

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CENTRO TECNOLÓGICO**

**FELIPE SCARAMUSSA MARIN  
THIAGO PEREIRA LOURENÇO**

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO DE BAIXO CUSTO PARA  
COLETA DE AEROSSÓIS COM PARTICULAS DE 2,5  $\mu\text{m}$  DE  
DIÂMETRO AERODINÂMICO EQUIVALENTE**

**VITÓRIA-ES**

**2011**

**FELIPE SCARAMUSSA MARIN**  
**THIAGO PEREIRA LOURENÇO**

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO DE BAIXO CUSTO PARA  
COLETA DE AEROSSÓIS COM PARTICULAS DE 2,5  $\mu\text{m}$  DE  
DIÂMETRO AERODINÂMICO EQUIVALENTE**

Projeto de Graduação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal do Espírito Santo, como  
requisito para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Silveira de Queiroz

**VITÓRIA-ES**

**2011**

**FELIPE SCARAMUSSA MARIN**  
**THIAGO PEREIRA LOURENÇO**

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO DE BAIXO CUSTO PARA  
COLETA DE AEROSSÓIS COM PARTICULAS DE 2,5  $\mu\text{m}$  DE  
DIÂMETRO AERODINÂMICO EQUIVALENTE**

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2011

---

Prof. Dr. Rogério Silveira de Queiroz  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

Prof. Dr. Juan Sérgio Romero Saenz  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

---

Prof. M. Sc.. Elias Antonio Dalvi  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores que se propuseram à transmitir o conhecimento necessário para alcançarmos essa vitória, em especial ao professor orientador Rogério Silveira de Queiroz por ter dedicado parte do seu tempo com o nosso trabalho, ouvindo nossas idéias, questionamentos e nos ajudando na busca das melhores escolhas.

À Deus, aos familiares e aos amigos por terem sido uma fonte inesgotável de ânimo.

Nosso muito obrigado!

## **RESUMO**

O projeto avalia a eficiência de um protótipo de baixo custo para coleta de aerossóis com partículas de 2,5  $\mu\text{m}$  de diâmetro aerodinâmico equivalente, capturando amostras de partículas e avaliando as concentrações. O sistema seletor de partículas utilizado no equipamento é do tipo separador inercial ciclônico. O equipamento não utiliza nenhum controlador automático de vazão ou temperatura, e a partir da vazão registrada e das características particulares do sistema seletor por ciclonamento o diâmetro de corte é determinado. Foram realizados 20 testes com o equipamento, sendo que 10 utilizaram filtros de Teflon e 10 utilizaram filtros de Quartzo.

Palavras chaves: Ciclone. d50. Aerossóis.

## **ABSTRACT**

The project evaluates the effectiveness of a low-cost prototype capable of collecting aerosol particles with 2.5  $\mu\text{m}$  of aerodynamic diameter equivalent, capturing samples and evaluating the particle concentrations. The system of particles selector used in the equipment is the type cyclonic inertial separator. The prototype does not use any automatic control of flow or temperature, and flow rate from the registered and the particular characteristics of the system selector cyclone cut diameter is determined. Overall 20 tests were conducted with the equipment, 10 used filters of Teflon and 10 used quartz filters.

Keywords: Cyclone. d50. Aerosol.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Corte transversal de um ciclone.....                  | 12 |
| Figura 2 - Diagrama de blocos do equipamento.....                | 19 |
| Figura 3 - Características do ciclone .....                      | 24 |
| Figura 4- Caminho percorrido pelo ar no interior do ciclone..... | 25 |
| Figura 5- Bomba de vácuo.....                                    | 26 |
| Figura 6 - Rotâmetro .....                                       | 28 |
| Figura 7- Interface do software LogChart-II. ....                | 29 |
| Figura 8- Datallogger.....                                       | 29 |
| Figura 9- Medidor de vazão.....                                  | 30 |
| Figura 10- Acumulador.....                                       | 31 |
| Figura 11- Ventilador.....                                       | 32 |
| Figura 12- Filtro .....                                          | 33 |
| Figura 13- Distribuição espacial.....                            | 33 |
| Figura 14- Foto do equipamento .....                             | 34 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                      |                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Gráfico 1 - Eficiência de coleta pelo diâmetro aerodinâmico equivalente.             | <b>Erro! Indicador não definido.</b> |
| Gráfico 2 - Histograma do diâmetro de corte para o primeiro filtro de Teflon .....   | 40                                   |
| Gráfico 3 - Histograma do diâmetro de corte para o segundo filtro de Teflon.....     | 40                                   |
| Gráfico 4 - Histograma do diâmetro de corte para o terceiro filtro de Teflon.....    | 40                                   |
| Gráfico 5 - Histograma do diâmetro de corte para o quarto filtro de Teflon.....      | 41                                   |
| Gráfico 6 - Histograma do diâmetro de corte para o quinto filtro de Teflon.....      | 41                                   |
| Gráfico 7 - Histograma do diâmetro de corte para o sexto filtro de Teflon.....       | 41                                   |
| Gráfico 8 - Histograma do diâmetro de corte para o sétimo filtro de Teflon .....     | 42                                   |
| Gráfico 9 - Histograma do diâmetro de corte para o oitavo filtro de Teflon .....     | 42                                   |
| Gráfico 10 - Histograma do diâmetro de corte para o nono filtro de Teflon .....      | 42                                   |
| Gráfico 11 - Histograma do diâmetro de corte para o décimo filtro de Teflon .....    | 43                                   |
| Gráfico 12 - Histograma do diâmetro de corte para o primeiro filtro de Quartzo.....  | 43                                   |
| Gráfico 13 - Histograma do diâmetro de corte para o segundo filtro de Quartzo .....  | 44                                   |
| Gráfico 14 - Histograma do diâmetro de corte para o terceiro filtro de Quartzo ..... | 44                                   |
| Gráfico 15 - Histograma do diâmetro de corte para o quarto de Quartzo .....          | 44                                   |
| Gráfico 16 - Histograma do diâmetro de corte para o quinto filtro de Quartzo .....   | 45                                   |
| Gráfico 17 - Histograma do diâmetro de corte para o sexto filtro de Quartzo .....    | 45                                   |
| Gráfico 18 - Histograma do diâmetro de corte para o sétimo filtro de Quartzo.....    | 45                                   |
| Gráfico 19 - Histograma do diâmetro de corte para o sétimo filtro de Quartzo.....    | 46                                   |
| Gráfico 20 - Histograma do diâmetro de corte para o nono filtro de Quartzo .....     | 46                                   |
| Gráfico 21 - Histograma do diâmetro de corte para o décimo filtro de Quartzo.....    | 46                                   |

