de Saída (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
174,00	64,2	2,71	25,42	30,97	0,32	53,80	30,92	0,62
71,67	11,68	0,33	25,42	1,41	0,42	27,50	4,39	0,13
25,76	0,50	0,26	6,10	0,21	0,09	5,12	0,53	0,02

Tabela H.5 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com L=0,30 m, 2s=0,06m e concentração de sal = 0,5 g/l

Eficiência (%)								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
95,360	99,755	99,996	98,034	99,803	99,996	95,057	99,778	99,996
99,324	99,978	99,999	99,016	99,975	99,999	99,259	99,968	99,998
99,724	99,986	99,998	99,720	99,995	99,999	99,769	99,986	99,999

Concentração de Entrada *10 <sup>-3</sup> (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
0,59	1,72	3,95	0,75	1,85	3,66	0,28	1,14	4,16
0,41	1,59	4,25	0,49	1,99	3,42	0,36	1,36	3,48
0,40	1,45	4,66	0,73	1,99	3,54	0,57	2,00	2,97

Concentração de Saída (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
27,56	4,20	0,18	14,66	3,64	0,14	14,00	2,53	0,17
2,74	0,36	0,04	4,81	0,50	0,05	2,66	0,43	0,06
1,10	0,20	0,08	2,05	0,10	0,02	1,33	0,35	0,04

Tabela H.6 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com L=0,15 m e concentração de sal =1,5 g/l.

Eficiência (%)								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
71,940	77,955	99,996	68,038	84,625	99,838	51,657	70,691	94,763
82,077	95,188	99,999	79,008	91,608	99,954	73,340	91,343	99,749
91,774	99,376	99,999	85,510	98,501	99,921	86,657	97,673	99,952
Concentração de Entrada *10 <sup>-3</sup> (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
1,11	3,49	7,41	1,96	4,95	12,82	2,72	5,52	17,87
0,97	3,41	7,49	1,80	4,80	13,22	2,44	5,73	23,38
1,23	3,23	7,76	2,15	4,82	12,86	2,83	6,20	13,27
Concentração de Saída (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
76,63	30,97	0,32	627,83	761,83	20,80	1318,00	1616,00	936,00
25,42	1,41	0,04	378,75	402,67	6,06	651,57	496,20	58,68
7,32	0,21	0,10	312,00	72,20	10,18	377,83	144,30	6,43

Tabela H.7 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com L=0,30 m, 2s=0,04m e concentração de sal = 1,5 g/l.

Eficiência (%)								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
93,210	98,575	99,964	94,074	97,647	99,938	97,741	99,902	99,997
97,854	99,689	99,994	96,956	99,901	99,994	98,419	99,979	99,997
98,949	99,977	99,998	98,968	99,938	99,995	99,514	99,989	99,998
Concentração de Entrada *10 <sup>-3</sup> (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
2,17	5,52	20,17	2,05	3,99	9,10	2,52	3,92	8,94
2,28	5,63	10,80	2,06	3,27	9,33	1,70	4,38	8,87
1,86	4,45	22,18	2,97	3,12	7,44	1,92	4,89	9,04

Continua na página seguinte

Tabela H.7 - Continuação.

Concentração de Saída (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
147,33	78,63	7,22	121,33	94,09	5,67	56,88	3,86	0,28
48,93	17,52	0,67	62,72	3,27	0,56	26,87	0,94	0,27
19,57	1,03	0,27	30,73	1,94	0,45	9,34	0,53	0,15

Tabela H.8 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com L=0,30 m, 2s=0,06m e concentração de sal = 1,5 g/l.

Eficiência (%)								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
93,120	99,646	99,960	96,492	99,913	99,999	94,132	99,539	99,996
99,165	99,942	99,999	99,702	99,992	99,999	98,862	99,972	99,999
99,666	99,991	99,997	99,854	99,997	99,999	99,712	99,979	99,999

Concentração de Entrada *10 <sup>-3</sup> (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
1,03	3,94	3,09	0,64	2,20	3,32	1,12	2,93	4,94
1,45	3,22	3,72	1,43	2,70	4,59	1,00	2,67	5,09
1,33	4,48	4,80	0,79	3,60	5,07	0,84	1,45	5,50

Concentração de Saída (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
71,08	13,97	1,42	22,5	1,94	0,05	65,73	13,52	0,21
12,11	1,88	0,08	4,28	0,25	0,02	11,48	0,76	0,05
4,46	0,49	0,12	1,15	0,11	0,02	2,41	0,31	0,04

Tabela H.9 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com L=0,15 m e concentração de sal =2,5 g/l.

Eficiência (%)								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
62,240	75,262	91,215	61,526	85,380	98,443	49,684	77,360	98,017
76,325	96,064	99,781	73,038	93,531	99,269	67,621	88,335	99,668
84,170	97,719	99,978	79,879	97,259	99,475	79,106	95,351	99,832

Continua na página seguinte.

Tabela H.9 - Continuação.

Concentração de Entrada *10 <sup>-3</sup> (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
4,48	6,02	14,00	3,14	6,81	20,22	3,70	7,50	16,53
4,22	7,19	15,58	3,33	6,50	18,90	7,08	7,54	17,03
2,97	4,45	18,95	3,03	7,73	18,92	4,21	7,72	16,53

Concentração de Saída (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
1692,00	1488,00	1230,00	1210,00	995,00	314,80	1860,00	1698,00	327,80
999,67	283,17	34,15	897,80	420,17	138,20	1320,00	879,80	56,52
470,67	101,62	4,18	609,00	212,00	99,43	880,17	359,00	27,78

Tabela H.10 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com L=0,30 m, 2s=0,04m e concentração de sal = 2,5 g/l.

Eficiência (%)								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
88,474	97,729	99,986	93,410	99,569	99,993	95,263	99,775	99,993
93,814	99,731	99,998	96,819	99,891	99,999	97,900	99,819	99,999
97,540	99,986	99,999	98,778	99,989	99,999	99,066	99,964	99,999

Concentração de Entrada *10 <sup>-3</sup> (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
3,93	7,67	17,93	4,24	8,88	18,40	2,02	4,87	8,52
3,09	7,77	18,97	4,47	8,79	17,60	2,13	2,13	9,00
4,12	7,96	18,30	4,83	8,85	15,20	2,15	4,32	8,25

Concentração de Saída (#/cm <sup>3</sup> )								
s/2c=1,0			s/2c=0,5			s/2c=0,25		
v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125	v = 0,5	v = 0,25	v=0,125
453,17	174,30	2,52	279,40	38,32	1,38	95,54	10,95	0,57
191,67	20,91	0,32	142,28	9,58	0,14	44,66	3,85	0,14
101,26	1,12	0,21	58,80	0,99	0,07	20,06	1,57	0,11

Tabela H.11 - Eficiência e concentração de entrada e saída para o precipitador com  $L=0,30$  m,  $2s=0,06$ m e concentração de sal = 2,5 g/l.

Eficiência (%)								
$s/2c=1,0$			$s/2c=0,5$			$s/2c=0,25$		
$v = 0,5$	$v = 0,25$	$v=0,125$	$v = 0,5$	$v = 0,25$	$v=0,125$	$v = 0,5$	$v = 0,25$	$v=0,125$
91,214	99,285	99,984	93,549	98,797	99,993	92,107	99,128	99,994
98,448	99,938	99,999	97,443	99,942	99,997	97,731	99,924	99,998
99,472	99,987	99,999	98,946	99,954	99,999	99,356	99,962	99,999
Concentração de Entrada $\cdot 10^{-3}$ ( $\#/cm^3$ )								
$s/2c=1,0$			$s/2c=0,5$			$s/2c=0,25$		
$v = 0,5$	$v = 0,25$	$v=0,125$	$v = 0,5$	$v = 0,25$	$v=0,125$	$v = 0,5$	$v = 0,25$	$v=0,125$
1,76	2,54	8,44	2,11	5,09	13,63	2,78	3,12	10,67
1,52	2,87	7,85	2,17	5,21	12,95	2,71	2,86	7,65
1,50	4,59	11,97	2,58	5,28	12,50	3,25	3,88	9,79
Concentração de Saída ( $\#/cm^3$ )								
$s/2c=1,0$			$s/2c=0,5$			$s/2c=0,25$		
$v = 0,5$	$v = 0,25$	$v=0,125$	$v = 0,5$	$v = 0,25$	$v=0,125$	$v = 0,5$	$v = 0,25$	$v=0,125$
154,30	18,15	1,34	136,29	61,0	0,94	219,43	27,20	0,59
23,63	1,79	0,07	55,35	8,96	0,33	61,39	2,16	0,18
7,94	0,61	0,05	27,24	2,43	0,07	20,91	1,47	0,12

Tabela H.12 - Eficiência, concentração de entrada e saída para o precipitador com  $L=0,15$  m,  $s/2c = 1,0$  e  $v = 0,5$  m/s.

Eficiência (%)						
$coc = 1,0$	$coc = 2,0$	$coc = 3,0$	$coc = 3,5$	$coc = 4,0$	$coc = 4,5$	$coc = 5,0$
73,115	65,958	60,775	54,439	54,340	56,138	61,437
82,470	77,895	75,699	72,633	75,506	73,600	74,981
89,838	84,597	86,841	84,750	84,118	83,349	84,121
Concentração de Entrada $\cdot 10^{-3}$ ( $\#/cm^3$ )						
$coc = 1,0$	$coc = 2,0$	$coc = 3,0$	$coc = 3,5$	$coc = 4,0$	$coc = 4,5$	$coc = 5,0$
2,09	4,11	4,13	4,78	5,38	5,97	6,41
2,30	3,26	4,41	4,47	5,11	5,42	6,40
2,21	3,45	4,47	5,00	5,10	5,48	6,23
Concentração de Saída ( $\#/cm^3$ )						
$coc = 1,0$	$coc = 2,0$	$coc = 3,0$	$coc = 3,5$	$coc = 4,0$	$coc = 4,5$	$coc = 5,0$
561,00	1399,70	1620,00	2176,67	2455,00	2620,00	2472,86
403,20	720,80	1071,67	1223,30	1251,67	1430,00	1600,00
224,83	531,80	586,88	762,00	809,67	913,17	988,86

## APÊNDICE I

### **I Determinação das condições de operação do gerador**

Com o intuito de determinar qual a melhor tensão aplicada de modo que a geração de partícula transcorresse somente no modo jato-cônico, curvas de corrente-tensão foram construídas para todas as condições analisadas. Para tanto, foram preparadas diversas soluções com concentrações diferentes e variando 0,5 entre 0,5 e 5,0 g/l. Concentrações menores que 0,5 g/l não foram apresentadas por, provavelmente, gerarem partículas fora do limite de detecção do contador de partículas. Esta hipótese foi assumida a partir dos ensaios realizados com o capilar de 25  $\mu\text{m}$ . As soluções preparadas não possuíam condutividades similares, devido ao emprego de diferentes massas de cloreto de sódio, o eletrólito utilizado. Valores de condutividade para diversas concentrações de cloreto de sódio estão apresentados na Tabela I.1. Este parâmetro influi na formação e diâmetro das partículas de acordo com Chen et al. (1995). Para altos valores de condutividade, acima de 5 g/l, a saída do capilar torna-se instável e inviabiliza uma boa geração de partículas.

Para cada uma das soluções preparadas, foi determinada a curva de corrente por tensão do gerador, de modo que fosse possível avaliar qual a tensão em que o gerador estaria trabalhando no modo jato-cônico. Uma vez que as soluções possuíam condutividades diferentes, o ponto em que o equipamento operava com melhores resultados, quanto a monodispersão das partículas, não era o mesmo. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figura I.1 a Figura I.10.

Tabela I.1 - Condutividade das soluções de diversas concentrações de NaCl.

Concentrações (g/l)	Condutividade (mS/cm)
0,1	190
0,5	968
1,0	1.866
1,5	2844
2,5	4.540
5,0	7.660
10,0	14.300

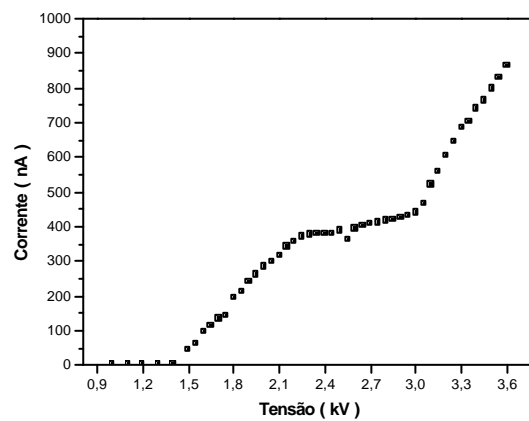


Figura I1 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 0,5 g/l.

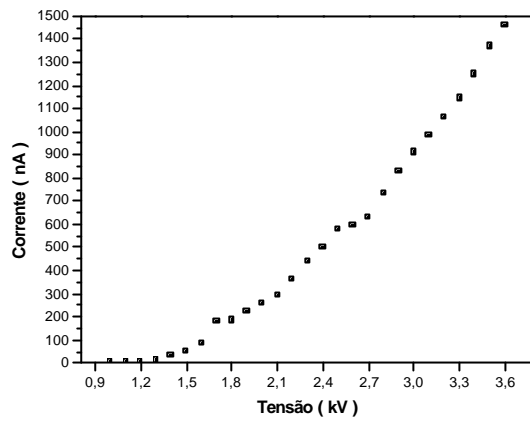


Figura I.2 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 1,0 g/l.

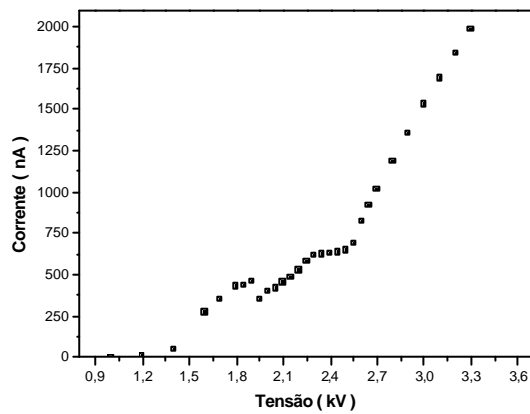


Figura I.3 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 1,5 g/l.

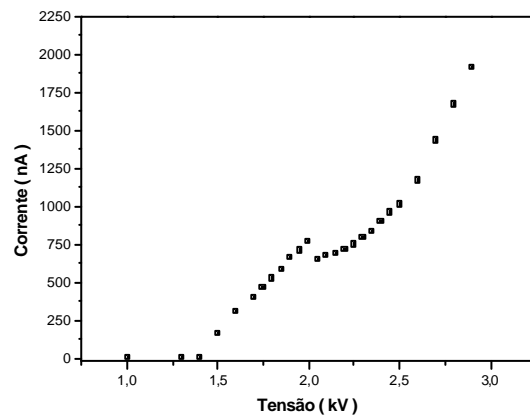


Figura I.4 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 2,0 g/l.



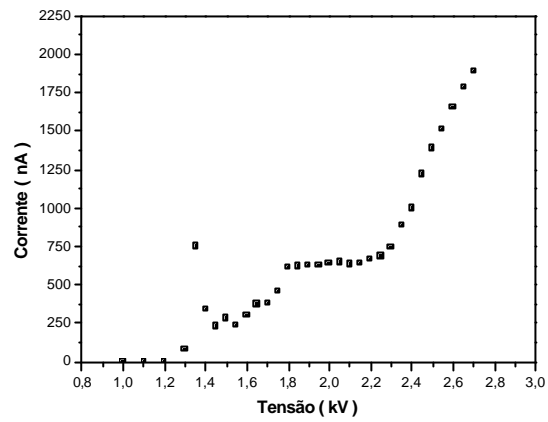


Figura I.5 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 2,5 g/l.

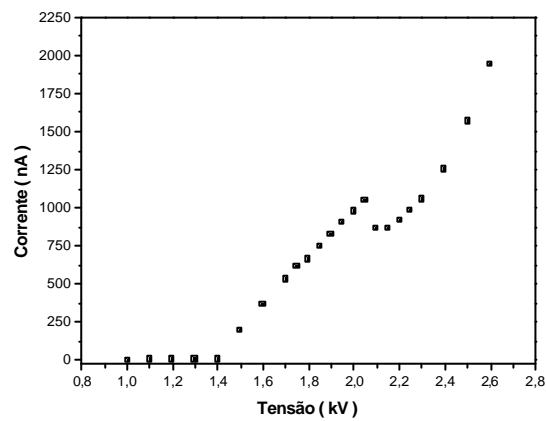


Figura I.6 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 3,0 g/l.

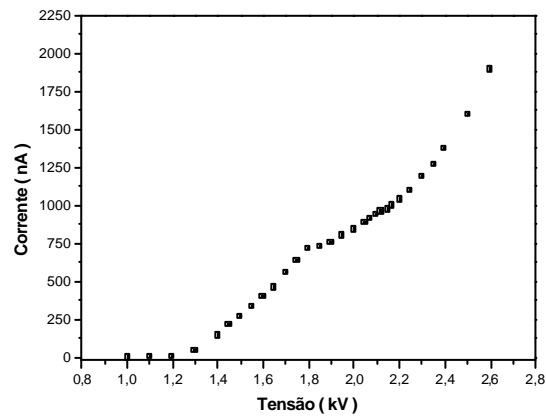


Figura I.7 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 3,5 g/l.

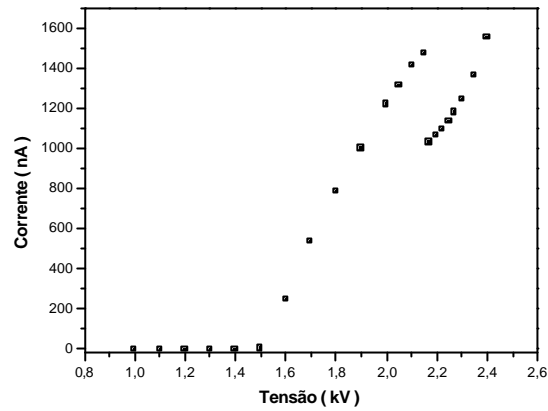


Figura I.8 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 4,0 g/l.

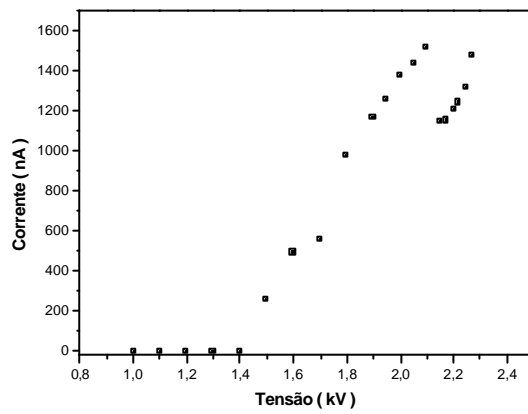


Figura I.9 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 4,5 g/l.

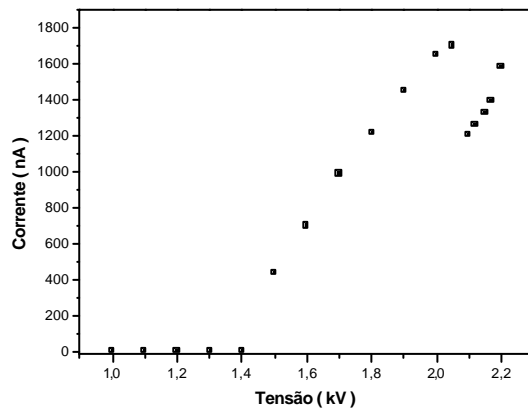


Figura I.10 – Curva corrente-tensão para a solução salina com concentração igual a 5,0 g/l.

Todos os gráficos de corrente em função da tensão apresentaram um comportamento ascendente, uma vez que havia um aumento da tensão aplicada, era esperado um aumento da corrente gerada. Contudo, a sensibilidade ao aumento da tensão não foi a mesma para todas as concentrações analisadas. As soluções mais concentradas e, por consequência, as que possuíam maior condutividade, apresentaram maior incremento de corrente.