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 22 - Série temporal das vazões medidas para filtros de teflon .....                     |    |
| Gráfico 23 - Série temporal das vazões medidas para filtros de quartzo .....                    | 48 |
| Gráfico 24 - Série temporal dos diâmetros de corte para filtros de teflon.....                  | 48 |
| Gráfico 25 - Série temporal dos diâmetros de corte para filtros de quartzo .....                | 49 |
| Gráfico 26 - Série temporal do erro relativo entre o d50 e 2,52µm para filtros de teflon.....   | 49 |
| Gráfico 27 - Série temporal do erro relativo entre o d50 e 2,52µm para filtros de quartzo ..... | 50 |
| Gráfico 28 - Histograma do erro relativo entre o d50 e 2,52µm para o 8º filtro de teflon.....   | 50 |
| Gráfico 29 - Histograma do erro relativo entre o d50 e 2,52µm para o 9º filtro de teflon.....   | 51 |
| Gráfico 30 - Histograma do erro relativo entre o d50 e 2,52µm para o 10º filtro de teflon.....  | 51 |
| Gráfico 31 - Histograma do erro relativo entre o d50 e 2,52µm para o 5º filtro de quartzo ....  | 51 |
| Gráfico 32 - Histograma do erro relativo entre o d50 e 2,52µm para o 7º filtro de quartzo ....  | 52 |
| Gráfico 33 - Histograma do erro relativo entre o d50 e 2,52µm para o 9º filtro de quartzo ....  | 52 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Preços dos componentes do protótipo .....                                                                                                    | 21 |
| Tabela 2 - Valores para viscosidade dinâmica do ar para diversas temperaturas .....                                                                     | 23 |
| Tabela 3 - Dimensões dos ciclones.....                                                                                                                  | 24 |
| Tabela 4 - Datas dos testes e condições meteorológicas .....                                                                                            | 35 |
| Tabela 5 - Datas dos testes e condições meteorológicas .....                                                                                            | 36 |
| Tabela 6 - Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão, para vazão e diâmetro de corte, de todos os testes que utilizaram filtros de Teflon.....   | 37 |
| Tabela 7 - Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão, para vazão e diâmetro de corte, de todos os testes que utilizaram filtros de quartzo ..... | 38 |
| Tabela 8 - Massa dos filtros, volume total de ar e concentração de particulado, para os filtros de Teflon .....                                         | 38 |
| Tabela 9 - Massa dos filtros, volume total de ar e concentração de particulado, para os filtros de Quartzo.....                                         | 39 |

## SUMÁRIO

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                                            | <b>12</b> |
| 1.2 OBJETIVO .....                                                                | 14        |
| 1.3 JUSTIFICATIVA .....                                                           | 14        |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                              | <b>16</b> |
| <b>3 CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO DE COLETA DE PARTÍCULAS RESPIRÁVEIS .....</b> | <b>18</b> |
| 3.1 CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO .....                                                  | 19        |
| 3.2 ROTEIRO DE CÁLCULOS .....                                                     | 21        |
| 3.3 ELEMENTOS CONSTITUINTES DO PROTÓTIPO.....                                     | 23        |
| 3.3.1 Separador ciclônico .....                                                   | 23        |
| 3.3.2 Bomba de vácuo .....                                                        | 26        |
| 3.3.3 Rotâmetro .....                                                             | 27        |
| 3.3.4 Datalogger .....                                                            | 28        |
| 3.3.5 Medidor de vazão.....                                                       | 30        |
| 3.3.6 Acumulador.....                                                             | 30        |
| 3.3.7 Ventilador .....                                                            | 31        |
| 3.3.8 Filtro .....                                                                | 32        |
| 3.4 MONTAGEM DO PROTÓTIPO .....                                                   | 33        |
| <b>4 TESTES .....</b>                                                             | <b>35</b> |
| <b>5 RESULTADOS.....</b>                                                          | <b>37</b> |
| 5.1 HISTOGRAMAS DO DIÂMETRO DE CORTE .....                                        | 39        |
| 5.1.1 Histogramas d50 do Teflon .....                                             | 39        |
| 5.1.2 Histogramas d50 do Quartzo.....                                             | 43        |
| 5.2 SÉRIES TEMPORAIS .....                                                        | 47        |

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.1 Séries temporais de vazões.....                          | 47 |
| 5.2.2 Séries temporais de diâmetros de corte .....             | 48 |
| 5.2.3 Séries temporais de erros relativos .....                | 49 |
| 5.3 HISTOGRAMAS DE ERROS RELATIVOS DE DIÂMETROS DE CORTE ..... | 50 |
| 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....                                  | 53 |
| 7 CONCLUSÕES.....                                              | 55 |
| 8 REFERÊNCIAS .....                                            | 56 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os particulados presentes no ar possuem diversos tamanhos geométricos, densidades e formas. Devido a este fato o conceito de diâmetro aerodinâmico equivalente é normalmente utilizado para facilitar manipulação de dados dessa natureza e com o uso desse modelo é possível relacionar os diversos aerossóis com sua capacidade de penetração e probabilidade de deposição das partículas ao sistema respiratório. O diâmetro aerodinâmico equivalente é definido como o diâmetro de uma esfera hipotética de densidade unitária ( $1\text{g/cm}^3$ ) que tenha a mesma velocidade terminal de sedimentação da partícula no ar, independente do seu tamanho geométrico, forma e densidade.

A eficiência de coleta ( $\eta$ ) é definida como a porcentagem de partículas de um determinado diâmetro aerodinâmico equivalente que são coletadas pelo ciclone.

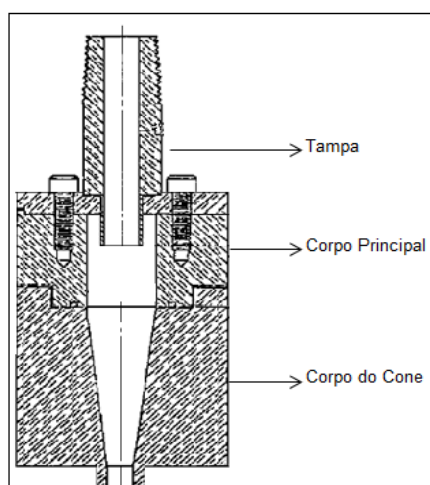


Figura 1 – Corte transversal de um ciclone

A eficiência de coleta de um ciclone depende das propriedades físicas do gás e das partículas, da geometria do ciclone e das condições de operação. Um exemplo ilustrativo é mostrado no gráfico 1, em que a eficiência de coleta de partículas de diâmetro aerodinâmico equivalente igual a  $2,25\ \mu\text{m}$  é de 90%. Isso indica que 90% das partículas com diâmetro aerodinâmico equivalente igual a  $2,25\ \mu\text{m}$  são coletadas.

O diâmetro de corte, abreviado por  $d_{50}$ , é outra definição importante e está relacionada com a

eficiência de coleta. O diâmetro de corte é o diâmetro aerodinâmico das partículas que são coletadas com 50% de eficiência. Com isso, as partículas que possuem dimensões maiores que o diâmetro de corte são direcionadas para o tubo de rejeito. De acordo com o gráfico 1, o diâmetro de corte desse exemplo ilustrativo é de 2,5  $\mu\text{m}$ .

A necessidade de monitoramento de concentrações de material particulado na fração de corte de diâmetros aerodinâmicos equivalentes menores ou iguais a 2,5 micrômetros impôs-se como um reflexo dos conhecidos mecanismos de penetração de aerossóis no sistema respiratório humano.

Enquanto concentrações ambientais da fração menor que 10 micrômetros, usada em estudos epidemiológicos e de séries temporais, já mostravam correlações altas com desfechos de saúde respiratória tais como internações hospitalares e atendimentos ambulatoriais, os estudos com a fração 2,5 micrômetros consolidaram de forma irrefutável tais relações.

A nova legislação norte-americana sobre os métodos de medição e as concentrações ambientais admissíveis para PM<sub>10</sub> (doravante denominada Partículas Inaláveis) e PM<sub>2,5</sub> (doravante Partículas Respiráveis) foi promulgada em 1997.

Os métodos para coleta das amostras de ar visando a determinação dessas concentrações foram designados pela US Environmental Protection Agency (USEPA) como FRM (Federal Reference Method) e FEM (Federal Equivalent Methods). Os métodos equivalentes (FEM) são divididos em três classes para permitir inovação tecnológica e flexibilidade no monitoramento.

A classe III dos FEM encoraja o desenvolvimento e a avaliação de novas tecnologias de amostragem que incrementem a especificidade em si das medições de concentrações de Partículas Respiráveis ou decresçam os custos de amostras muito grandes. Os amostradores classificados em FEM classe III podem ser totalmente baseados em acumulação em filtros de maneira temporal integrada, ou em medições contínuas e semi-contínuas não baseadas em acúmulo em filtros.

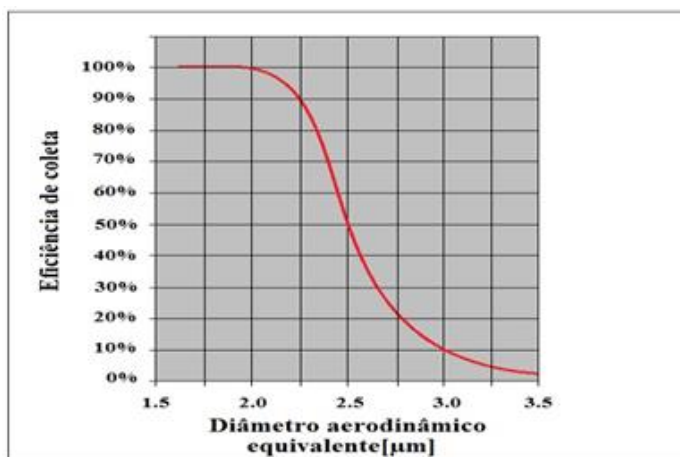


Gráfico 1 – Eficiência de coleta pelo diâmetro aerodinâmico equivalente

## 1.2 OBJETIVO

Construir protótipos de um equipamento coletor de partículas respiráveis capaz de capturar amostras de partículas com diâmetro aerodinâmico equivalente determinado e de avaliar suas concentrações. A partir dos dados obtidos do equipamento será possível calcular o diâmetro aerodinâmico das partículas coletadas a partir da vazão registrada e das características particulares do sistema seletor por ciclonamento.

A prova de conceito proposta é analisar indicadores estatísticos das amostras coletadas e analisar o comportamento dos sistemas componentes do equipamento durante os testes.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O trabalho aqui apresentado é baseado em uma inovação para um amostrador classe III – FEM, hábil a coletar amostras acumuladas em filtros, com registros de vazão de baixa incerteza e tendo como sistema seletivo do tamanho da partícula, ciclones separadores.