A tendência observada foi o aumento da corrente, até um ponto em que ocorria uma pequena queda, mais pronunciada para alguns gráficos, seguida em alguns casos por um período de constância. Este último comportamento, a região constante, é o resultado da operação no modo jato-cônico, aquele que mantém a distribuição mais uniforme, descrito no Apêndice C. Para as concentrações acima de 3,5 g/l, não houve a constância, logo após um pico, houve uma queda brusca seguida de aumento da corrente. Nestes casos o modo jato-cônico foi determinado apenas visualmente, e sempre esteve compreendido no ponto logo após o pico. Para a concentração igual a 3,5 g/l, o modo jato-cônico também não apresentou o comportamento padrão, ou seja, o pico, mas o aumento com a elevação da tensão foi menor, quase constante para uma certa região. A curva obtida para a condição 0,5 g/l também foi um pouco diferente do retratado. A região invariável perdurou por um grande período, sendo perturbada apenas por um ponto após o qual começou a demonstrar as características do modo de interesse. É provável que as concentrações mais altas tenham apresentado um comportamento diferente em virtude da alta condutividade das mesmas, sendo talvez necessário incremento de tensão muito menor para observar o fenômeno como um todo.

O comportamento geral obtido foi próximo ao encontrado por Chen et al. (1995), no qual se destaca a região em que a corrente se torna constante com o aumento da tensão e que caracteriza o modo de jato-cônico. Determinou-se assim, a melhor condição para a operação do equipamento. A diferença na curva, encontrada por Chen et al. (1995) e a deste estudo, é que os referidos autores observaram uma separação pronunciada entre o modo pulsante e o modo jato-cônico, o que não ocorreu de uma forma geral neste trabalho, havendo um aumento da corrente até atingir o modo jato-cônico. Os autores apontam que o modo pulsante também apresenta uma certa estabilidade com o incremento da tensão, o que não foi tão pronunciado neste estudo. Descrevem, ainda, um pico na curva, que pode ocorrer quando o incremento de tensão é bem pequeno, chamado de modo bala de prata, devido ao formato da ponta do capilar apresentar um formato alongado, porém sua duração é curta. Contudo, o resultado obtido neste trabalho está de acordo com o manual do fabricante, que caracteriza o modo gotejante por grande bolhas e corrente quase nula e o pulsante pelo incremento da corrente com a elevação da tensão, até atingir um pico.

Ademais dos resultados da corrente elétrica produzida para cada tensão aplicada, também foi visualizado, através da janela do equipamento, a aparência do jato que deixava o capilar. A partir destas observações, era possível visualizar a mudança de forma da ponta do capilar com o aumento da tensão, passando de grandes bolhas, para um formato mais delgado e deste para um mais curto e arredondado nas pontas, até atingir a forma cônica e próxima a forma do próprio capilar. A visualização foi muito próxima da descrita pelo fabricante do equipamento e mencionada previamente. Estas avaliações visuais da

uniformidade, constância e aparência do jato foram comparadas com a Figura C.1, apresentada no Apêndice C, e com a descrição dos modos de geração, para que houvesse uma escolha da tensão, ou faixa de tensão, que melhor representasse a operação do gerador no modo jato-cônico.

A partir destas observações concluiu-se que a faixa de constância da curva, após a pequena queda da corrente na concentração de 0,5 g/l, era a que representava o modo jato-cônico, pois somente nesta fase era possível a visualização da forma cônica do capilar.

As condições de operação utilizadas foram determinadas a partir dos gráficos e observações descritas e estão apresentadas na Tabela I.2.

Tabela I.2 – Tensões aplicadas para as diversas concentrações de NaCl.

<b>Concentrações (g/l)</b>	<b>Tensão (kV)</b>
0,5	2,8
1,0	2,6
1,5	2,4
2,0	2,14
2,5	2,15
3,0	2,14
3,5	2,15
4,0	2,16
4,5	2,15
5,0	2,09

## APÊNDICE J

### **J Calibração do gerador utilizando o capilar de 25 mm de diâmetro**

Inicialmente, a calibração do gerador foi realizada para um capilar com diâmetro de 25  $\mu\text{m}$ . Os procedimentos e resultados obtidos são relatados neste capítulo.

Soluções com concentrações iguais a 0,1, 0,5, 1,0 e 2,5 g/l foram escolhidas para a operação do gerador de partículas, devido a uma limitação do equipamento que possui capilares muito vulneráveis ao entupimento. Mesmo a solução de 2,5 g/l apresentou forte tendência a causar o entupimento dos capilares, sendo o tempo de vida do capilar menor, quando trabalhando com soluções com esta concentração. Cabe ainda ressaltar que, mesmo para soluções com baixa concentração, a vida útil dos capilares é baixa, não sendo maior do que 30 horas de operação.

Com a finalidade de desentupir os capilares, foram utilizadas algumas técnicas, como: utilização de solução básica de KOH com concentração de 0,1 M, jato de ar em contracorrente, ultrassom e aquecimento, porém nenhuma obteve resultado satisfatório. A tendência ao entupimento dos capilares é a grande limitação deste equipamento, uma vez que podem ser considerados como, praticamente, descartáveis, além do custo de cada unidade ser elevado, fazendo com que os experimentos se tornem onerosos e dependentes da importação de novas unidades.

Não foi possível realizar a calibração para a solução com 0,1 g/l de NaCl, por estarem inutilizados, devido ao entupimento, todos os capilares fornecidos na compra do equipamento.

As partículas coletadas para as concentrações de 0,5, 1,0 e 2,5 g/l foram analisadas no MET e são apresentadas nas Figura J.1 a Figura J.8. Pôde ser notada uma quantidade considerável de partículas depositadas quando se observa a fotografia com menor aumento, 13 mil vezes. Porém, nas fotografias de maior aumento pode-se observar melhor o formato das partículas e obter maior precisão na determinação do diâmetro, uma vez que a barra de calibração possui tamanho mais próximo ao diâmetro das partículas.

As primeiras partículas observadas foram aquelas obtidas na concentração da solução igual a 1,0 g/l. Uma vez que foi possível a visualização das mesmas, foram reproduzidos os aumentos das fotografias mencionadas para as demais concentrações. Contudo, para aquela de 0,5 g/l, não foi possível visualizar nenhuma partícula para um aumento de 13 k, por gerar um pequeno aumento frente ao tamanho das partículas.

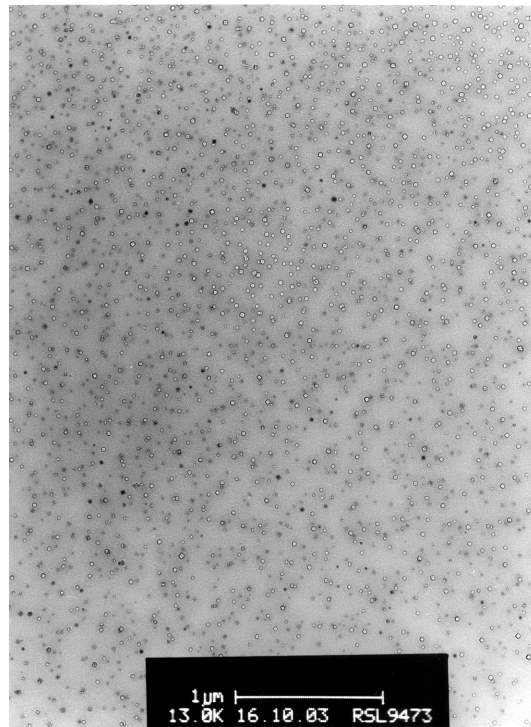


Figura J.1 – Partículas de NaCl geradas com solução igual a 2,5 g/l e aumento igual a 13k.

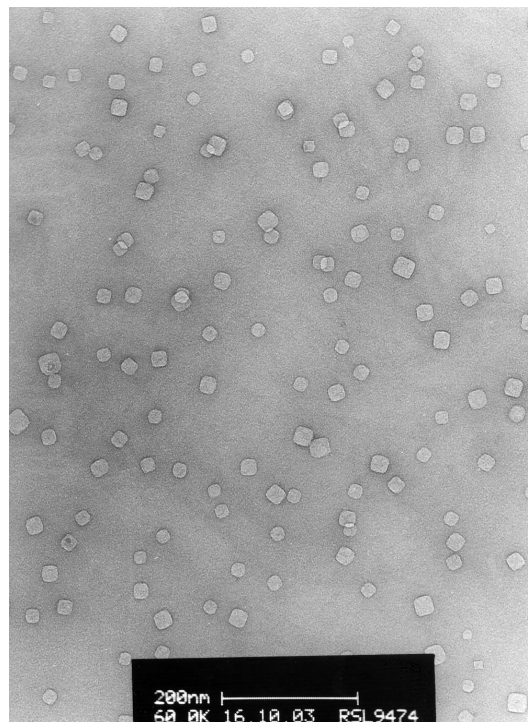


Figura J.2 – Partículas de NaCl geradas com solução de 2,5 g/l e aumento igual a 60k.



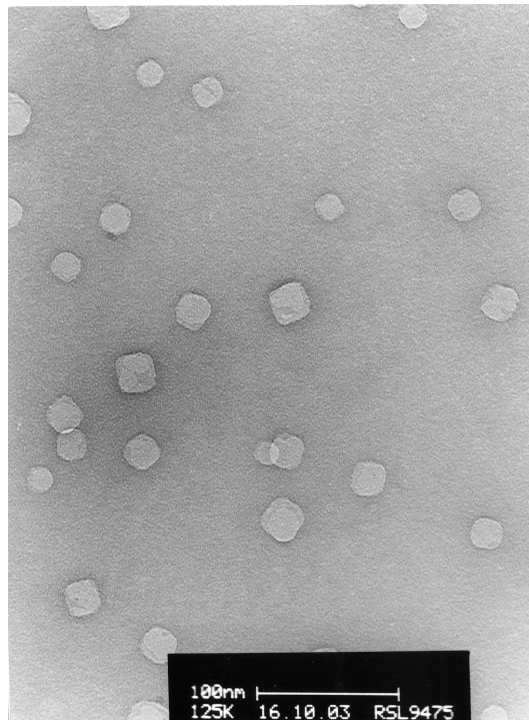


Figura J.3 – Partículas de NaCl geradas com solução de 2,5 g/l e aumento igual a 125k.



Figura J.4 – Partículas de NaCl geradas com solução de 1 g/l e aumento igual a 13k.

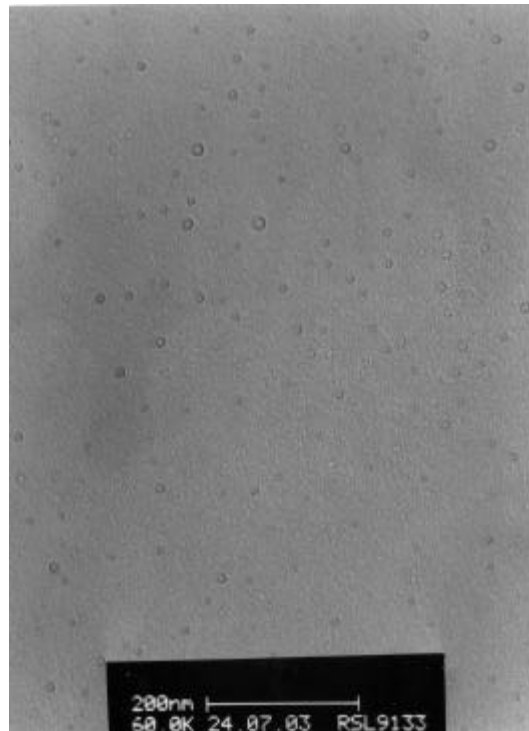


Figura J.5 – Partículas de NaCl geradas com solução de 1 g/l e aumento igual a 60k.

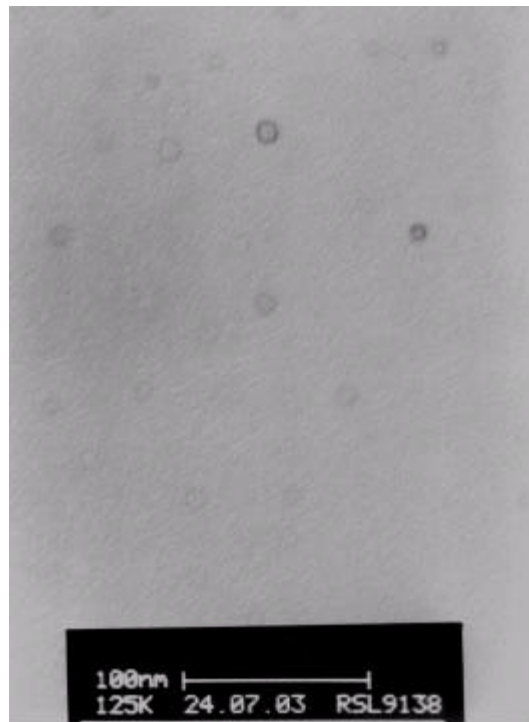


Figura J.6 – Partículas de NaCl geradas com solução de 1 g/l e aumento igual a 125k.

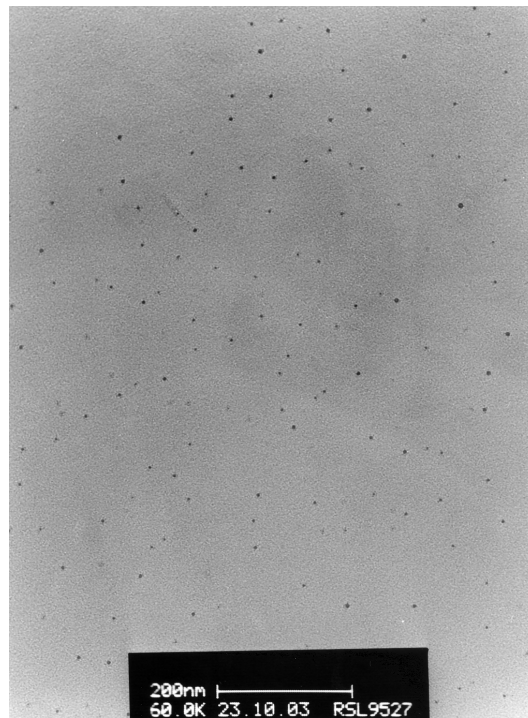


Figura J.7 – Partículas de NaCl geradas com solução de 0,5 g/l e aumento igual a 60k.

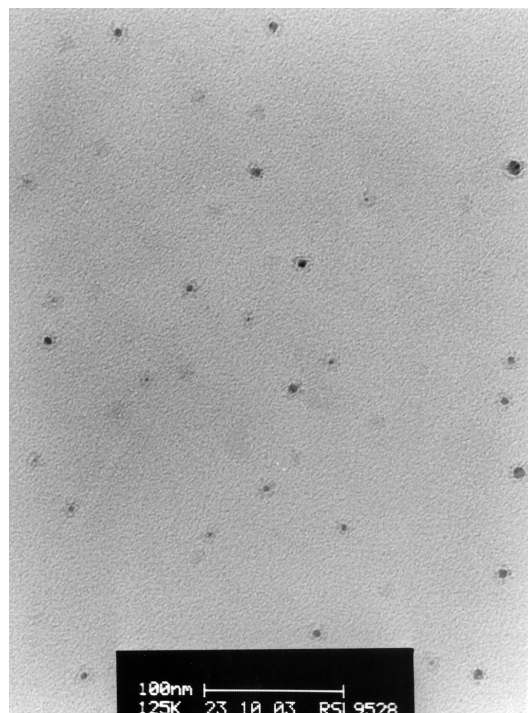


Figura J.8 – Partículas de NaCl geradas com solução de 0,5 g/l e aumento igual a 125k.

Para as condições de maior aumento, Figura J.6 e Figura J.8, a qualidade das fotografias não foi boa, estando a imagem um pouco desfocada. Contudo, elas são interessantes, por permitir uma melhor visualização do formato das partículas. Para estas concentrações, as partículas são aparentemente esféricas, enquanto que, para a concentração de 2,5 g/l, elas já apresentam um formato cúbico, condizente com a estrutura do cloreto de sódio. A melhor condição para análise foi obtida para o aumento intermediário, pois a qualidade da fotografia foi boa e a quantidade de partículas coletadas maior que para a condição de 125 k.

As microanálises para as concentrações utilizadas estão apresentadas nas Figura J.9 a Figura J.12. Não foi possível obter a microanálise para a concentração igual 0,5 g/l, devido à baixa concentração de partículas, na grade de coleta, para esta condição.

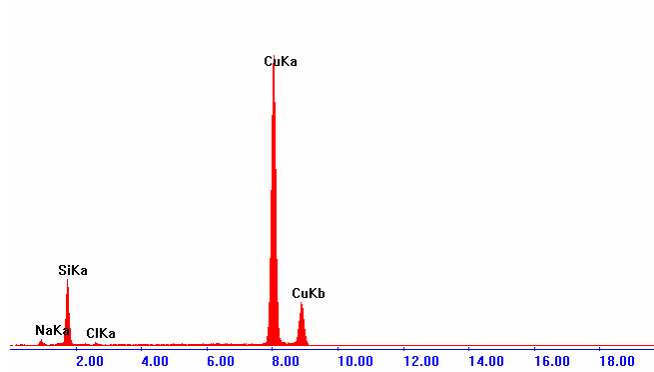


Figura J.9 – Microanálise para a amostra com concentração igual a 2,5 g/l.

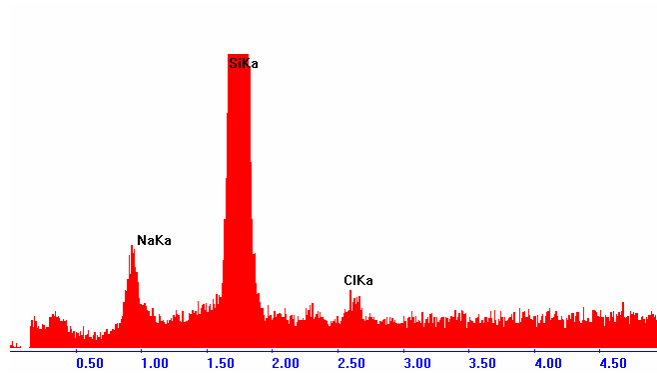


Figura J.10 – Aumento dos picos obtidos durante a microanálise da amostra com concentração igual a 2,5 g/l.

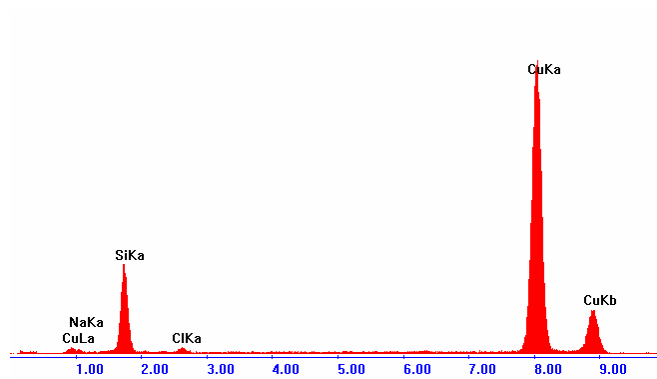


Figura J.11 – Microanálise para a amostra com concentração igual a 1,0 g/l.

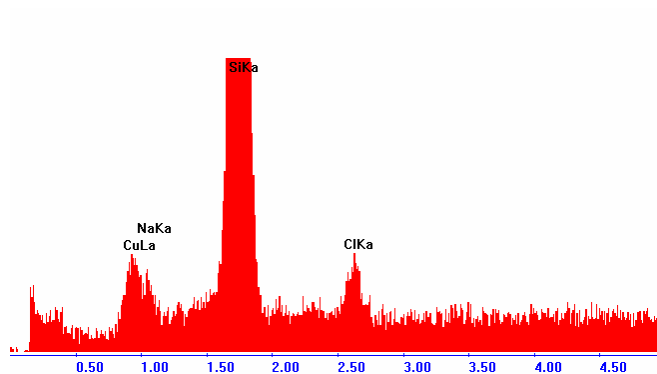


Figura J.12 – Aumento dos picos obtidos durante a microanálise da amostra com concentração igual a 1,0 g/l.

A Figura J.13 obtida para a concentração de 2,5 g/l, apresenta um tipo de contaminação, que pode ser identificada pelo tamanho e forma muito diferentes das demais.

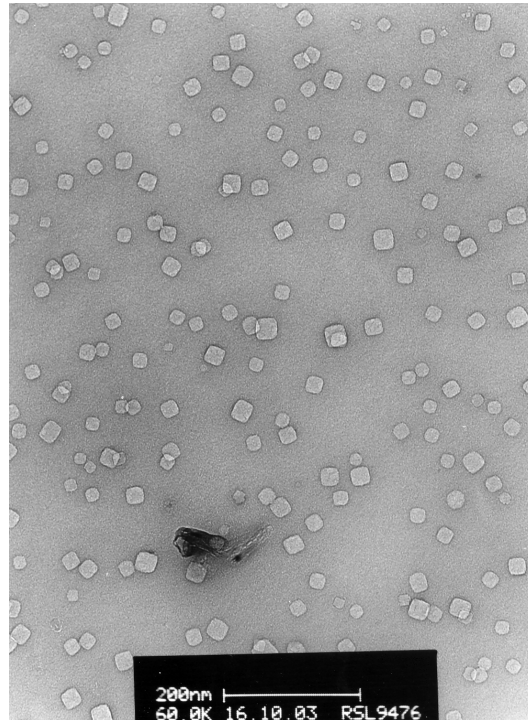


Figura J.13 – Contaminação presente no porta amostra.

Esta figura apresenta a fotografia de uma região contaminada da amostra, que pode ter interferido nas microanálises, como mencionado por Williams e Carter (1996), pois, muitas vezes, o equipamento apresenta limitações e detecta raios X emitidos por regiões que não aquelas selecionadas para análise. Uma forma de evitar esta imprecisão seria fazer uma nanodifração, técnica capaz de realizar a análise em regiões de até 10 nm, de forma que fosse analisada apenas uma partícula do sal, isto minimizaria erro de interferência de outras regiões da

grade. Contudo, não foi possível empregar esta técnica, pois o operador do equipamento não a dominava.

A determinação do diâmetro das partículas foi obtido através da análise das imagens, utilizando-se o software Image Pro-Plus. A partir dele, foi possível contar o número de partículas e determinar o diâmetro médio para cada uma delas. A partir da análise, foi determinado que o diâmetro mediano das partículas é de 12,7, 9,4 e 8,5 nm para as tensões aplicadas de 13, 60 e 125 kV, respectivamente. Pode-se observar que a diferença entre os diâmetros é menor, para os maiores aumentos, e um pouco maior para o menor aumento, confirmando que o erro da barra de calibração é significativo. Assumiu-se, a partir destes resultados, que o diâmetro, para a concentração da solução de 1,0 g/l, é igual a 9 nm.

Após realizar a análise para a condição de 1,0 g/l e observar que a condição de menor aumento apresenta um desvio maior que os outros aumentos, esta condição foi desprezada. Os resultados das outras duas condições para a concentração de 2,5 g/l foram de 26,03 e 25,87 nm, podendo ser afirmado que, para esta concentração, o diâmetro das partículas é igual a 26 nm.

Já para a condição cuja concentração é igual a 0,5 g/l, a diferença entre os diâmetros, determinados a partir das figuras com aumento de 60 e de 125k, foram bem grandes, obtendo-se diâmetros de 5,45 e 2,48 nm, respectivamente. Nesta condição, o diâmetro das partículas pode estar incorrendo em grande erro para o aumento menor, por estar a fotografia fora de foco, uma vez que o equipamento estava operando na sua capacidade máxima, o que dificultou a determinação da limitação de cada partícula, e influenciou, conseqüentemente, no diâmetro medido, além disso, o número de partículas avaliadas não foi muito grande. Com

base neste raciocínio, pode ser considerado o diâmetro das partículas, para esta condição, como de, aproximadamente, 5,5 nm.

A partir desta calibração, comprovou-se que os capilares de 25  $\mu\text{m}$  apresentavam grande tendência ao entupimento, o que limita a quantidade de experimentos que podem ser realizados, além de encarecer os ensaios, pois seria necessária a compra de muitas unidades. Desse modo, optou-se pela compra de um capilar maior, que apresentaria maior tempo de vida útil. O capilar escolhido foi o que possuía diâmetro de 40  $\mu\text{m}$ , o maior fornecido pela empresa, sendo necessária a realização de uma nova calibração.

Novos ensaios foram realizados para o maior capilar utilizando soluções de cloreto de sódios com concentrações iguais a 0,5, 1,0, 1,5 e 5,0 g/l. Os resultados podem ser observados na Figura J.14 a Figura J.16, com exceção da maior concentração apresentada previamente no capítulo Resultados e Discussões.

As fotografias mostradas apresentaram baixa quantidade de partículas e uma resolução um tanto sofrida. Isto pode ter ocorrido devido ao fato de não haver grande quantidade de partículas depositadas nas grades e ao MET apresentar certa dificuldade em ajustar o foco. Estes resultados podem ser comparados com os obtidos para os capilares de 25  $\mu\text{m}$ , cuja quantidade de partículas depositadas foi maior que para o capilar atual. Entretanto, a vazão de ar empregada era menor que a metade da utilizada com o capilar de 40  $\mu\text{m}$  e a saída colocada bem mais próxima, sem haver problemas de operação por estrangulamento da saída de ar.





Figura J.14 – Partículas obtidas com a solução salina de concentração igual a 0,5 g/l.

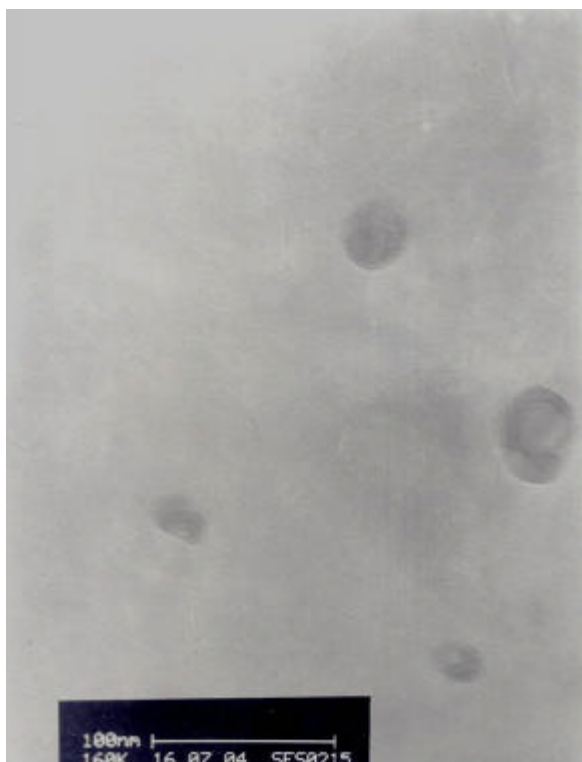


Figura J.15 – Partículas obtidas com a solução salina de concentração igual a 1,0 g/l.



Figura J.16 – Partículas obtidas com a solução salina de concentração igual a 1,5 g/l.

A quantidade de partículas obtidas para a condição atual foi razoavelmente próxima a depositada por Bang e Murr (2002) em um porta-amostra de MET. A comparação foi feita visualmente e para um pequeno aumento, pois os autores citados focaram apenas um pequeno aglomerado para cada foto com maior diâmetro.

Para comprovar que as partículas coletadas eram mesmo as partículas geradas e não possíveis contaminantes presentes no ar, foram realizadas microanálises através do MET. Os resultados para as concentrações de 0,5 a 1,5g/l estão apresentados nas Figura J.17 a Figura J.19.

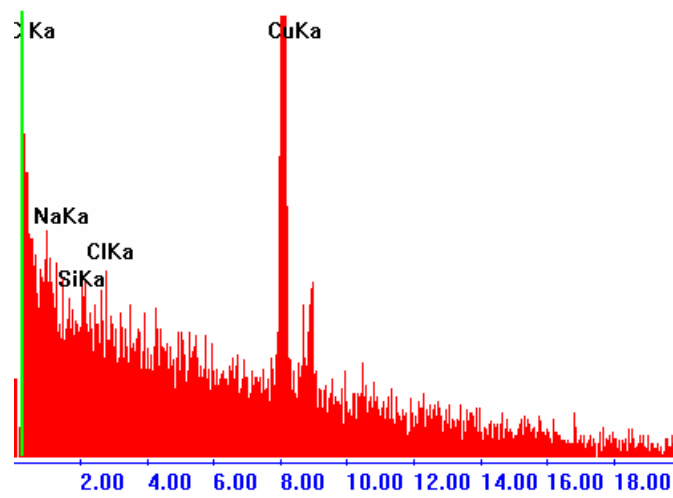


Figura J.17 - Microanálise para a amostra com concentração igual a 0,5 g/l.

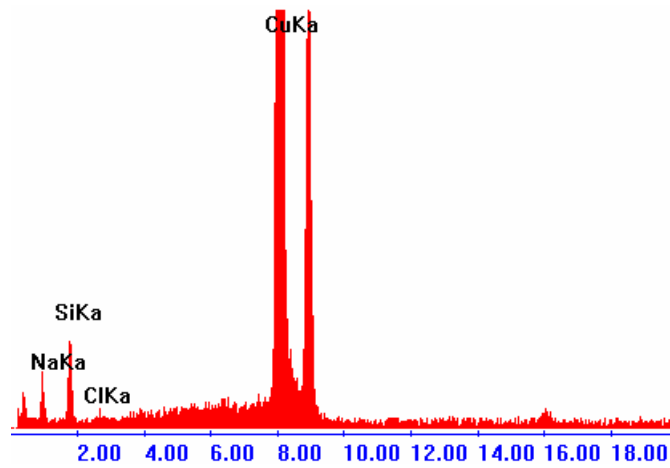


Figura J.18 - Microanálise para a amostra com concentração igual a 1,0 g/l.

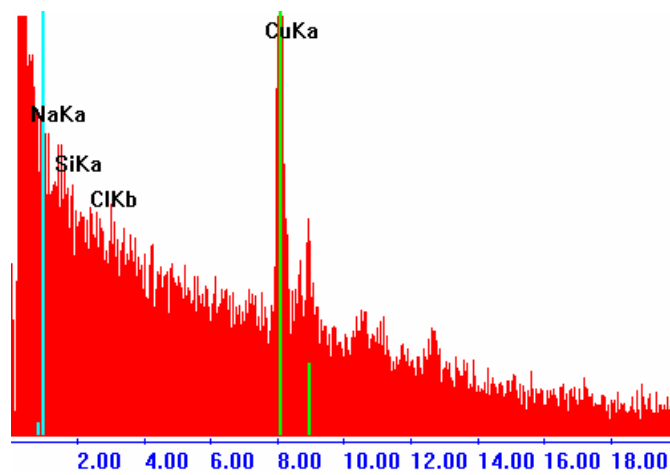


Figura J.19 - Microanálise para a amostra com concentração igual a 1,5 g/l.

Pode ser observado nas figuras que existem picos contendo Na e Cl que são visualizados pelas demarcações nas figuras relacionadas. Nestas, eles são grafados como NaKa, ClKa e ClKb, que representam o elemento químico e o tipo de raio X emitido, ou seja, o tipo K alfa ou beta.

Quando a quantidade de material depositado na grade é pouca, Williams e Carter (1996) afirmam que deve ser feita a análise na escala dos ruídos, ou seja, diminuir a escala para que se possa visualizar melhor os picos com baixa concentração. Segundo os autores, os picos não são confundidos com o ruído porque eles aumentam com o tempo, enquanto os últimos permanecem constantes. Esta sugestão foi aceita neste trabalho, mas não foi possível realizar a análise até que os picos se destacassem mais, porque o material se degrada com a exposição aos feixes de elétrons.

Os picos com maior intensidade que os de Na e Cl, são os picos de emissão de cobre referentes aos raios K alfa e beta, de carbono e de silício. O primeiro aparece em grande quantidade, devido a ser este o material que compõe a grade de coleta. O pico de carbono, localizado na extremidade esquerda das figuras, próximo ao sódio, ocorreu devido à tentativa de fixar a grade no suporte de amostragem com uma resina à base de carbono, material que pode ser inserido no MET sem danificá-lo. O último pico mencionado, o de silício, ocorre, provavelmente, devido à contaminação da grade com impurezas do ar, que podem ser depositadas durante a coleta das partículas, durante o manuseio das amostras ou talvez até por uma ineficiência dos filtros de ar que precedem o equipamento. Está hipótese é reforçada pela Figura J.13, que contém contaminação, e que pode

ser identificada pelo tamanho e forma muito diferente das demais, corroborando esta idéia.

A concentração igual a 5,0 g/l (Figura 4.51) favoreceu a formação de partículas maiores que possibilitaram melhores condições para a realização da microanálise. Nesta figura os picos são nítidos e bem maiores que os outros, pois foi possível focar diretamente na partícula evitando os efeitos externos.

Uma vez que as fotos das partículas apresentavam formatos próximos ao esférico, para as menores concentrações, e formato quadrado, para a maior concentração, optou-se por quantificar a esfericidade das mesmas. De acordo com Wadell (1933) apud Clift et al. (1978), a esfericidade da partícula é determinada a partir da área superficial de uma esfera de mesmo volume. Uma vez que as imagens obtidas com o MET são bidimensionais, não é possível saber o volume das partículas. Nestes casos, o autor sugere o uso do grau de circunfericidade, definido como a razão entre o perímetro de uma esfera com a mesma área projetada da partícula e o perímetro da partícula propriamente dita. Este parâmetro foi calculado para as partículas analisadas, através do analisador de imagens Image Pro-Plus, sendo seu valor igual a 1, para as concentrações iguais a 0,5, 1,0 e 1,5 g/l, ou seja, partículas esféricas, enquanto, para a concentração de 5,0 g/l, ele resultou, em um número um pouco inferior, igual a 0,95. Os valores do parâmetro de circunfericidade para a esfera e para o cubo são respectivamente, 1 e 0,89, sendo o desvio máximo entre estes valores e os experimentais de 6,7%, para a maior concentração. Visualmente, as partículas para as concentrações mais baixas são aparentemente esféricas e, para a concentração maior, cúbicas. Concluiu-se, então, que as partículas são esféricas para as concentrações menores e, com o

aumento da concentração, vão perdendo esta forma e adquirindo a cúbica, a forma dos cristais de cloreto de sódio comumente encontrada na natureza, mais especificamente, segundo Flint (1966), cúbica de face centrada.

A formação de um cristal, segundo Bermingham et al. (2002), está associada à supersaturação da solução, pois, nesta condição, é possível transpor a resistência da tensão do líquido e formar a primeira partícula insolúvel. A supersaturação pode ocorrer pela variação da concentração do soluto, temperatura ou pressão. Uma das formas de alterar a concentração da solução é através da evaporação do solvente, método empregado no gerador utilizado. Este gerador também adota a técnica de atomização da solução, a que produz os menores cristais.

A forma do cristal, de acordo com os autores, está associada à fase de nucleação do mesmo, ou seja, formação da primeira partícula insolúvel e à sua fase de crescimento, que podem ser alteradas, em função das condições de supersaturação, de interação entre o solvente e o cristal, do solvente utilizado, entre outras. O cristal será mais isométrico quanto menor a sua saturação e os menores, ou em fase inicial de crescimento, tendem a adquirir formas que minimizem a energia na superfície do mesmo.

Com base nestes relatos, concluiu-se que é possível que os cristais de NaCl gerados possuam formas diferentes e que isto deve ter ocorrido em função da diferença de concentração da solução inicial, que pode ter criado condições diferentes de supersaturação, com a evaporação da água contida na gota. Outro fator interessante é que os cristais, em fase inicial de crescimento, tendem a adquirir formas mais isométricas e de menor energia, o que pode ter levado os

cristais menores a não crescerem, em função da pequena quantidade de massa contida na gota, e adotarem a forma esférica. A Figura J.20 apresenta cristais de NaCl, com formas diferentes, obtidas em diferentes processos, e, entre elas, pode ser observada a forma esférica e a quadrada, próximas às encontradas nas análises com MET.

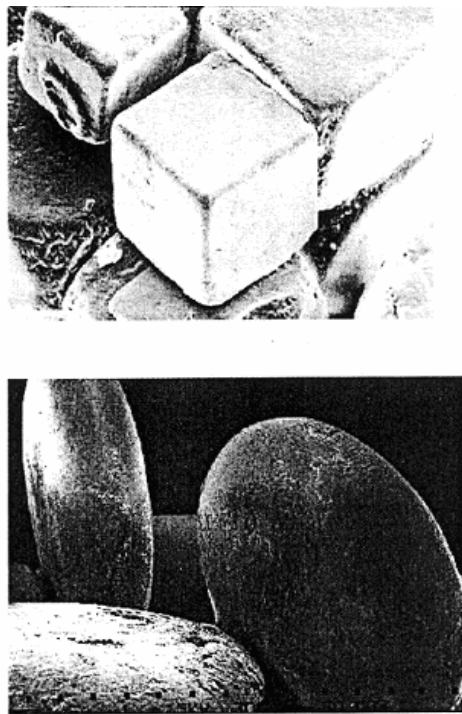


Figura J.20 – Várias formas do cristal de cloreto de sódio (Bermingham et al., 2002).

Chen et al. (1995) também determinaram o tamanho das partículas gerados com o emprego do Electro Spray Aerosol Generator, utilizando um sistema composto por um analisador, cujo princípio é a mobilidade elétrica da partícula (DMA, TSI, modelo 3071) e contador do tipo condensador como o empregado neste estudo (UCPC, TSI, modelo 3025). As condições, porém foram bem diferentes. Os autores trabalharam com uma solução de sacarose em 0,1% em

massa e condutividade de 299 e 1077  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e com um capilar com diâmetro muito maior que o utilizado neste estudo, igual a 81  $\mu\text{m}$ . Os autores obtiveram um diâmetro igual a 28 e 16 nm para as respectivas condições, quando operando no modo jato-cônico, mostrando a influência da condutividade da solução no tamanho do diâmetro obtido. Observaram, ainda, que os diâmetros tenderam a uma elevação com a alteração do tipo de jato com que a solução deixava o capilar.

A solução de cloreto de sódio que possui condutividade mais próxima da utilizada no estudo citado é aquela com concentração igual a 0,5 g/l (que possui metade da concentração utilizada no referido artigo), com a qual foi possível gerar uma partícula com diâmetro igual a 5,5 nm, três vezes menor que o obtido pelos autores mencionados, cujo capilar era aproximadamente três vezes maior que o utilizado neste experimento.



## APÊNDICE L

### **L Obtenção dos valores das condições elétricas de operação**

Para que a comparação entre os diferentes precipitadores seja real, estes precisam apresentar a mesma condição elétrica de operação. Optou-se, tendo como base estudos de Falaguasta (2001), por manter constante a densidade de corrente. Os valores empregados foram definidos a partir das curvas de corrente-tensão e dos valores de eficiência obtidos com o precipitador mais largo, o qual apresenta os menores valores de corrente para uma mesma tensão. Como pode ser observado na Figura L.1, a eficiência foi elevada mesmo para tensões mais baixas, que geram pequenas correntes. Assim, foram utilizados baixos valores de corrente e, conseqüentemente, de densidade, para potencializar a diferença entre os precipitadores e facilitar a comparação entre eles.

A Figura L.1 apresenta o gráfico da eficiência obtida com o precipitador mais largo para diferentes tensões, a partir da qual foram definidos os valores de densidade de corrente iguais a 1,8, 2,8 e 3,8 mA/m<sup>2</sup>, que satisfazem os três precipitadores e não acarretam elevada eficiência.

As densidades de corrente apresentadas requerem correntes diferentes para o precipitador mais curto e para os mais compridos, pois dependem da área de coleta de cada precipitador, a qual é a mesma para os precipitadores com  $L_{ne} = 0,30$  m. As correntes necessárias para atingir tais densidades de corrente são apresentadas na Tabela L.1.