Com o conhecimento da vazão e sua incerteza e as características de comportamento dos ciclones, o equipamento produzido permite, após a sua operação por um período determinado de tempo, o conhecimento estatístico dos diâmetros aerodinâmicos equivalentes coletados. Há uma ampliação da amplitude das possibilidades de interação dessas amostras com o que é conhecido sobre o sistema respiratório, tornando mais ricos os estudos que demonstrem

relações entre desfechos de saúde e coleções de tamanhos de partículas em torno de 2,5 micrômetros.

Justifica-se assim o esforço para definir e testar protótipos de custo muito inferior aos amostradores comercializados, que podem atender ao requisito fundamental de estudo dos reflexos de concentrações de material em torno do diâmetro aerodinâmico equivalente 2,5 micrômetros sobre a saúde respiratória.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Métodos para monitoração dos diversos tamanhos de partículas contidas nos aerossóis são pesquisados desde o início do século XX. O interesse por esta área tem sido mais intenso nos últimos 30 anos, estimulado pelo aumento da poluição urbana, por estudos sobre doenças ocupacionais causadas pela exposição à poeira e pelo maior rigor imposto pelos órgãos ambientais com relação às cargas de emissão de poluentes oriundos principalmente do setor industrial e de transportes.

Ciclones para a retirada ou a recolha das partículas com dimensões superiores a diâmetros específicos têm sido investigadas nas últimas décadas. Apesar da simplicidade de operação e manutenção que os ciclones oferecem, principalmente por não possuírem partes móveis, a modelagem matemática para a descrição e previsão da separação de uma parcela do particulado presente no fluido que ocorre no equipamento ainda é complexa. Desse modo, grande parte dos trabalhos científicos dessa área recorre a recursos de cunho mais experimental do que puramente teórico.

A abordagem de modelagem mais comum é baseada no equilíbrio entre a força centrífuga e a força de arrasto atuando sobre as partículas (Barth, 1956; Dietz, 1981; Mothes & L. ° Offler, 1988). A outra abordagem é o chamado "time-of-flight" (Läpple, 1950; Leith & Licht, 1972), que considera o tempo de residência de uma partícula viajando de sua posição inicial para a parede ciclone. Ambas as abordagens revelam valiosa compreensão sobre como as geometrias e condições de funcionamento do dispositivo afetam o desempenho de um ciclone. No entanto, a previsão do desempenho entre esses modelos de ciclone é tipicamente menos satisfatória quando aplicada em ciclones de diferentes configurações, em especial os ciclones de pequeno porte.

O modelo empírico desenvolvido por Chan e Lippmann (1977) foi o primeiro modelo com foco em ciclones de pequeno porte. Uma equação hiperbólica com quatro constantes empíricas foi utilizada com sucesso para ajustar as curvas de partículas em seis amostragens de ar, para diferentes vazões em um ciclone. No entanto, essas quatro constantes empíricas não podem ser calculadas a partir das dimensões de qualquer ciclone, de modo que o modelo é limitado ao ciclone estudado, como ocorre na maioria das pesquisas nessa área.

Os modelos desenvolvidos por Saltzman e Hochstrasser (1983) e Lidén e Gudmundsson (1997) usaram diferentes configurações de ciclones, variando além da vazão, algumas de suas dimensões. Um fato interessante é que os coeficientes associados com o número de Reynolds em ambos os modelos são os mesmos, embora as definições do número de Reynolds sejam diferentes nos dois modelos. O modelo de Saltzman-Hochstrasser utiliza o número de Reynolds baseado no diâmetro do tubo de saída de ar, enquanto o modelo Lidén-Gudmundsson utiliza o número de Reynolds baseado na seção anular do ciclone. Estes dois modelos foram, portanto, utilizados para estimar o diâmetro de corte das partículas em protótipo de mini-ciclones. Lidén e Gudmundsson (1997) reuniram os dados publicados de quatro tipos diferentes de ciclone. Eles sugeriram a correlação entre  $d_{50}$  e o número de Reynolds do escoamento anular e também criaram uma equação de correlação generalizada pelo método de regressão multi-linear. Um novo parâmetro, que é a relação entre o comprimento do vortex e o diâmetro do corpo do ciclone, foi introduzido no modelo.

A base do protótipo deste trabalho, que é a previsão e validação do funcionamento do miniciclone, foi retirada da pesquisa desenvolvida por Saltzman e Hochstrasser (1983), onde 15 modelos de miniciclones foram construídos para analisar a influência da variação das suas principais dimensões sobre o diâmetro de corte.

A partir de uma análise empírica uma única equação generalizada contendo uma constante adimensional, particular para cada ciclone e chamada de  $K_d$ , representava exatamente os efeitos da vazão no tamanho de corte para todos os 15 ciclones. As curvas ajustadas aos dados experimentais foram encontradas a partir de uma análise de regressão. Para a fabricação dos 15 modelos as principais dimensões foram escolhidas a partir de uma combinação entre três diferentes comprimentos de cone, três diâmetros internos do tubo de saída, e três diâmetros externos do tubo de saída. As outras medidas são fixas para todos os 15 ciclones (estas dimensões estão identificadas na tabela 1, ao lado de uma figura representativa do ciclone com um corte transversal para melhor visualização). A escolha do miniciclone ideal para utilização no protótipo do equipamento do presente trabalho levou em consideração o desvio padrão percentual entre os valores experimentais do diâmetro de corte e curva ajustada obtidos. Entre os 15 miniciclones analisados utilizamos o que apresentou o menor desvio padrão entre os valores experimentais do  $d_{50}$  e a curva ajustada através da modelagem matemática, que foi de 1,5%.