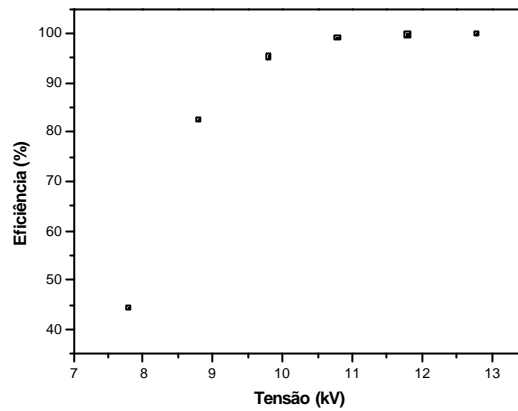


Figura L.1 – Eficiência em função da tensão aplicada, obtida com o emprego do precipitador mais largo.

Tabela L.1 – Valores de corrente elétrica em mA para os precipitadores com 0,15 e 0,30 m de comprimento.

<b>Precipitador com <math>L_{ne} = 0,15</math> m</b>	<b>Precipitador com <math>L_{ne} = 0,30</math> m</b>
0,05	0,11
0,08	0,17
0,11	0,23

Estes valores requerem uma precisão de duas casas decimais, entretanto, a fonte empregada possuía apenas uma casa decimal. Para poder obter os valores de tensão que correspondessem aos valores apresentados, foi ajustada uma curva na qual se representam os pares corrente-tensão obtidos, para os precipitadores mais compridos, pois os valores estavam dentro da faixa medida pela fonte, ou seja, acima de 0,1 mA. A Figura L.2 a Figura L.7 apresentam os gráficos com as curvas obtidas, as quais possuem coeficiente de correlação acima de 0,99.

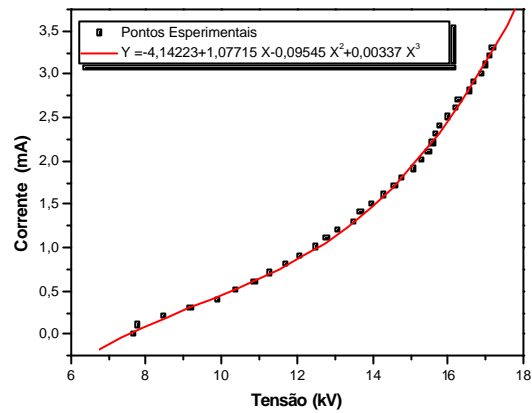


Figura L.2– Equação de correlação entre os valores de corrente e tensão para o precipitador com  $2s = 0,04$  m e  $s/2c = 0,25$ .

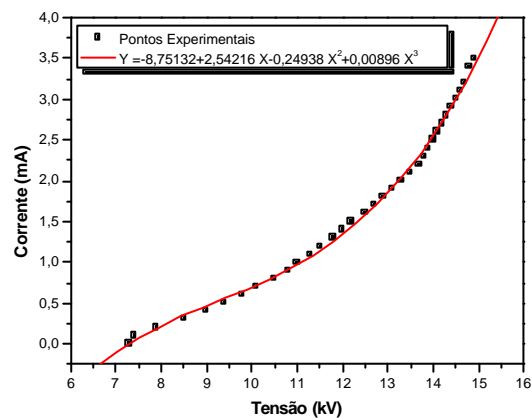


Figura L.3– Equação de correlação entre os valores de corrente e tensão para o precipitador com  $2s = 0,04$  m e  $s/2c = 0,50$ .

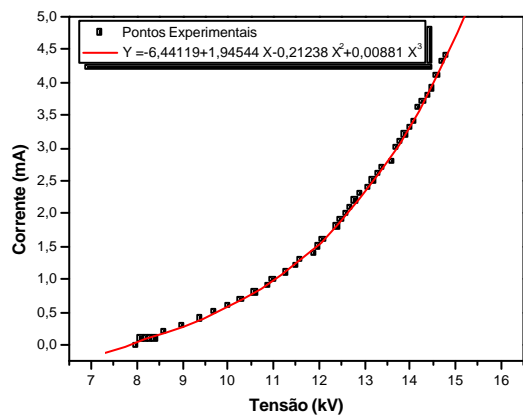


Figura L.4 – Equação de correlação entre os valores de corrente e tensão para o precipitador com  $2s = 0,04$  m e  $s/2c = 1,0$ .

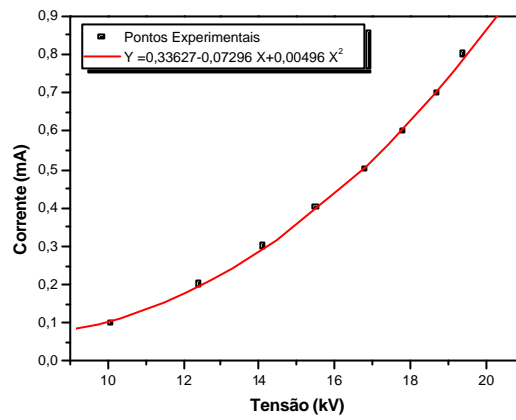


Figura L.5– Equação de correlação entre os valores de corrente e tensão para o precipitador com  $2s = 0,06$  m e  $s/2c = 0,25$ .

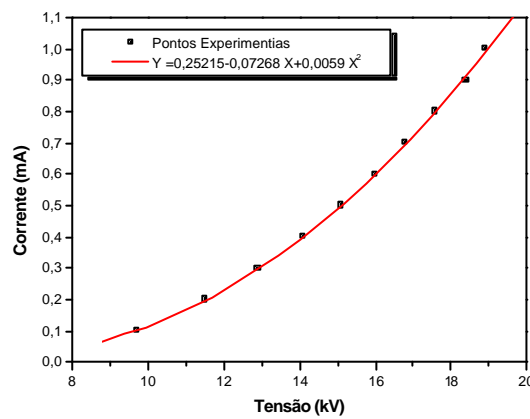


Figura L.6– Equação de correlação entre os valores de corrente e tensão para o precipitador com  $2s = 0,06$  m e  $s/2c = 0,50$ .

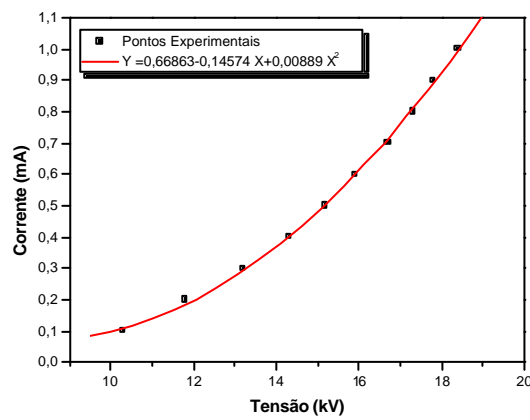


Figura L.7 – Equação de correlação entre os valores de corrente e tensão para o precipitador com  $2s = 0,06$  m e  $s/2c = 0,25$ .

A partir das equações, foram obtidos os valores de tensão a serem mantidos constantes, que correspondem a cada uma das correntes fixadas. Estes valores, apresentados na Tabela L.2, variam com a relação  $s/2c$ , devido à sua influência no campo elétrico formado.

Tabela L.2 – Valores de tensão em kV correspondentes as correntes mencionadas para os precipitadores maiores e com largura de 0,04 e 0,06 m.

$s/2c$	Precipitador com $2s = 0,04 \text{ m}$	Precipitador com $2s = 0,06 \text{ m}$
0,25	8,1	10,3
	8,4	11,9
	8,7	13,1
0,50	7,6	9,9
	7,8	11,1
	8,1	12,0
1,00	8,3	10,3
	8,5	11,6
	8,8	12,4

Para o precipitador menor, a faixa de corrente necessária estava abaixo do limite da fonte (0,1 mA) e, visando diminuir provável erro, utilizou-se uma fonte mais precisa, com duas casas decimais, para calibrar a fonte empregada neste estudo e obter os valores de tensão necessários. As novas curvas de corrente-tensão, geradas com a nova fonte Spellman, modelo 300, são apresentadas na Figura L.8 a Figura L.10.

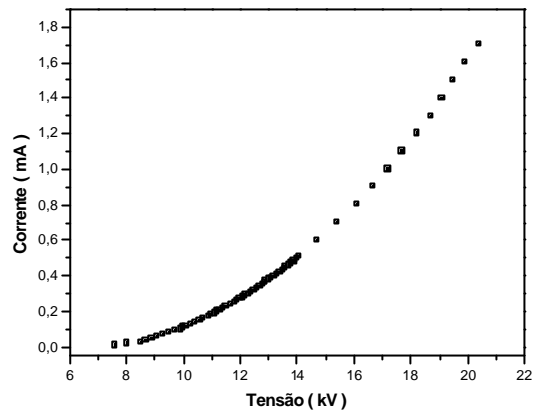


Figura L.8– Valores de corrente e tensão para  $s/2c = 0,25$ .

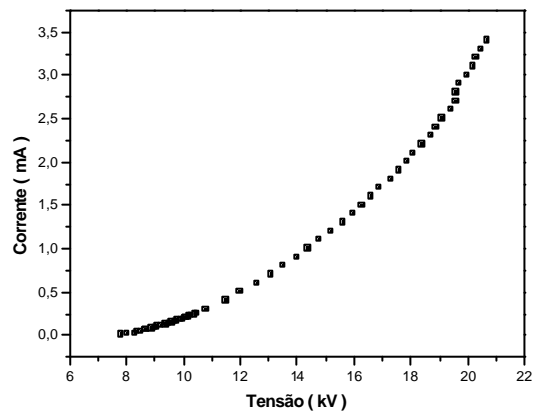


Figura L.9 – Valores de corrente e tensão para  $s/2c = 0,50$ .

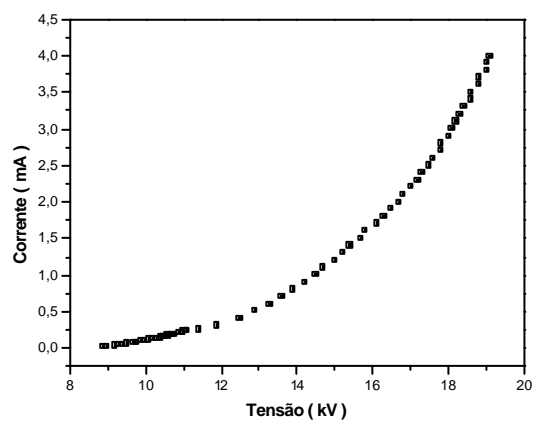


Figura L.10 – Valores de corrente e tensão para  $s/2c = 1,00$ .

Após ter sido determinada a tensão que correspondia à corrente estabelecida na Tabela L.2, para a fonte mais precisa, foi construída uma curva de calibração, relacionando a fonte com duas casas decimais à fonte deste estudo, obtendo-se assim, os pontos a serem utilizados nos ensaios. As curvas de calibração para cada relação  $s/2c$  são mostradas nas Figura L.11 a Figura L.13.

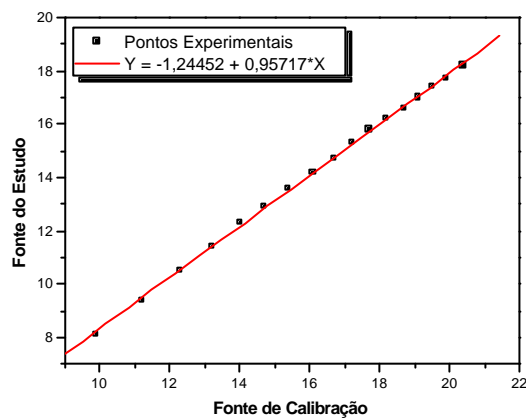


Figura L.11 – Calibração da fonte para  $s/2c = 0,25$ .

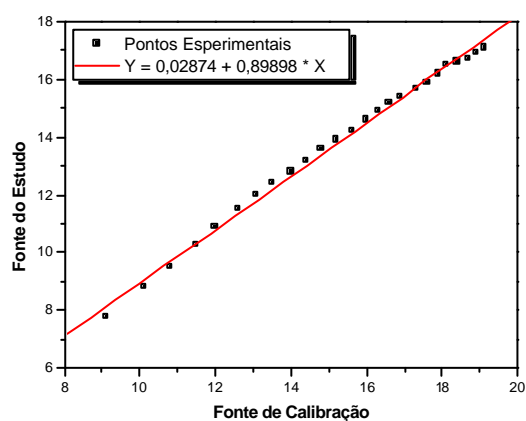


Figura L.12 – Calibração da fonte para  $s/2c = 0,50$ .

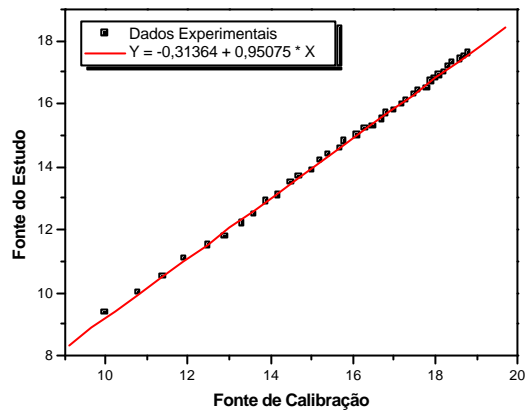


Figura L.13 – Calibração da fonte para  $s/2c = 1,00$ .

Nesta condição, o ajuste linear proporcionou elevados coeficientes de correlação, acima de 0,99. A partir destas restas, calculou-se a tensão necessária na fonte de estudo, para o precipitador mais curto, cujos valores estão apresentados Tabela L.3.

Tabela L.3 – Valores de tensão em kV correspondentes às correntes mencionadas para o precipitador com comprimento igual a 0,15 m.

$s/2c$	Precipitador com $2s = 0,04$ m
0,25	7,3
	7,8
	8,3
0,50	7,7
	8,0
	8,3
1,00	8,7
	9,0
	9,3



## APÊNDICE M

### M Avaliação do desempenho do gerador

Para a geração de partículas o mais monodispersas possível, empregando o Electro Spray Generator, é importante que se mantenha o formato do jato que deixa o capilar, na forma cônica. Para isso observou-se, que a vazão de ar e CO<sub>2</sub> utilizadas, deveriam ser, respectivamente, 2,0 e 0,3 l/min. Como a vazão de CO<sub>2</sub> variava ligeiramente com o tempo, avaliou-se a sua interferência na geração de partículas e foi observado que a quantidade de partículas geradas cai pela metade quando a vazão dobra, como pode ser visualizado na Figura M.1 e Figura M.2.

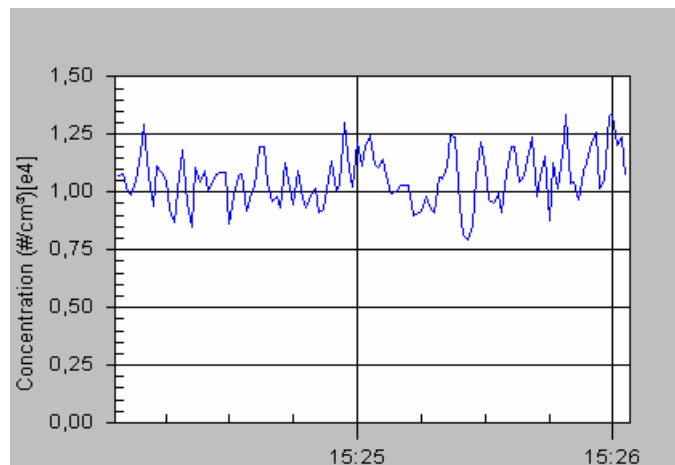


Figura M.1 – Vazão de 0,1 l/min com concentração média igual a  $1,06 \cdot 10^4 \text{ #/cm}^3$ .

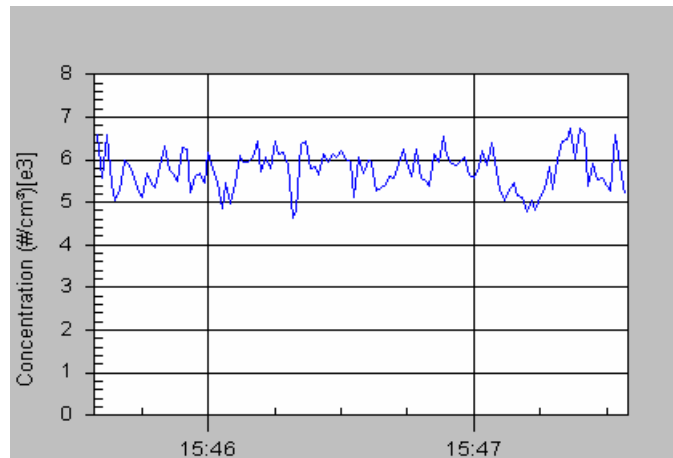


Figura M.2 – Vazão de 0,2 l/min com concentração média igual a  $5,76 \cdot 10^3 \text{ #/cm}^3$ .

Durante estes ensaios, constatou-se que, com o tempo, havia formação de acúmulos nas laterais do capilar, o que causava alterações na concentração de partículas, diminuindo o número das mesmas até que os aglomerados eram arrastados e dispersos na corrente, aumentando novamente a concentração. A formação era mais freqüente para a vazão de  $\text{CO}_2$  mais alta e para a solução de cloreto de sódio mais concentrada. Contudo, este fenômeno não acontecia em todos os capilares, apenas alguns apresentavam acúmulo de partículas, provavelmente, por imperfeições na ponta que favoreciam o depósito de material. A Figura M.3 a Figura M.5 apresentam o efeito do acúmulo para a vazão de gás carbônico igual a 0,3 l/min, através da qual pode ser notado que o efeito era rápido e ocorria, em alguns casos, com freqüência.

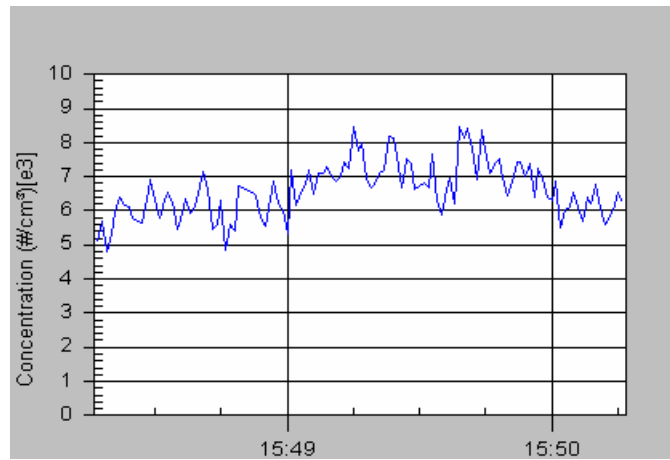


Figura M.3 - Efeito do acúmulo de sal para os primeiros 2 min.

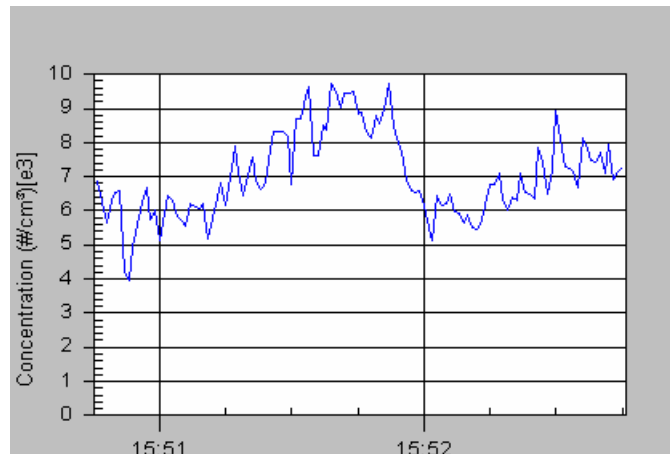


Figura M.4 - Efeito do acúmulo de sal após 2 min.

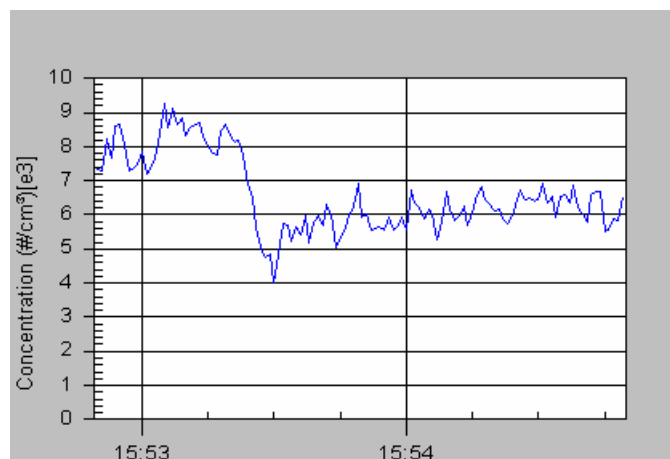


Figura M.5 - Efeito do acúmulo de sal após 4 min.

Quando não havia a formação de acúmulo de sal no capilar, a concentração se mantinha praticamente constante entre uma amostragem e outra, como pode ser notado na Figura M.6 a Figura M.8. Este resultado é extremamente importante, pois aumenta a confiabilidade nos dados obtidos, uma vez que havia apenas um contador e não era possível fazer a amostragem simultaneamente na entrada e na saída.

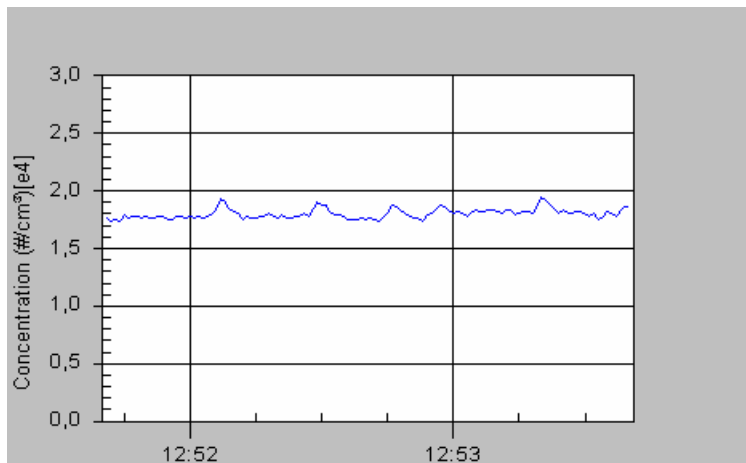


Figura M.6 - Ensaio sem acúmulo (concentração igual a  $1,80 \cdot 10^4 \#/\text{cm}^3$ ).

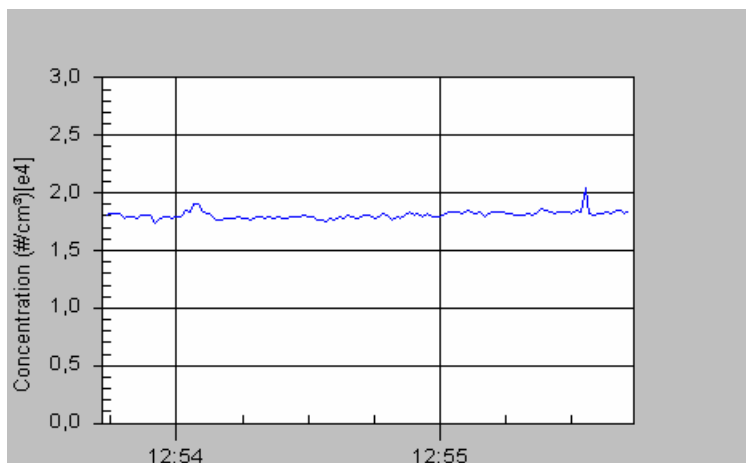


Figura M.7 - Ensaio sem acúmulo (concentração igual a  $1,81 \cdot 10^4 \#/\text{cm}^3$ ).

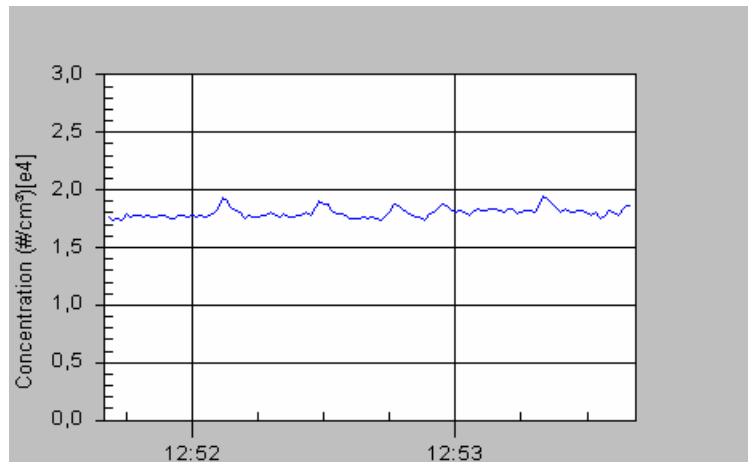


Figura M.8 - Ensaio sem acúmulo (concentração igual a  $1,81 \cdot 10^4 \text{ #/cm}^3$ ).

A determinação do número de partículas geradas para cada uma das concentrações da solução salina está apresentada na Figura M.9 a Figura M.11. Os valores medidos são inferiores ao fornecido pelo manual do equipamento e igual a  $10^7 \text{ #/cm}^3$ . Como explicação para tal fato, creditou-se a diferença à fonte radioativa, uma vez que os dados foram obtidos quando a mesma já havia perdido grande parte de sua energia, estando fora do prazo de validade. A baixa concentração poderia ser justificada pelo efeito Rayleigh, apresentado no Apêndice C, de forma que parte das partículas geradas possuiria diâmetro menor que 10 nm, tamanho menor que o limite de detecção do contador CPC 3007.

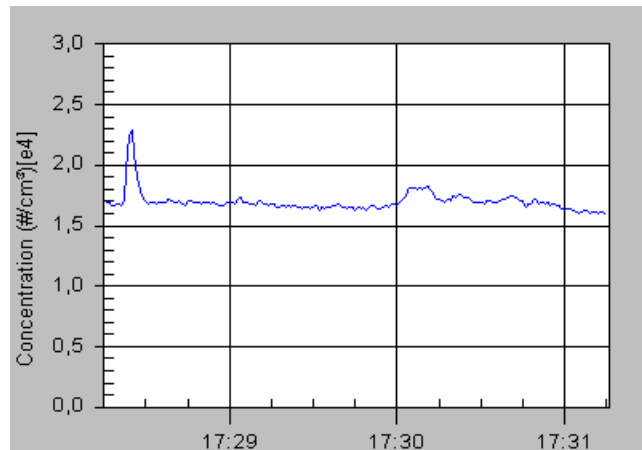


Figura M.9 - Concentração de sal igual 0,5 g/l e concentração de partículas igual a  $1,70 \cdot 10^4 \text{#/cm}^3$ .

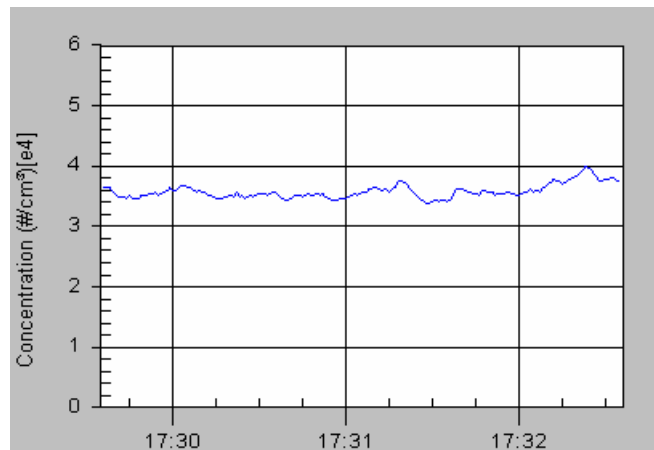


Figura M.10 - Concentração de sal igual 1,0 g/l e concentração de partículas igual a  $3,58 \cdot 10^4 \text{#/cm}^3$ .

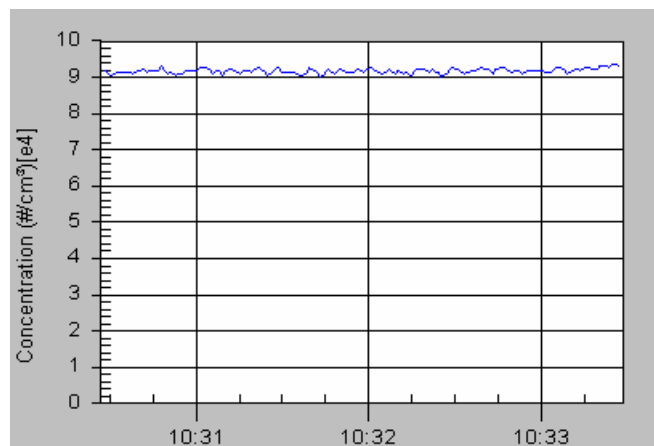


Figura M.11 - Concentração de sal igual 1,5 g/l e concentração de partículas igual a  $9,17 \cdot 10^4 \text{#/cm}^3$ .

Para comprovar se o efeito era mesmo da fonte, seria necessária a obtenção de uma nova fonte. Contudo, a importação de produtos é demorada, sendo mais difícil quando se trata de material radioativo que necessita aprovação da CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear). Isto inviabilizou a importação de uma nova fonte, uma vez que, caso fosse permitida sua entrada no país, poderia estar com o prazo de validade à beira do vencimento, até a obtenção de uma licença junto a CNEN, já que o tempo de meia-vida da fonte de Polônio recomendada pela TSI, fabricante do gerador é curto.

Para solucionar tal problema, houve a colaboração do IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), que nos cedeu uma fonte para realizar a comparação. Esta fonte era de material diferente devido à indisponibilidade de Polônio 210. O material de construção, que também é um emissor de raios alfa, como o Polônio, foi Amerício 241, utilizado como fonte de radiação por Alonso et al. (1998), Alonso et al. (1997), Adachi et al. (1985) e por Hussin et al. (1983). A fonte, no entanto, foi construída com intensidade aproximada de 0,5 mCu, pois não havia, no momento, como certificar o teor exato. Esta quantidade é inferior aos 5 mCu originais da fonte de Polônio, equivalendo a fonte original do gerador com mais de 1 ano de uso. A vantagem de trabalhar com o Amerício é que a sua meia-vida é de 468 anos.

Assim, foi possível a avaliação do efeito da intensidade da fonte de alta tensão na geração de partículas. O teste foi realizado através da contagem de partículas, geradas com a fonte original do equipamento após 2 anos de uso, e comparado com a geração de partículas para as mesmas condições, porém com a fonte teste. Pôde ser observado que, com o emprego da nova fonte, houve

aumento da concentração de partículas. Porém, este não foi tão elevado a ponto de modificar consideravelmente o resultado. O valor obtido foi de 440 partículas/cm<sup>3</sup> a mais, porém muito menor que o apresentado no manual (Figura M.12 e Figura M.13).

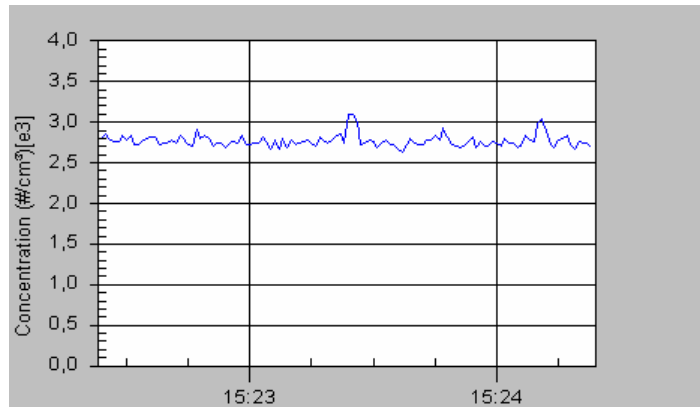


Figura M.12 - Ensaio com a fonte antiga (concentração =  $2,77 \cdot 10^3$  #/cm<sup>3</sup>).

Entretanto, o mesmo teste, realizado sem a presença da fonte, mostrou que seu emprego é de vital importância, pois como pode ser verificado na Figura M.14, na ausência da mesma, a concentração de partículas caiu para 0,4 partículas/cm<sup>3</sup>. Este mesmo comportamento foi verificado para as outras concentrações. Isto comprova que o efeito Rayleigh realmente ocorre. Talvez fosse interessante testar a geração de partículas com uma fonte com maior intensidade, porém até o presente momento isto não foi possível, pela ausência de tal fonte.

Outro ponto importante, na perda de material gerado, intensificado quando o gerador é operado com concentrações mais elevadas, é o acúmulo de material dentro do equipamento, em um orifício localizado logo após a geração das gotas, antes da neutralização e evaporação da água. Este acúmulo é significativo pois



pode ser observado a olho nu, podendo influenciar na redução da concentração na saída do equipamento.

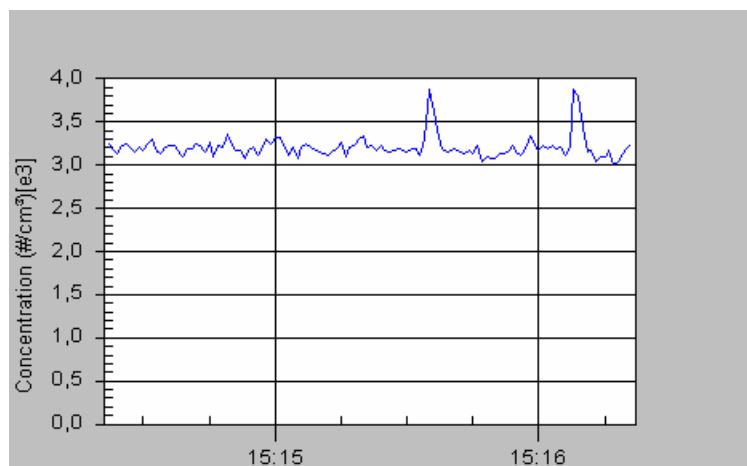


Figura M.13 - Ensaio com a fonte nova (concentração =  $3,21 \cdot 10^3 \text{ #/cm}^3$ ).

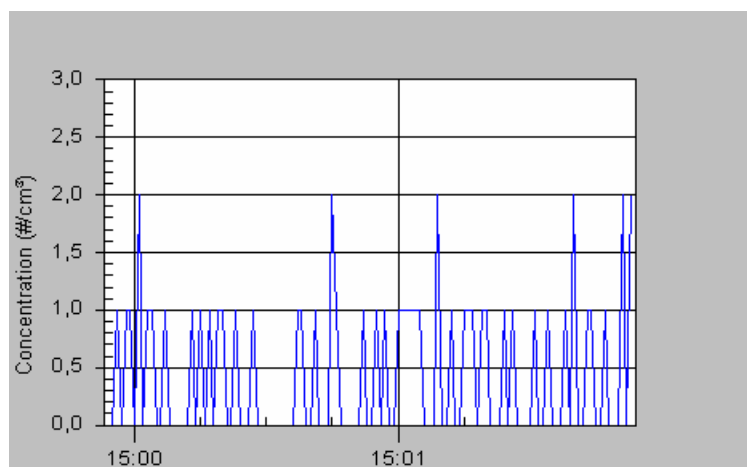


Figura M.14 - Ensaio sem o emprego da fonte (concentração =  $0,433 \text{ #/cm}^3$ ).

Foram realizadas medidas de concentração de partículas na entrada e na saída do precipitador, sem que fosse aplicada tensão, de forma a averiguar se haveria alteração na quantidade de partículas entre os pontos de amostragem. A contagem nestes pontos é apresentada na Figura M.15 e Figura M.16.

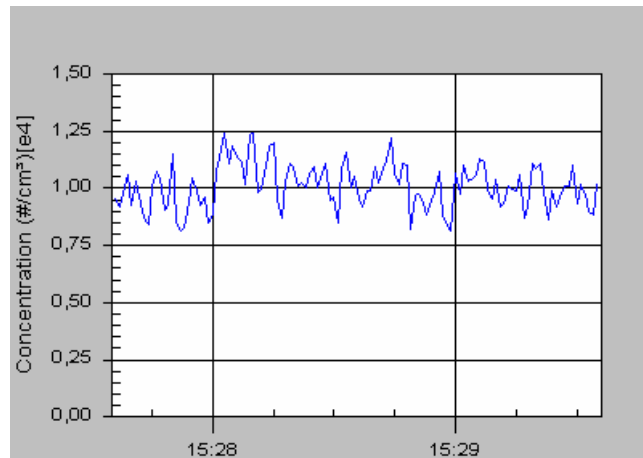


Figura M.15 - Concentração na entrada do precipitador igual a  $1,01 \cdot 10^4 \#/cm^3$ .

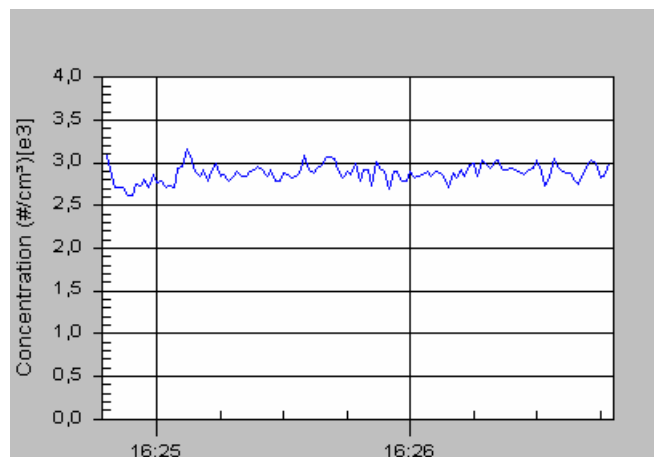


Figura M.16 - Concentração na saída do precipitador igual a  $2,88 \cdot 10^3 \#/cm^3$ .

Através destas medidas, pôde-se observar que havia uma redução considerável da quantidade de partículas presentes na corrente gasosa. Com o intuito de avaliar se as partículas estavam se aglomerando ou sendo depositadas na superfície do equipamento, foi utilizado o contador Riac/Royco, modelo 5230, para contar as partículas antes e depois do precipitador. Entretanto, este aparelho trabalha com uma faixa muito maior que a empregada, sendo o diâmetro mínimo detectado pelo equipamento igual a  $0,3 \mu m$ . Este era o único contador disponível,

que determinava o diâmetro de partícula numa faixa mais próxima a empregada, quando estas estavam dispersas em meio gasoso. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela M.1.

Tabela M.1 – Concentração de partículas antes e depois do precipitador determinadas com o contador Hiac/Royco.

<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Entrada (#/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Saída (#/cm<sup>3</sup>)</b>
0,3	1,3 a 3,8 10 <sup>-3</sup>	6,2 a 11,1 10 <sup>-3</sup>
0,4	0,54 a 1,4 10 <sup>-3</sup>	3,5 a 6,0 10 <sup>-3</sup>
0,5	0,15 a 0,54 10 <sup>-3</sup>	2,2 a 3,7 10 <sup>-3</sup>
0,6	0,08 a 0,27 10 <sup>-3</sup>	1,3 a 1,8 10 <sup>-3</sup>
0,7	0,08 a 0,04 10 <sup>-3</sup>	1,1 a 0,86 10 <sup>-3</sup>
0,8	0,04 a 0,08 10 <sup>-3</sup>	0,55 a 0,71 10 <sup>-3</sup>
0,9	0 a 0,08 10 <sup>-3</sup>	0,20 a 0,35 10 <sup>-3</sup>
1,0	0,67 a 8,2 10 <sup>-3</sup>	10,9 a 10,9 10 <sup>-3</sup>
Total	2,9 a 8,2 10 <sup>-3</sup>	25,9 a 35,5 10 <sup>-3</sup>

A concentração de partículas acima de 0,3 µm é baixa (Tabela M.1), frente à quantidade medida previamente, de forma que a aglomeração não deve ser tão elevada. Segundo Reist (1993), quando o aerossol analisado é esférico e monodisperso, como o aerossol do estudo em questão, a tendência à aglomeração é muito menor do que para aerossóis polidispersos. Fridlander (2000) determina que o tempo de residência de partículas com 100 nm em um meio polidisperso é de 80 minutos, sendo que, após este tempo, a partícula é extinta através da aglomeração com outras partículas. Como o aerossol deste estudo é

monodisperso, o tempo para que as partículas se liguem a outras é muito maior que o obtido por Friedlander, sendo este último muito maior que o tempo de residência do aerossol no precipitador.