### **3 CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO DE COLETA DE PARTÍCULAS RESPIRÁVEIS**

Um equipamento de coleta de material particulado na fração 2,5 micrômetros é constituído essencialmente pelos sistemas:

- Sistema seletor/separador de diâmetros das partículas;
- Sistema condutor e condicionador;
- Sistema de filtração;
- Sistema de sucção e de controle de vazão;
- Sistema de registro de vazão.

Os sistemas seletores/separadores de tamanho das partículas são predominantemente de dois tipos: separador por impactação e separador inercial ciclônico.

O separador inercial ciclônico, utilizado no equipamento de coleta deste trabalho, possui uma única entrada de gases e tem como princípio básico a geração de um vórtice que separa, do fluxo, as partículas que possuem um diâmetro aerodinâmico equivalente maior do que o diâmetro de corte.

Na impactação uma placa ou disco, impregnado com graxa ou óleo inerte recebe o escoamento carregado com partículas, permitindo a passagem das menores ao sistema condutor e condicionador e retraindo as maiores. A combinação de vazão e dimensões relativas entre dutos e placa coletora é crítica.

Os sistemas condutores e condicionadores muitas vezes são determinados pelos requisitos de restrito equilíbrio e regime permanente necessários ao funcionamento do equipamento sensor no caso de monitores contínuos como do tipo TEOM ( tapered element oscillating microbalance).

Os sistemas de filtração são montados com filtros isolados, em série ou em paralelo, dependendo do objetivo da coleta. Há sistemas com até 05 canais, que recolhem material para análises químicas por vários métodos e para determinação de concentrações. Os filtros

utilizados são de alta qualidade e devem ser compatíveis com o objetivo da coleta. Por exemplo, para análise química por métodos sofisticados, visando concentrações mínimas de elementos de Na a Pb devem ser usados filtros de nylon ou Teflon, em quanto para análises químicas de carbono devem ser utilizados filtros de quartzo.

Na sucção são usadas bombas de vácuo de alta qualidade e estabilidade com o objetivo de manter a vazão constante. Muitos equipamentos usam bombas de vácuo com controle eletrônico para a estabilidade da vazão, pois no caso dos ciclones o diâmetro de corte é fortemente influenciado pela vazão.

O registro de vazão é geralmente digital ou, no caso de amostradores de grandes volumes com cabeça separadora inercial, feito em discos de papel.

### 3.1 CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO

Na Figura 1 é mostrado o diagrama de blocos da concepção do equipamento, mostrando a sequência que é percorrida pelo ar ambiente dentro do equipamento.

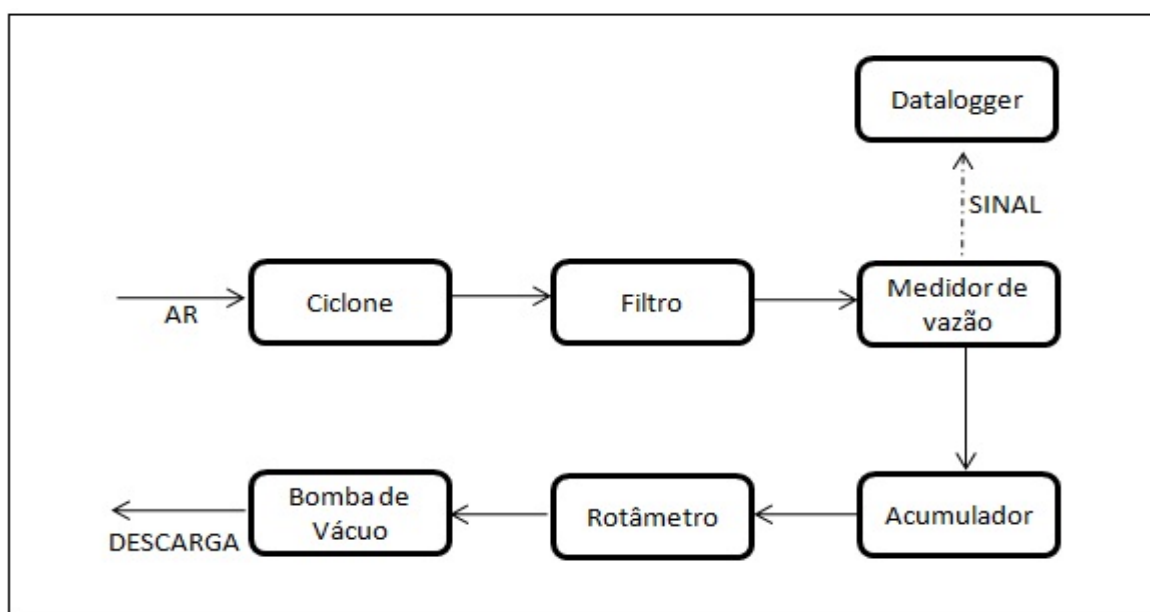


Figura 2 - Diagrama de blocos do equipamento

De acordo com a figura 1, o ar ambiente entra no equipamento através do ciclone, onde as partículas com diâmetro aerodinâmico equivalente superior ao diâmetro de corte serão rejeitadas e direcionadas a um reservatório. Desse modo o fluxo de ar segue no sistema apenas com partículas com diâmetro aerodinâmico equivalente igual ou inferior ao diâmetro de corte, que no referido equipamento é de  $2,5\mu\text{m}$  (PM<sub>2,5</sub>). Os particulados que restaram no fluxo de ar serão capturados no filtro, que vem após o ciclone, a filtragem é feita por uma membrana de Teflon ou Quartzo inserido em um porta-filtro concebido para fácil desmontagem e segura montagem.

A composição química das partículas que ficaram retidas no filtro pode ser determinada possibilitando inclusive, após um estudo mais aprofundado, encontrar quais são as fontes geradoras do particulado.