A presença de forças externas, como a eletrostática, interfere no processo de aglomeração. Caso as partículas apresentem cargas de mesmo sinal, serão enquadradas no caso de carregamento unipolar. Neste caso, segundo Fuchs (1964), não há grande aglomeração a menos que haja uma grande diferença entre as cargas das partículas. A grande tendência é a dispersão eletrostática, ou seja, a repulsão entre as partículas, que faz com que as mesmas migrem para as paredes. Quando as partículas sofrem um carregamento bipolar, o efeito das cargas opostas, de acordo com Fuchs, faz com que aumente a coagulação destas partículas, sendo maior quanto maior as cargas adquiridas pelas mesmas. Reist (1993) afirma, entretanto, que este fenômeno só é significativo sob a ação de um carregamento bipolar intenso e no caso da fonte de Polônio estar funcionando corretamente, ou seja, neutralizando as cargas, existiria uma distribuição de cargas mais próxima da comumente encontrada na natureza, que não induziria tanto a aglomeração.

De acordo com Alonso et al. (1998), uma das maiores causas de alteração da concentração na faixa mais fina é a perda de partículas carregadas para a parede. Contudo a probabilidade de partículas na faixa granulométrica serem carregadas é baixa.

Com a finalidade de tentar diminuir as cargas eletrostáticas, facilmente geradas quando se trabalha com acrílico (Falaguasta, 1999), foi substituído este material, nos cones de dispersão, por PVC, diminuindo o contato do aerossol com

o acrílico. O resultado foi positivo, como pode ser observado pela Figura M.17 a Figura M.18, sendo a queda na concentração muito menor, de  $1,94 \cdot 10^3$  para  $1,59 \cdot 10^3 \text{ \#/cm}^3$ . Entretanto, a perda de material ainda foi significativa, de modo que a amostragem foi realizada somente na saída, sendo considerado como entrada o valor medido na saída, na ausência da aplicação de tensão aos eletrodos de descarga. Este processo elimina o erro de maximizar a eficiência do precipitador.

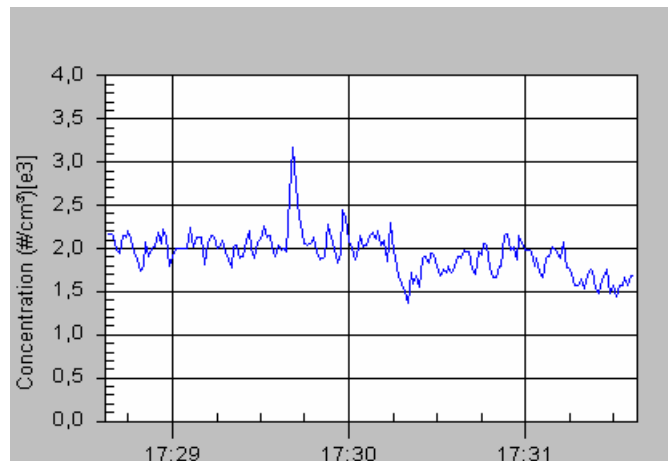


Figura M.17 - Concentração na entrada do precipitador  $1,94 \cdot 10^3 \text{ \#/cm}^3$ .

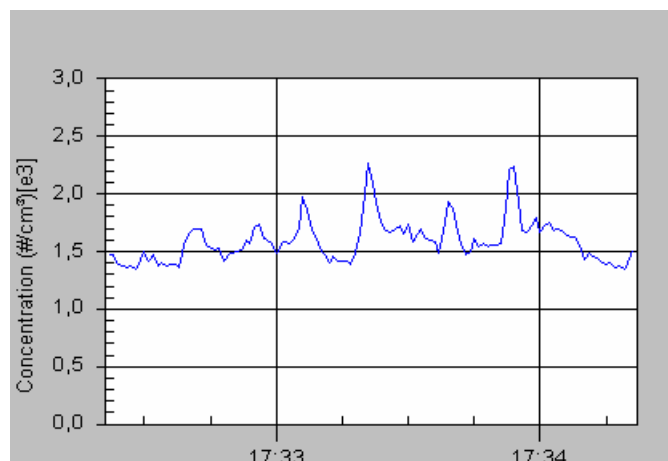


Figura M.18 - Concentração na saída do precipitador sem a presença de tensão igual a  $1,59 \cdot 10^3 \text{ \#/cm}^3$ .

Outro teste foi realizado com o intuito de avaliar se haveria interferência na eficiência de remoção das partículas, caso o ensaio fosse realizado sem a limpeza do equipamento entre uma densidade de corrente e outra. Os resultados são apresentados na Figura M.19 a Figura M.22. Estes ensaios foram realizados com o precipitador maior, operando com densidade de corrente de  $3,8 \text{ mA/m}^2$ , velocidade de  $0,5 \text{ m/s}$  e concentração da solução salina de  $1,5 \text{ g/l}$ . Foram feitos primeiramente com o precipitador limpo e, após 15 minutos de operação, aguardando 5 minutos entre o ponto em que a fonte de alta tensão foi desligada no primeiro ensaio e acionando-a novamente para o ensaio seguinte.

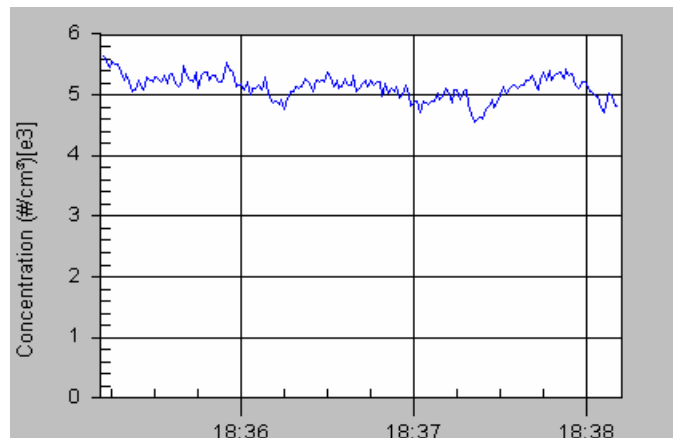


Figura M.19 - Concentração na entrada do precipitador limpo igual a  $5,13 \cdot 10^3 \text{ #/cm}^3$ .

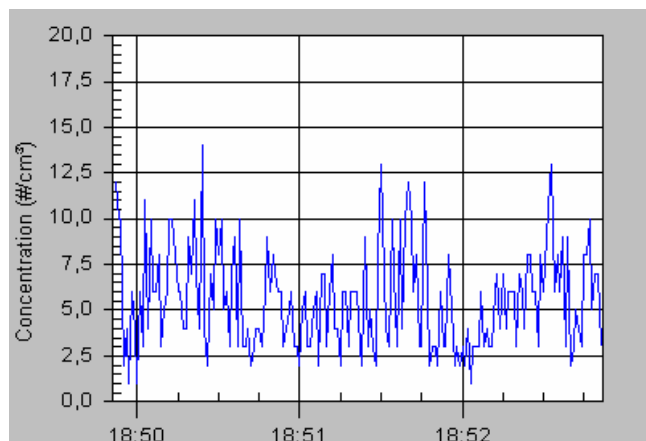


Figura M.20 - Concentração na saída do precipitador limpo igual a  $5,60 \text{ #/cm}^3$ .

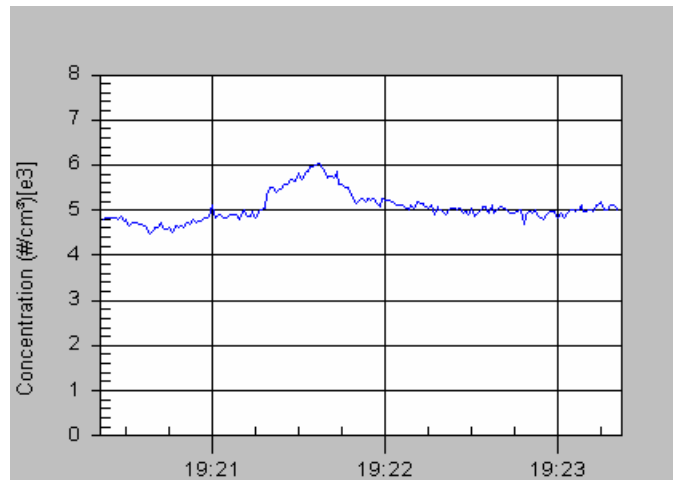


Figura M.21 - Concentração na entrada do precipitador sujo igual a  $5,06 \cdot 10^3 \text{ \#/cm}^3$ .

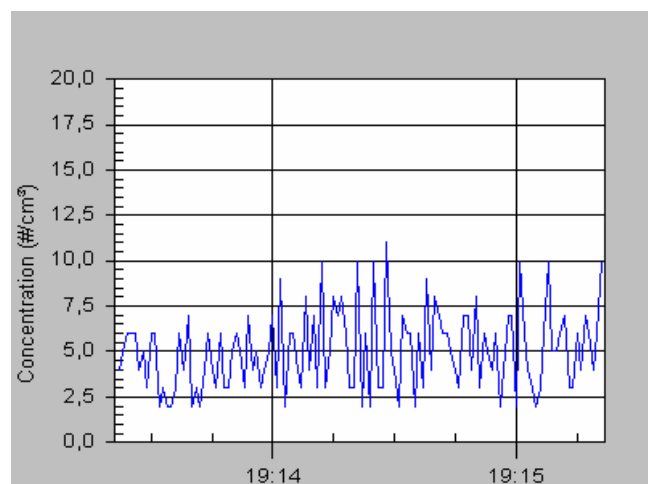


Figura M.22 - Concentração na saída do precipitador sujo igual a  $5,05 \text{ \#/cm}^3$ .

A partir dos gráficos pode ser observado que a concentração média de partículas, na entrada e na saída do precipitador, praticamente não se modifica entre um ensaio e outro. A eficiência de remoção, para o precipitador limpo, foi de 99,90% e, para o precipitador sujo, de 99,89%, havendo uma diferença de apenas 0,01%. Após a análise destes dados, concluiu-se que não haveria interferência das partículas previamente coletadas na eficiência de remoção. Portanto os ensaios que avaliavam a densidade corrente foram realizados sem a limpeza do equipamento entre uma condição e outra.

Também foi avaliado o efeito do difusor na entrada do equipamento e pode-se concluir pela Figura M.23 a Figura M.24, que apresentam a situação mais crítica, que houve uma alteração da eficiência de 78,77 para 95,36%, com o uso do dispersor, assim seu emprego é de extrema importância, uma vez que, devido à não uniformização da vazão, principalmente para as velocidades mais altas, há grande efeito de entrada, o que diminui a eficiência de remoção do equipamento.

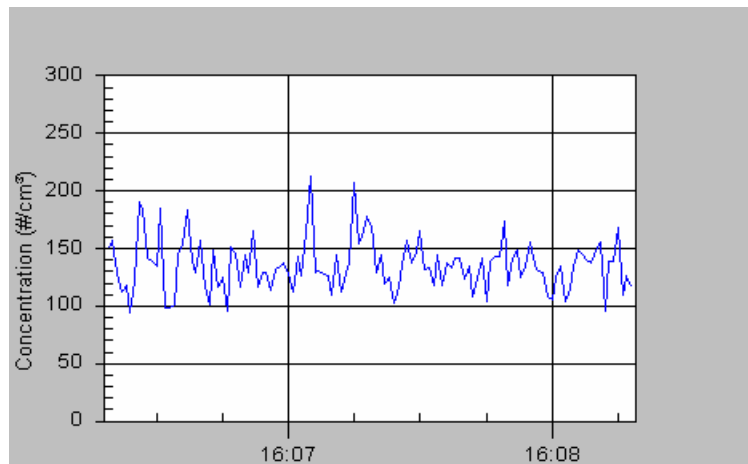


Figura M.23 - Concentração na saída do precipitador mais largo operando com  $v=0,5$  m/s e  $U=10,3$  kV e sem a presença do difusor igual a  $135$  #/cm<sup>3</sup>.

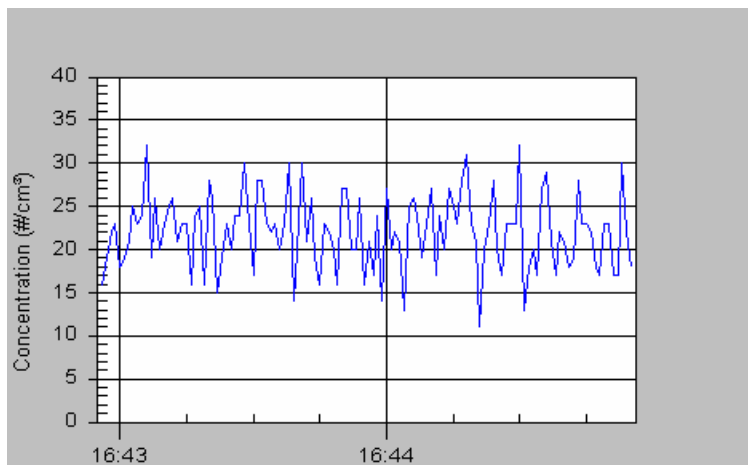


Figura M.24 - Concentração na saída do precipitador mais largo operando com  $v=0,5$  m/s e  $U=10,3$  kV e com a presença do difusor igual a  $22$  #/cm<sup>3</sup>.



As concentrações de entrada variaram em alguns casos, devido ao emprego de diferentes capilares nos experimentos. Estes capilares não eram exatamente iguais, como pôde ser observado através da lente de visualização no gerador. Notou-se que as pontas apresentavam algumas distorções entre um capilar e outro, como diferença de formato e tamanho. Isto deve ser a causa da diferença de concentração, que pode ainda ter influenciado o tamanho das partículas e a uniformidade das mesmas.

## APÊNDICE N

### N Resultados não apresentados na Etapa 2

Os resultados apresentados a seguir não foram mostrados na Etapa 2 por apresentarem o mesmo comportamento dos demais já descritos, de modo a não sobrecarregar o capítulo Resultados e Discussões.

#### Efeito da corrente elétrica e da velocidade de escoamento do ar

A Figura N.1 a Figura N.9 representam os referentes aos ensaios com solução salina com concentração igual a 17,9 nm.

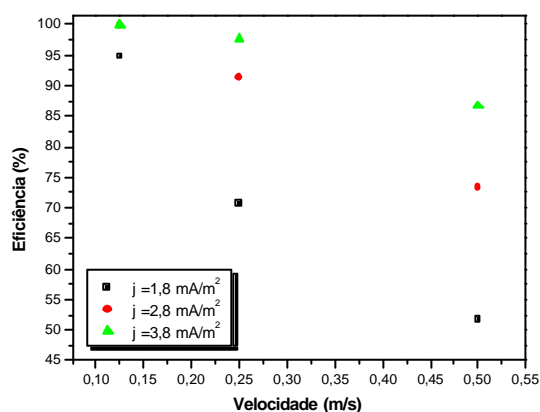


Figura N.1 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 0,15$  m e  $s/2c = 0,25$ .

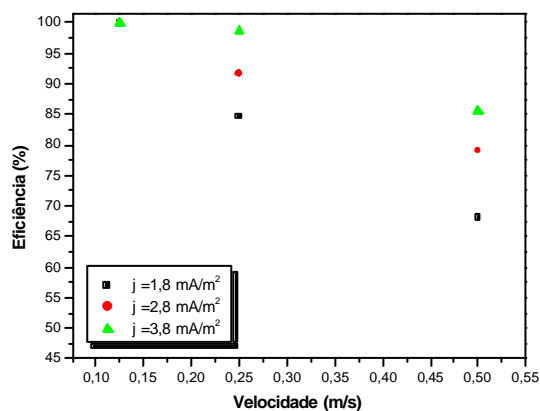


Figura N.2 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 0,15$  m e  $s/2c = 0,5$ .

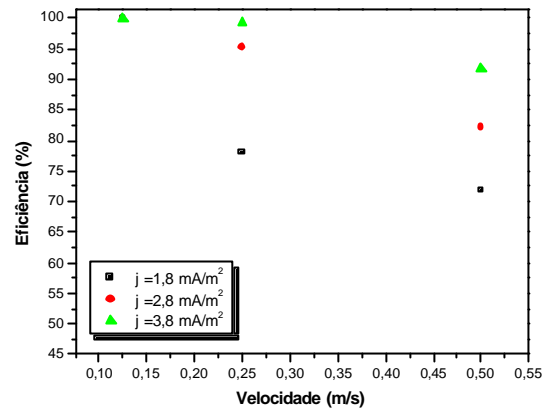


Figura N.3 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 0,15$  m e  $s/2c = 1,0$ .

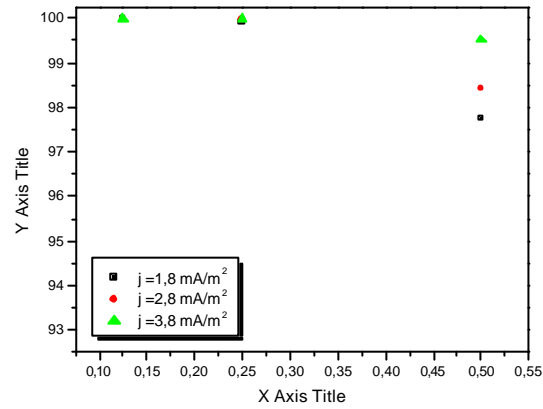


Figura N.4 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30$  cm,  $2s = 4$  cm e  $s/2c = 0,25$ .

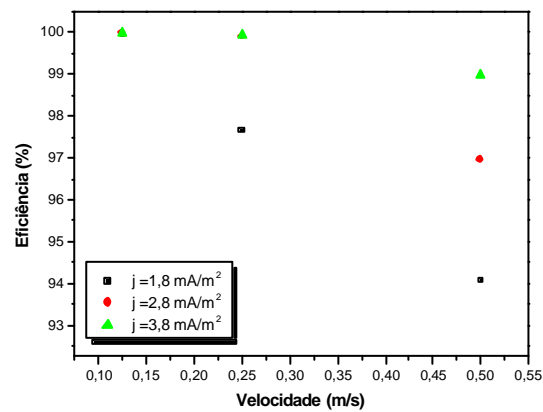


Figura N.5 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30$  cm,  $2s = 4$  cm e  $s/2c = 0,5$ .

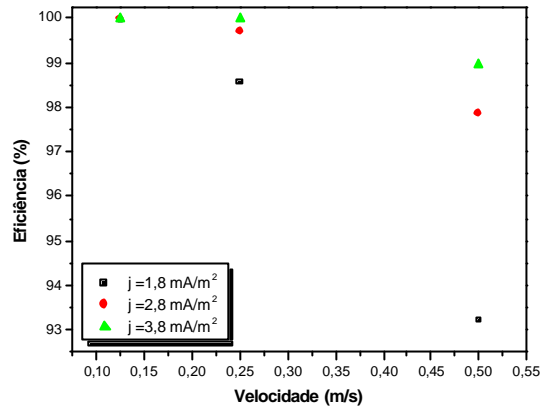


Figura N.6 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30 \text{ cm}$ ,  $2s = 4 \text{ cm}$  e  $s/2c = 1,0$ .

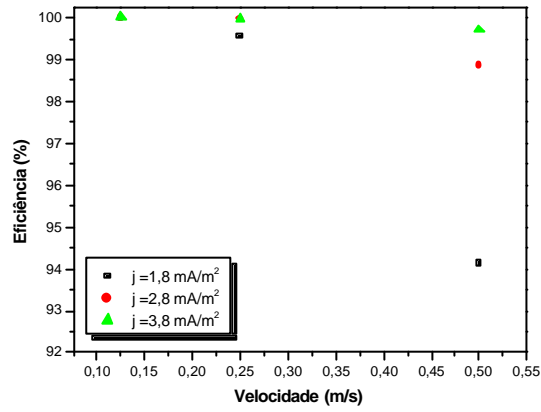


Figura N.7 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30 \text{ cm}$ ,  $2s = 6 \text{ cm}$  e  $s/2c = 0,25$ .