Após a separação e filtragem da fração respirável a amostra é conduzida a um medidor de vazão que transmite sinais analógicos informando a vazão a cada 5 segundos para o datalogger, que tem a função de registrar as vazões durante todo o experimento. Por meio de conexão infravermelho, os dados armazenados são transferidos para um computador.

Em série à medição contínua da vazão são instalados dois medidores redundantes. O primeiro é um acumulador de vazão que é responsável por registrar o volume total que passou através do equipamento durante o teste. O segundo é um rotâmetro calibrado individualmente que incorpora uma válvula de agulha de alta precisão que foi utilizado para regular a vazão ótima de trabalho do ciclone.

No final do circuito há uma bomba de vácuo, que fornece uma pressão negativa necessária para que o ar percorra todo o circuito do equipamento com a vazão desejada.

Como o rotâmetro e o acumulador são elementos redundantes e podem ser substituídos por uma válvula agulha sem que ocorra perda na eficiência do equipamento, o custo do equipamento é de aproximadamente R\$4.340,00. O custo detalhado por item é mostrado na tabela 1.

Tabela 1 - Preços dos componentes do protótipo

| Equipamento                                          |              |
|------------------------------------------------------|--------------|
| Itens                                                | Preço        |
| Separador Ciclônico (custo de material e fabricação) | R\$ 500,00   |
| Porta filtros                                        | R\$ 40,00    |
| Medidor de vazão                                     | R\$ 1.200,00 |
| Datalogger                                           | R\$ 400,00   |
| Válvula agulha                                       | R\$ 70,00    |
| Bomba de vácuo                                       | R\$ 2.100,00 |
| Ventilador                                           | R\$ 30,00    |
| Total                                                | R\$ 4.340,00 |

### 3.2 ROTEIRO DE CÁLCULOS

Bernald E. Saltzman e John M. Hachstrasser, determinaram equações empíricas que relacionam o diâmetro de corte da partícula com o número de Reynolds, que é dado em função das dimensões dos ciclones. Para os ciclones utilizados no experimento a equação é da forma:

$$\frac{d50}{D} = Kd[Re/1000]^{-0.61} \quad (1)$$

d50 (Diâmetro de corte das partículas)

D (Diâmetro interno do corpo central)

Kd (Constante de proporcionalidade) =  $2,34 \cdot 10^{-4}$

Re ( Número de Reynolds)

Onde o número de Reynolds é da forma:

$$Re_{ar} = \frac{\rho \cdot Di \cdot v}{\mu} = \left[ \frac{4 \cdot \rho}{\mu \cdot \pi} \right] \frac{Q}{Di} \quad (2)$$

$\rho$  (Densidade do ar)

$D_i$  (Diâmetro interno do tubo de saída)

$v$  (Velocidade do tubo de saída) =  $(4 \cdot Q) / (\pi \cdot D_i^2)$

$Q$  (Vazão)

$\mu$  (Viscosidade dinâmica do ar)

Sabendo que para pequenas pressões o fator de compressibilidade é muito próximo de 1, podemos usar a equação de estado dos gases ideais com uma ótima aproximação.

$$Pv = RT \quad (3)$$

$P$  (Pressão Ambiente) = 101,32528 KPa

$v$  (Volume específico)

$R$  (Constante do ar) = 0.286987 KJ/Kg.K

$T$  (Temperatura ambiente)

Como:

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

Substituindo (4) em (3), e isolando a densidade, temos:

$$\rho = \frac{353.064773}{T} \quad (5)$$

Substituindo (5) em (2)

$$Re_{ar} = \frac{449.5360308 \cdot Q}{T \cdot \mu \cdot D_i} \quad (6)$$

Substituindo (6) em (1)

$$d_{50} = 3,81091716.10^{-4}.D.\left[\frac{Q}{T.\mu.Di}\right]^{-0,61} \quad (7)$$

Utilizamos a equação (7) para calcular os diâmetros de corte para cada um dos dois ciclones utilizados nos equipamentos.

Durante os 20 dias de teste as temperaturas médias foram 22,0°C, 22,5°C, 23,0°C e 23,5°C , para as quais foram encontrados os respectivos valores para a viscosidade do ar, conforme a tabela 3; A viscosidade foi determinada por meio de interpolação dos dados ( FOX 2006:720)

Tabela 2 - Valores para viscosidade dinâmica do ar para diversas temperaturas

| Temperatura [°C] | Viscosidade x 10 <sup>2</sup> [g/cm.min] |
|------------------|------------------------------------------|
| 22,0             | 1,0932                                   |
| 22,5             | 1,0950                                   |
| 23,0             | 1,0968                                   |
| 23,5             | 1,0986                                   |

### 3.3 ELEMENTOS CONSTITUINTES DO PROTÓTIPO

#### 3.3.1 Separador ciclônico

a) Características:

Usinados em latão e divididos basicamente em três partes, tampa (onde esta localizada a saída das partículas selecionadas de acordo com o diâmetro de corte), corpo principal e corpo do cone, essas partes foram acopladas com O-rings para a vedação. A tampa foi fixada ao corpo principal com 4 parafusos Allen e o corpo principal é acoplado por rosca ao corpo do cone de acordo com a figura:

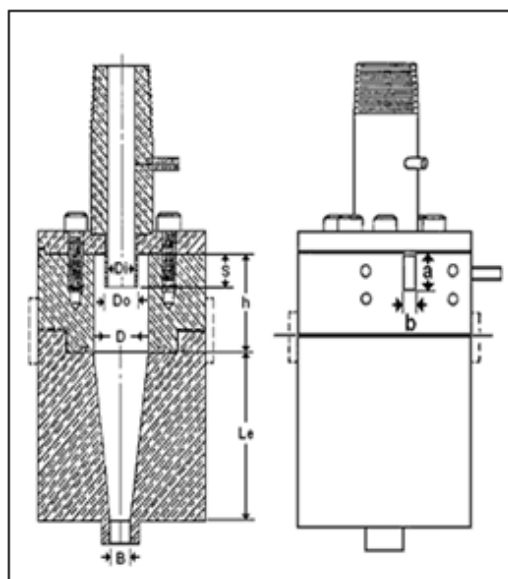


Figura 3 – Características do ciclone  
 Fonte: Bernald E. Saltzman e John M. Hachstrasser (1983)

Tabela 3 - Dimensões dos ciclones

|                                                    | Medidas Realizadas [mm] |           | Dimensão padrão (Bernard e John) [mm] | Erro Absoluto [mm] |           |
|----------------------------------------------------|-------------------------|-----------|---------------------------------------|--------------------|-----------|
|                                                    | Ciclone 1               | Ciclone 2 |                                       | Ciclone 1          | Ciclone 2 |
| Comprimento do cone ( $L_c$ )                      | 47,26                   | 46,14     | 47,62                                 | 0,36               | 1,48      |
| $\phi$ interno do tubo de saída do ar ( $\phi_i$ ) | 9,51                    | 9,56      | 9,52                                  | 0,01               | 0,04      |
| $\phi$ externo do tubo de saída do ar ( $\phi_o$ ) | 11,12                   | 11,09     | 11,11                                 | 0,01               | 0,02      |
| $\phi$ interno do corpo central ( $D$ )            | 18,91                   | 18,86     | 19,05                                 | 0,14               | 0,19      |
| Altura da entrada do ar ( $a$ )                    | 9,61                    | 9,46      | 9,52                                  | 0,09               | 0,06      |
| Largura da entrada do ar ( $b$ )                   | 4                       | 3,89      | 3,81                                  | 0,19               | 0,08      |
| Comprimento do tubo de saída interno ( $S$ )       | 9,33                    | 9,5       | 9,52                                  | 0,19               | 0,02      |
| Altura do corpo central ( $h$ )                    | 27,81                   | 28,06     | 28,58                                 | 0,77               | 0,52      |
| $\phi$ da saída do rejeito do particulado ( $B$ )  | 7,29                    | 7,11      | 7,14                                  | 0,15               | 0,03      |

#### b) Funcionamento

São equipamentos que se utilizam de um campo centrífugo para realizar a separação de particulados com diâmetros diferentes. Uma alimentação, dotada de energia de pressão, é injetada tangencialmente no topo da parte cilíndrica do ciclone, induzindo o fluido a realizar, ao longo de sua trajetória, um movimento rotacional. O movimento rotacional do fluido, ao

longo de seu percurso, gera acelerações centrífugas diretamente atuantes nas partículas presentes no meio, forçando-as a moverem-se em direção à parede do equipamento (SVAROVSKY, 1984).

Considerand Vortex a saída com as partículas selecionadas, e underflow a saída com as partículas rejeitadas, podemos ressaltar que à medida que o fluido adentra à parte cônica, maiores são as componentes de velocidade do fluido (axial, radial e tangencial), já que a seção disponível ao escoamento vai se reduzindo. Uma vez que o orifício de underflow é relativamente pequeno, este permite que apenas parte da suspensão inicialmente alimentada no ciclone seja descarregada. Diante disso, a parcela que não é descarregada no underflow migra para o centro do eixo do equipamento (vortex breakdown), formando um vórtice interno direcionado para cima e com movimento rotacional inverso àquele criado pelo primeiro vórtice.

O escoamento da suspensão em ciclones é complexo e pode ser decomposto em três componentes: axial, radial e tangencial. A componente tangencial desse escoamento mostra-se altamente relevante porque é a responsável pela geração das forças centrífugas e de cisalhamento atuantes em um ciclone. Estas mantêm a parede ausente de acúmulo de sólidos e aquelas (dependentes da posição axial e radial no ciclone) são as diretamente responsáveis pela coleta de uma determinada partícula. A transferência da quantidade de movimento de uma componente para outra é constantemente executada, principalmente quando o fluido se aproxima do orifício de underflow, em que este, com movimento rotacional, vai cedendo energia simultaneamente para as componentes radial e axial (SCHAPEL e CHASE, 1998).

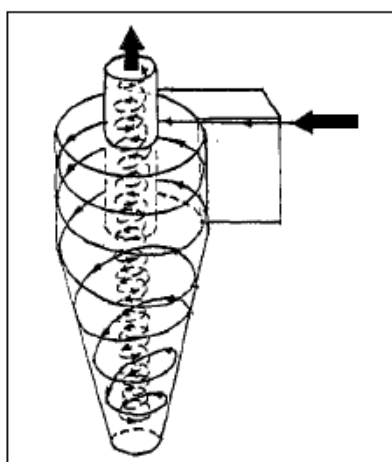


Figura 4- Caminho percorrido pelo ar no interior do ciclone  
Fonte: Bernald E. Saltzman, John M. Hachstrasser (1983)

### 3.3.2 Bomba de vácuo

a) Características:

Fabricante: GAST

Modelo: DOA-V191-AA

Bombas de Vácuo de Diafragma sem óleo

Máximo vácuo 25.5 in Hg

Vazão sem perda de carga: 1.1 CFM

Motor: 115 Volts 60 Hz monofásico potência 1/8 HP

b) Funcionamento:

É um tipo de bomba seca (sem óleo) em que o princípio de funcionamento é bastante similar as bombas rotatórias de pistão sendo o pistão substituído por uma membrana de borracha, algo similar a uma seringa hipodérmica este elemento é o que promove a expansão e compressão necessários para deslocar o ar do sistema para a atmosfera. O diafragma é acionado de modo cíclico por um motor.