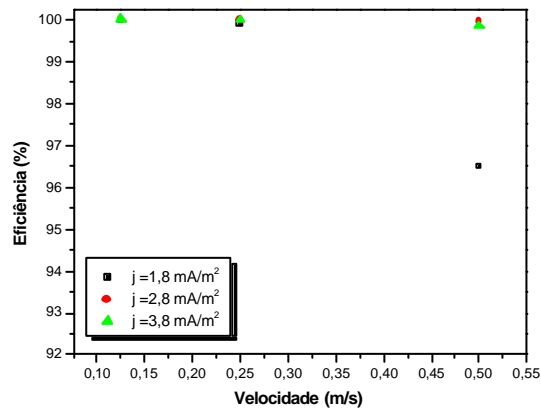


Figura N.8 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30 \text{ cm}$ ,  $2s = 6 \text{ cm}$  e  $s/2c = 0,5$ .

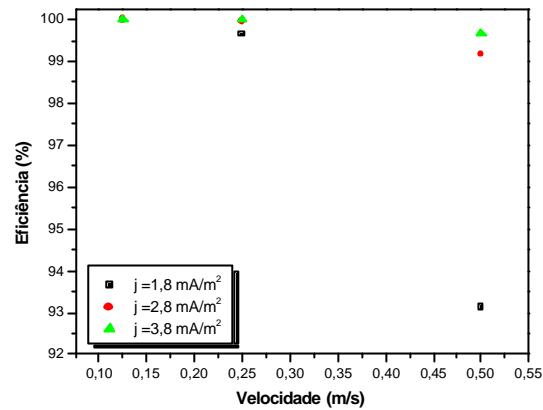


Figura N.9 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30$  cm,  $2s = 6$  cm e  $s/2c = 1,0$ .

A Figura N.10 a Figura N.18 representam os referentes aos ensaios com solução salina com concentração igual a 27,3 nm.

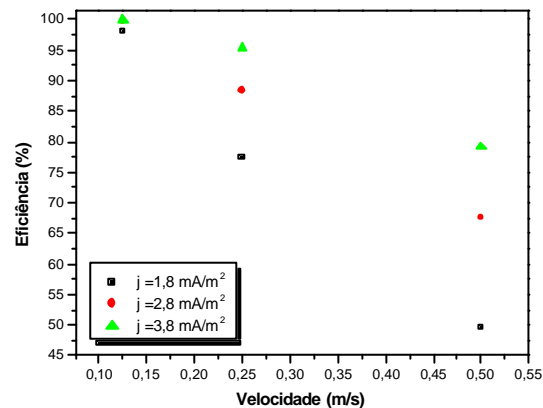


Figura N.10 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 15$  cm e  $s/2c = 0,25$ .

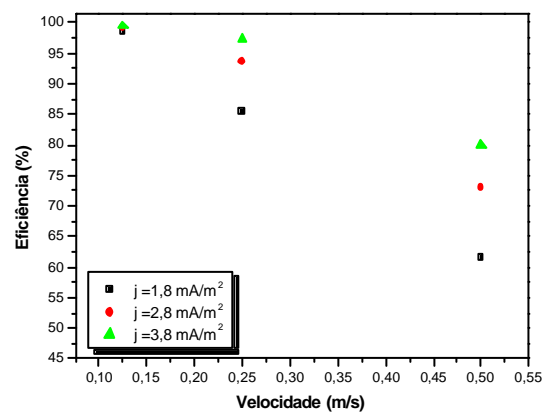


Figura N.11 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 15$  cm e  $s/2c = 0,5$ .

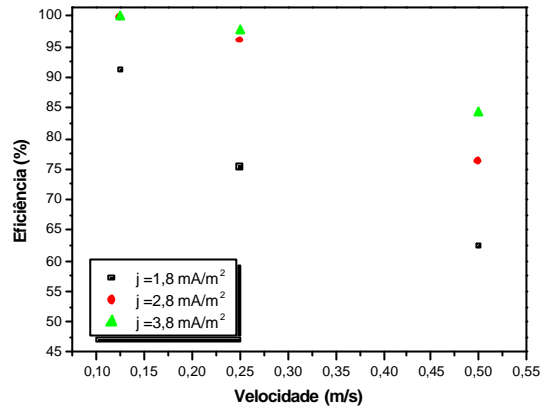


Figura N.12 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 15$  cm e  $s/2c = 1,0$ .

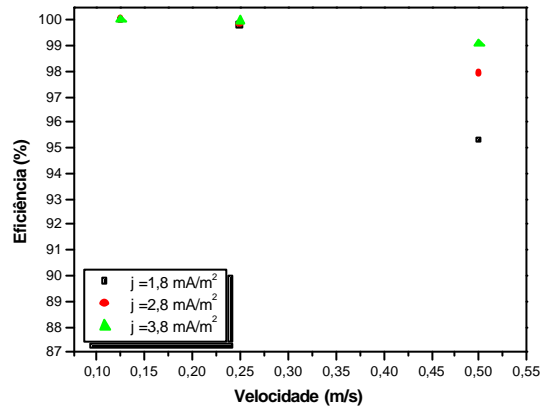


Figura N.13 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30$  cm,  $2s = 4$  cm e  $s/2c = 0,25$ .

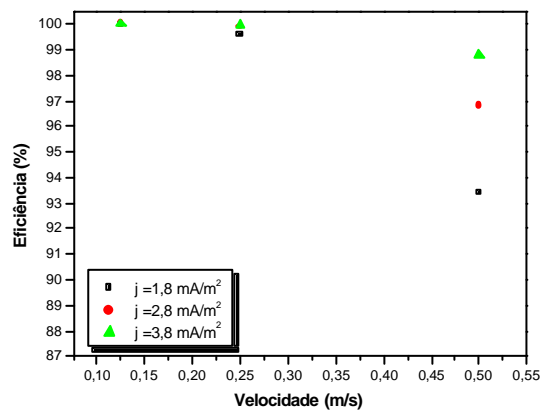


Figura N.14 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30$  cm,  $2s = 4$  cm e  $s/2c = 0,5$ .

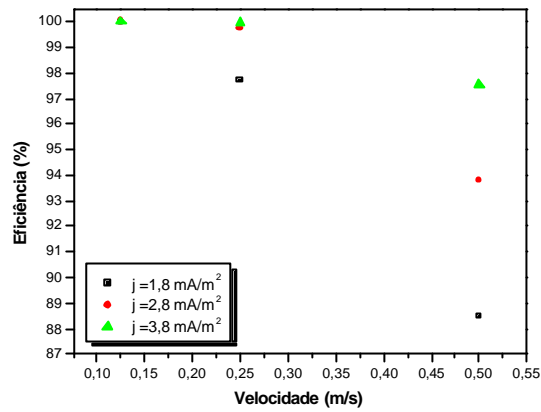


Figura N.15 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30 \text{ cm}$ ,  $2s = 4 \text{ cm}$  e  $s/2c = 1,0$ .

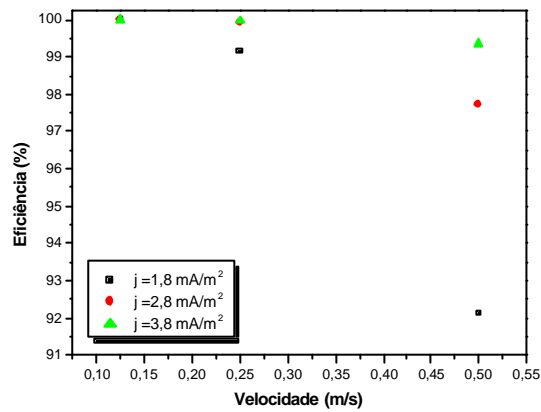


Figura N.16 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30 \text{ cm}$ ,  $2s = 6 \text{ cm}$  e  $s/2c = 0,25$ .

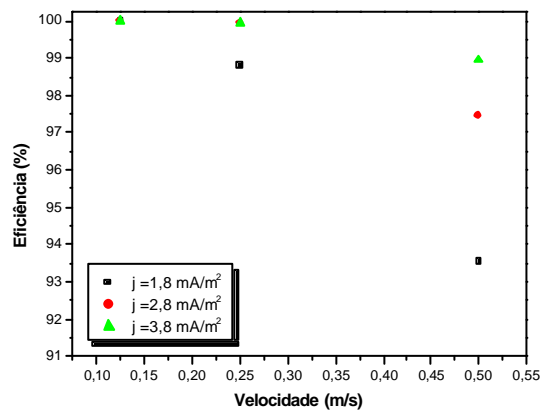


Figura N.17 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30 \text{ cm}$ ,  $2s = 6 \text{ cm}$  e  $s/2c = 0,5$ .

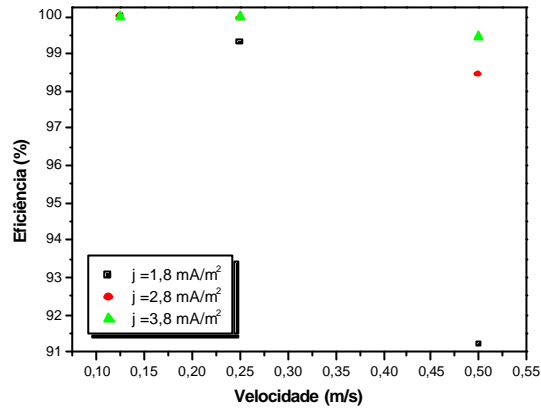


Figura N.18 - Eficiência em função da velocidade para  $L = 30$  cm,  $2s = 6$  cm e  $s/2c = 1,0$ .

Efeito da relação  $s/2c$

A Figura N.19 a Figura N.27 representam os referentes aos ensaios coma solução salina com concentração igual a 17,9 nm.

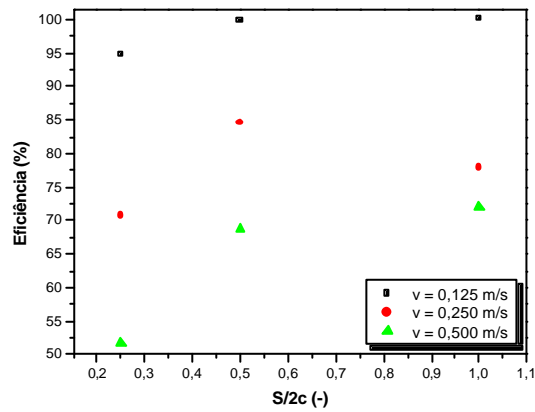


Figura N.19 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=15$  cm e  $j = 1,8$  mA/m<sup>2</sup>.



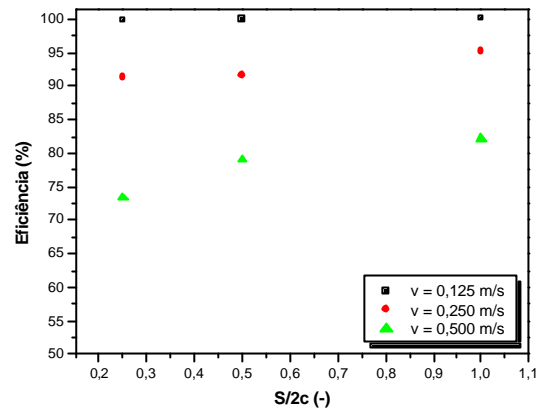


Figura N.20 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=15$  cm e  $j = 2,8$   $\text{mA}/\text{m}^2$ .

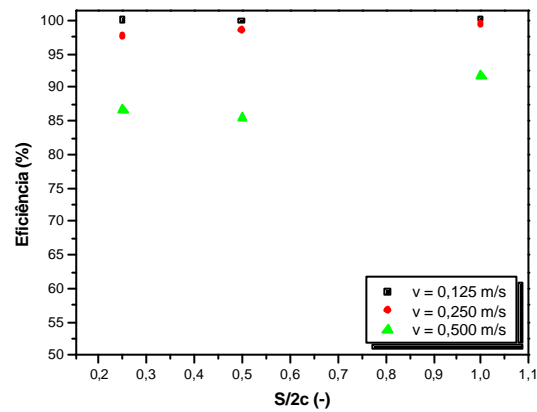


Figura N.21 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=15$  cm e  $j = 3,8$   $\text{mA}/\text{m}^2$ .

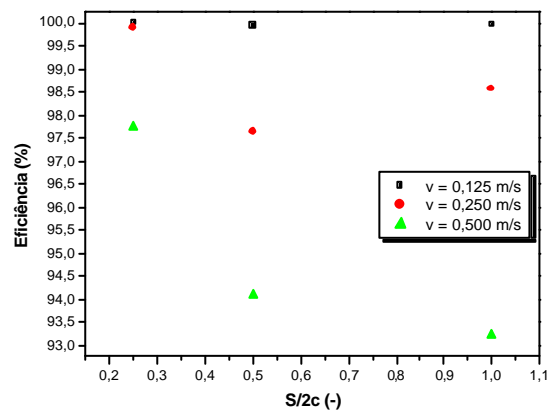


Figura N.22 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 4$  cm e  $j = 1,8$   $\text{mA}/\text{m}^2$ .

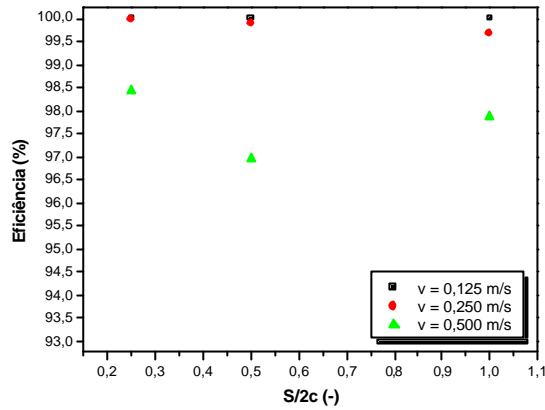


Figura N.23 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 4$  cm e  $j = 2,8$  mA/m<sup>2</sup>.

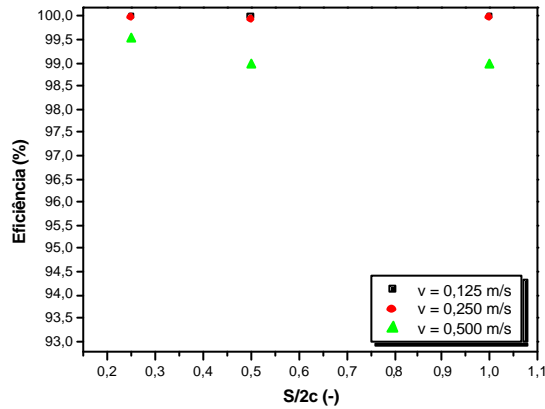


Figura N.24 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 4$  cm e  $j = 3,8$  mA/m<sup>2</sup>.

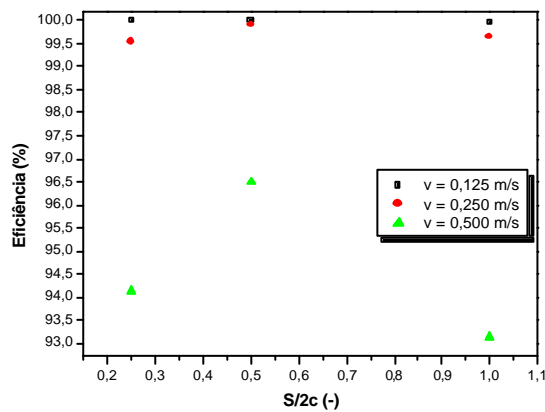


Figura N.25 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 6$  cm e  $j = 1,8$  mA/m<sup>2</sup>.

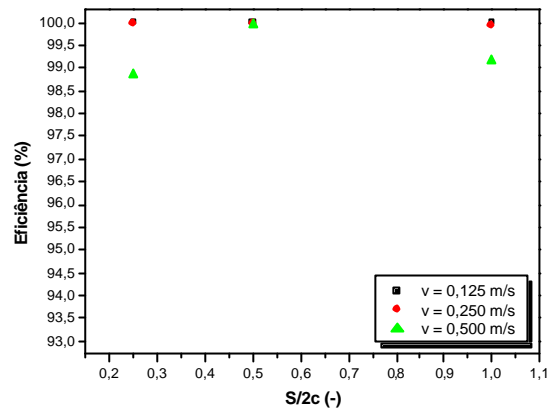


Figura N.26 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 6$  cm e  $j = 2,8$  mA/m<sup>2</sup>.

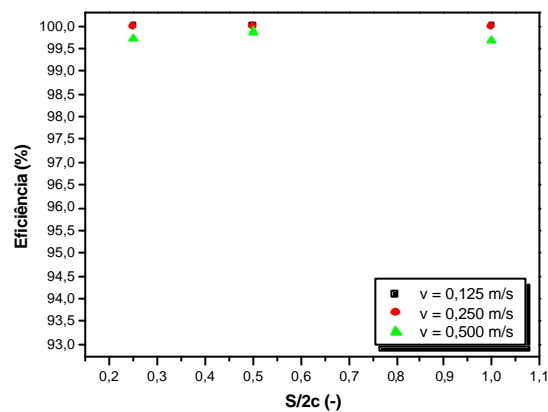


Figura N.27 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 6$  cm e  $j = 3,8$  mA/m<sup>2</sup>.

A Figura N.28 a Figura N.36 representam os referentes aos ensaios coma solução salina com concentração igual a 27,3 nml.

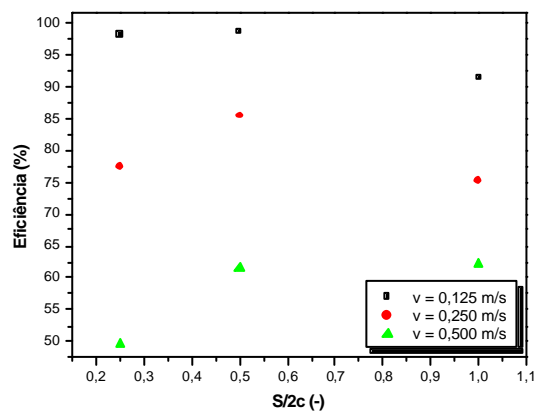


Figura N.28 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=15$  cm e  $j = 1,8$  mA/m<sup>2</sup>.

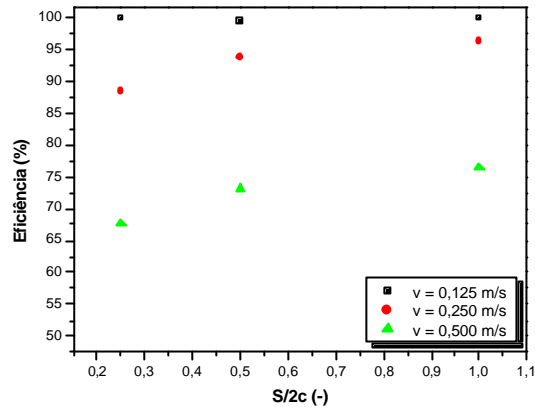


Figura N.29 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=15$  cm e  $j = 2,8$  mA/m<sup>2</sup>.

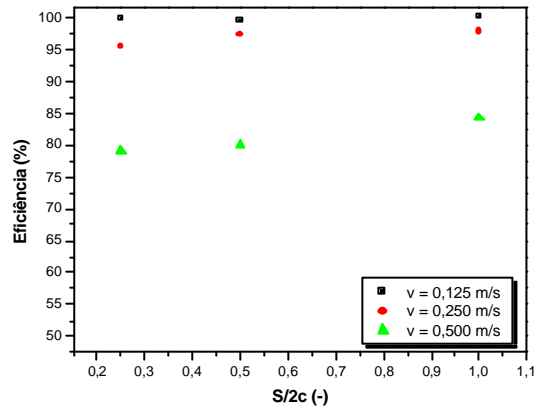


Figura N.30 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=15$  cm e  $j = 3,8$  mA/m<sup>2</sup>.

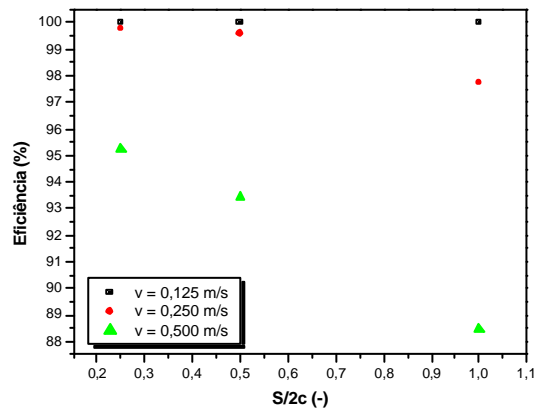


Figura N.31 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 4$  cm e  $j = 1,8$  mA/m<sup>2</sup>.

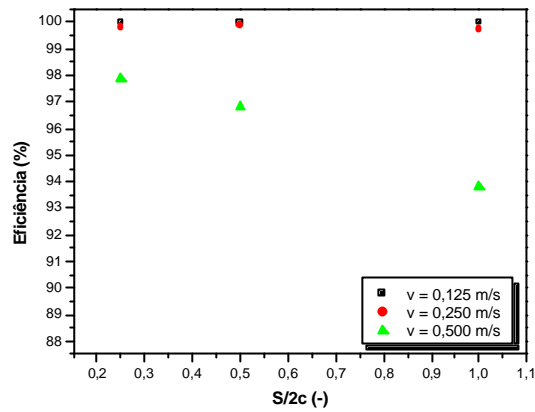


Figura N.32 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 4$  cm e  $j = 2,8$  mA/m<sup>2</sup>.

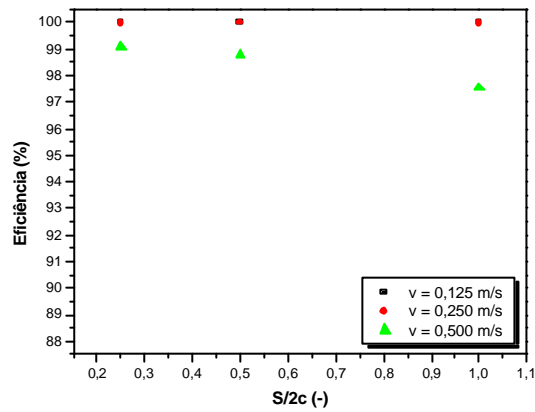


Figura N.33 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 4$  cm e  $j = 3,8$  mA/m<sup>2</sup>.

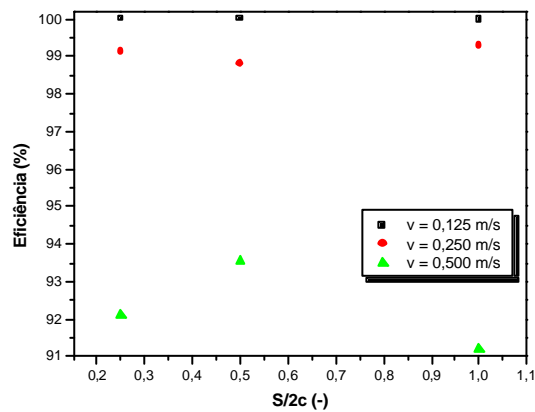


Figura N.34 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 6$  cm e  $j = 1,8$  mA/m<sup>2</sup>.

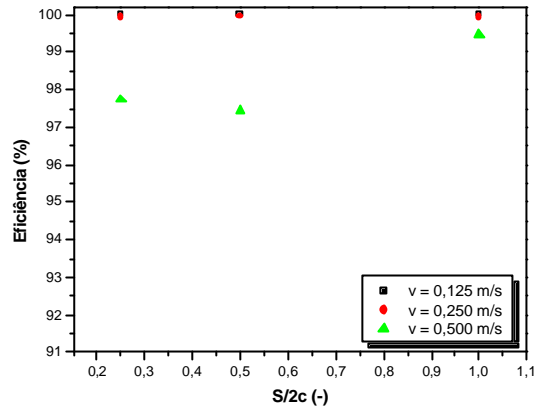


Figura N.35 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 6$  cm e  $j = 2,8$  mA/m<sup>2</sup>.

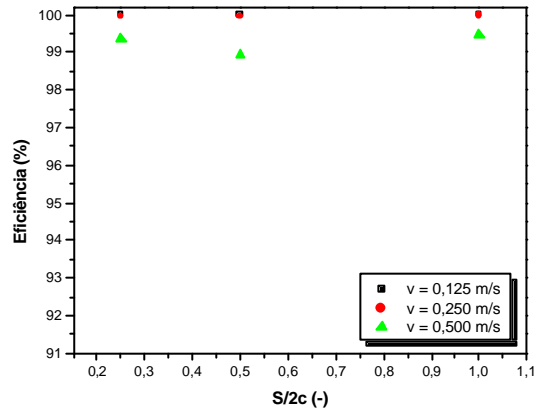


Figura N.36 - Eficiência em função da relação  $s/2c$  para  $L=30$  cm,  $2s = 6$  cm e  $j = 3,8$  mA/m<sup>2</sup>.

Efeito do comprimento e largura do precipitador

A Figura N.37 a Figura N.45 representam os referentes aos ensaios com solução salina com concentração igual a 17,9 nm.

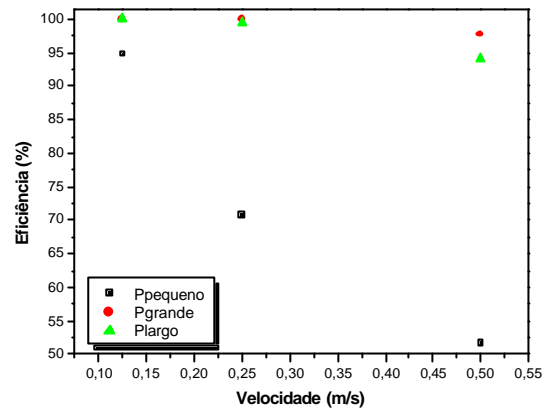


Figura N.37 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,25$  e  $j=1,8 \text{ mA/m}^2$

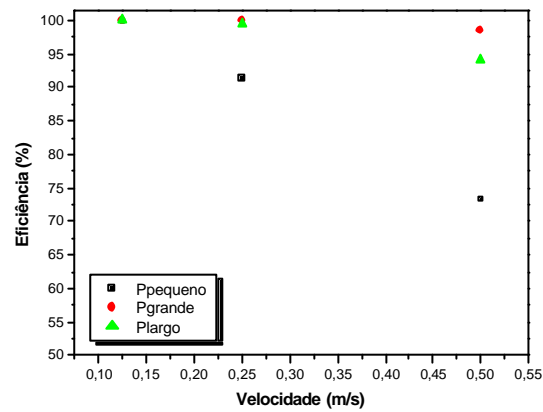


Figura N.38 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,25$  e  $j=2,8 \text{ mA/m}^2$

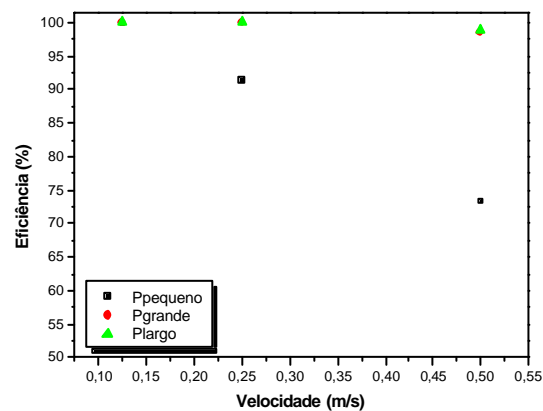


Figura N.39 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,25$  e  $j=3,8 \text{ mA/m}^2$

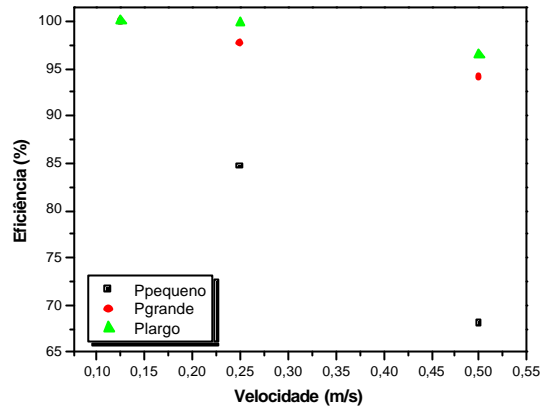


Figura N.40 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,5$  e  $j=1,8 \text{ mA/m}^2$

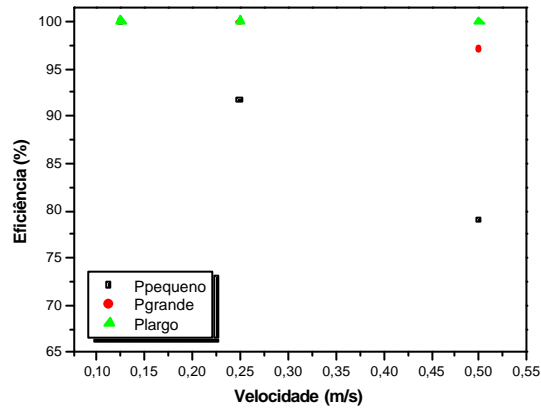


Figura N.41 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,5$  e  $j=2,8 \text{ mA/m}^2$

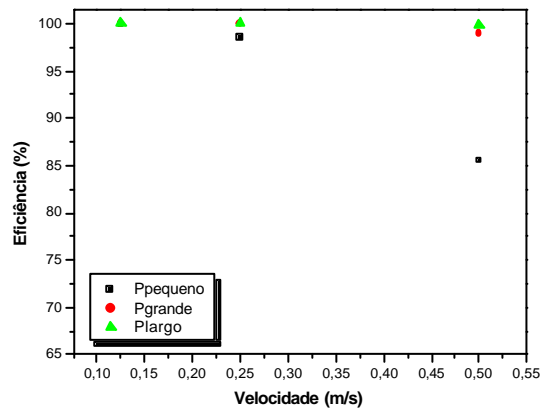


Figura N.42 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,5$  e  $j=3,8 \text{ mA/m}^2$



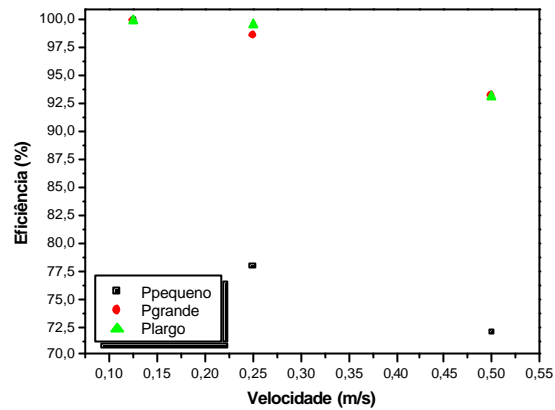


Figura N.43 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 1,0$  e  $j=1,8 \text{ mA/m}^2$

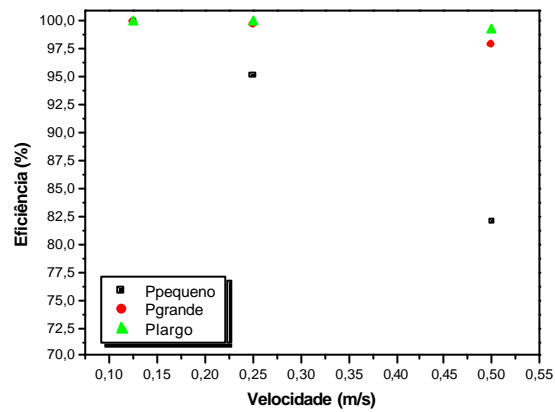


Figura N.44 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 1,0$  e  $j=2,8 \text{ mA/m}^2$

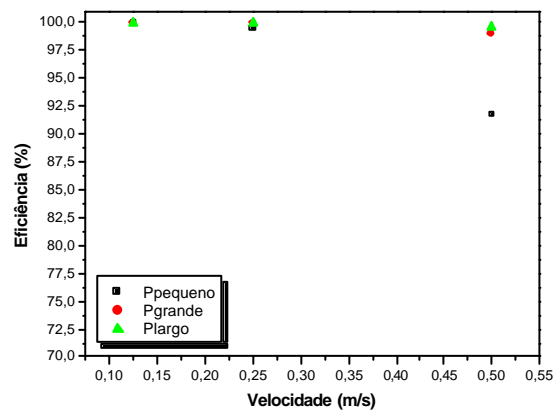


Figura N.45 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 1,0$  e  $j=3,8 \text{ mA/m}^2$

A Figura N.46 a Figura N.54 representam os referentes aos ensaios com solução salina com concentração igual 27,3 nm.

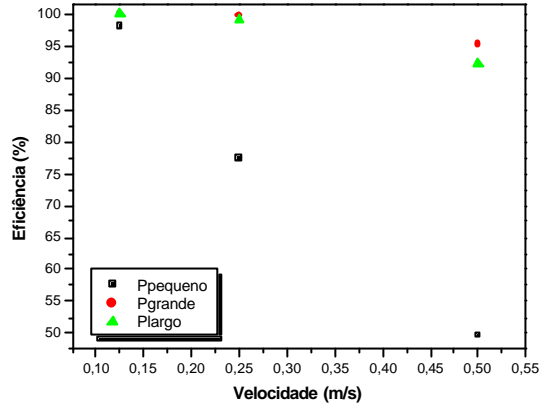


Figura N.46 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,25$  e  $j = 1,8 \text{ mA/m}^2$

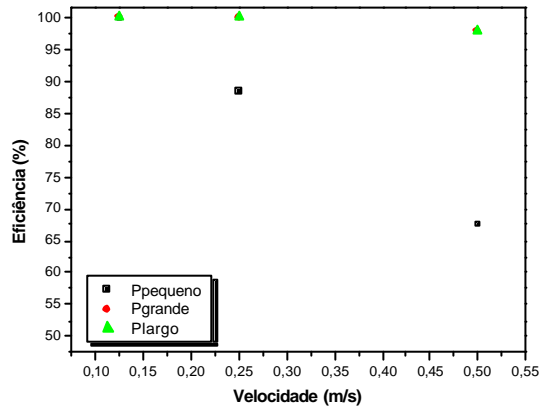


Figura N.47 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,25$  e  $j = 2,8 \text{ mA/m}^2$

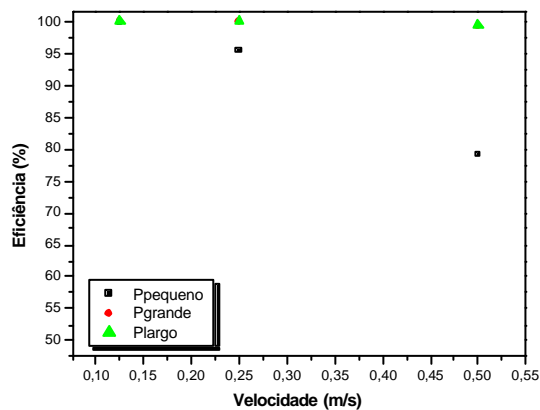


Figura N.48 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,25$  e  $j = 3,8 \text{ mA/m}^2$

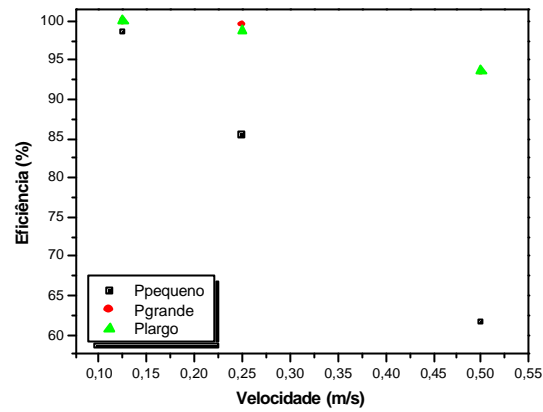


Figura N.49 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,5$  e  $j=1,8 \text{ mA/m}^2$

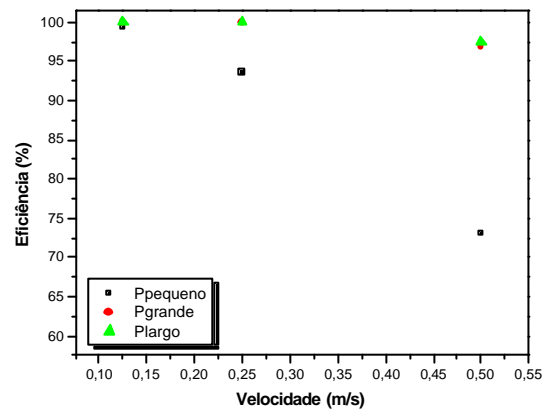


Figura N.50 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,5$  e  $j=2,8 \text{ mA/m}^2$

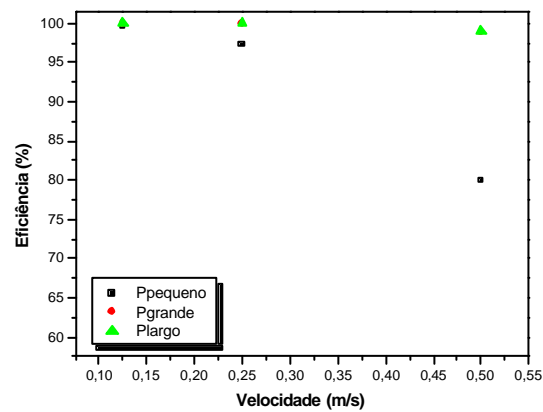


Figura N.51 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 0,5$  e  $j=3,8 \text{ mA/m}^2$

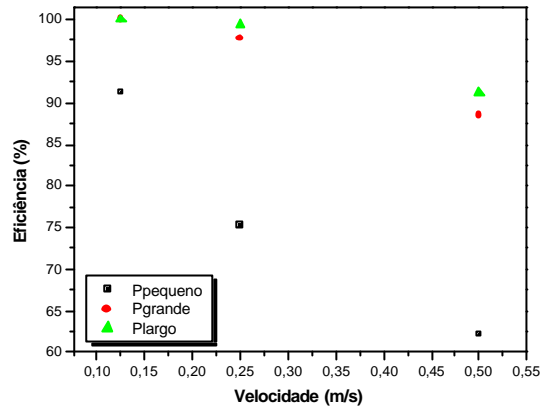


Figura N.52 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 1,0$  e  $j=1,8 \text{ mA/m}^2$

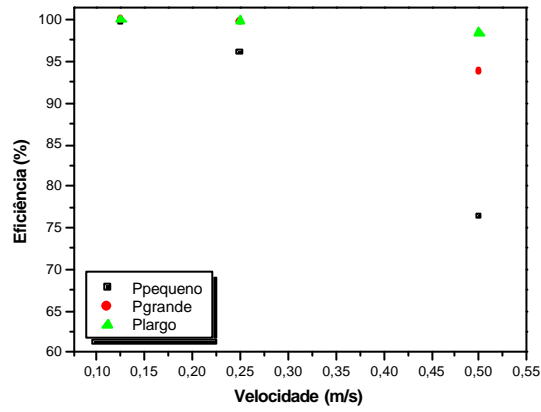


Figura N.53 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 1,0$  e  $j=2,8 \text{ mA/m}^2$

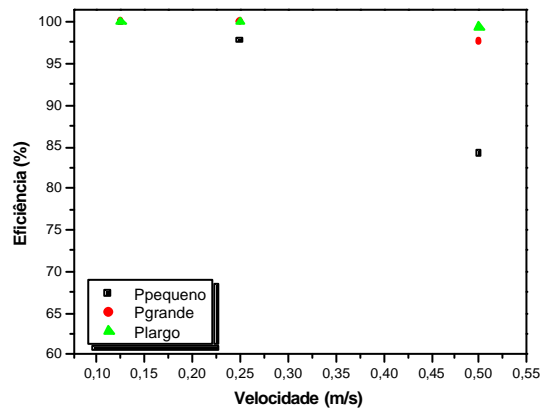


Figura N.54 - Comparação para os diferentes precipitadores para  $s/2c = 1,0$  e  $j=3,8 \text{ mA/m}^2$