Figura 5- Bomba de vácuo

### 3.3.3 Rotâmetro

a) Características:

Rotâmetro 1:

Fabricante: HAAKE MEDINGEN GMBH

Modelo: 95047

Características do flutuador:

- Material: CrNi;
- Massa: 30.45 g;
- Diâmetro: 18.04 mm;
- Volume: 4 cm<sup>3</sup>.

Rotâmetro 2:

Fabricante: HAAKE MEDINGEN GMBH

Modelo: 95042

Características do flutuador:

- Material: CrNi;
- Massa: 22.67 g;
- Diâmetro: 16.04 mm;
- Volume: 2.80 cm<sup>3</sup>.

b) Funcionamento:

O ar desloca-se no rotâmetro da base para o topo, resultando num movimento axial do flutuador. Ao longo do comprimento do tubo existe uma relação entre o diâmetro do flutuador e o diâmetro interior do tubo. O diâmetro do flutuador é fixo ao contrário do tubo interior do rotâmetro que vai aumentando da base até ao topo. Se o fluxo é constante, a diferença de pressão sobre o flutuador iguala o peso efetivo do flutuador e esta “fixa-se” na posição que define o fluxo. Quando o fluxo aumenta também aumenta a força que atua no flutuador. Esta força faz com que o flutuador suba para uma posição mais acima. Quando o fluxo diminui o flutuador muda de posição para baixo. O fluxo é uma função da altura do flutuador. O

flutuador possui também um formato que lhe permite rodar à volta do seu eixo vertical à medida que o fluido atravessa o tubo, permitindo verificar se este encontra-se preso, uma vez que apenas pode rodar estando livre.



Figura 6 - Rotâmetro

### 3.3.4 Datalogger

a) Características:

Registrador Eletrônico - LogBox-DA

Fabricante: NOVUS

Modelo: DA-IP65

b) Funcionamento:

O LogBox-DA é um registrador eletrônico de dados (data Logger) com dois canais de entrada. Os dados adquiridos (gravados) são armazenados na memória do registrador, e posteriormente enviados a um computador para visualização e análise, na forma de tabela ou de gráfico e podem inclusive ser exportados para uso em programas como planilhas

eletrônicas.

O software LogChart-II é a ferramenta utilizada para a configuração do registrador e, ainda, a visualização dos dados. A configuração do registrador define o modo de funcionamento do registrador, incluindo a programação de início e fim das aquisições de dados. Parâmetros como tipo de entrada, intervalos entre aquisições, fator de multiplicação, escala, etc, são facilmente definidos através do software LogChart-II. A interface do software é mostrada na figura 7, onde um gráfico mostrando a variação da vazão ao longo de 24 horas do experimento é mostrado.

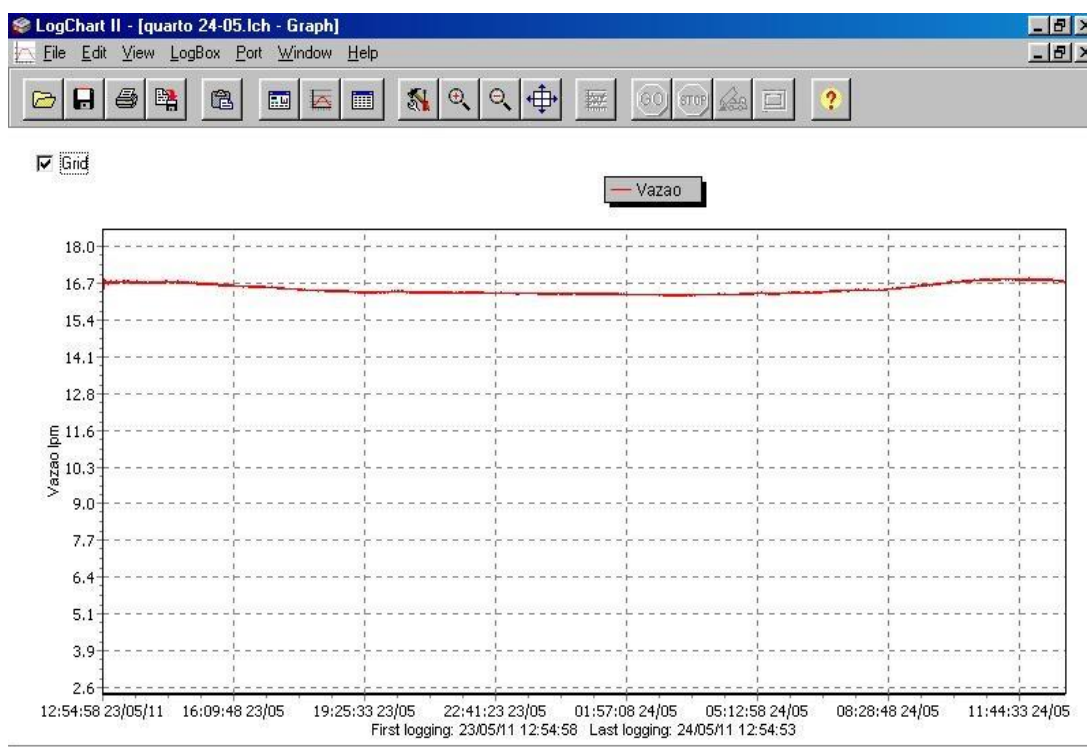


Figura 7- Interface do software LogChart-II.



Figura 8- Datallogger  
Fonte: Novus Automation

### 3.3.5 Medidor de vazão

a) Características:

Fabricante: Dwyer

Modelo: TF 2120

Range de 4 Lpm – 20 Lpm

b) Funcionamento:

A série de Sensores de Fluxo TF são usados em uma ampla variedade na Indústria. Estes sensores usam uma turbina de rotor de detecção electro-óptica para converter vazão em um sinal linear 0-5 Volts para gravação e registro de dados.

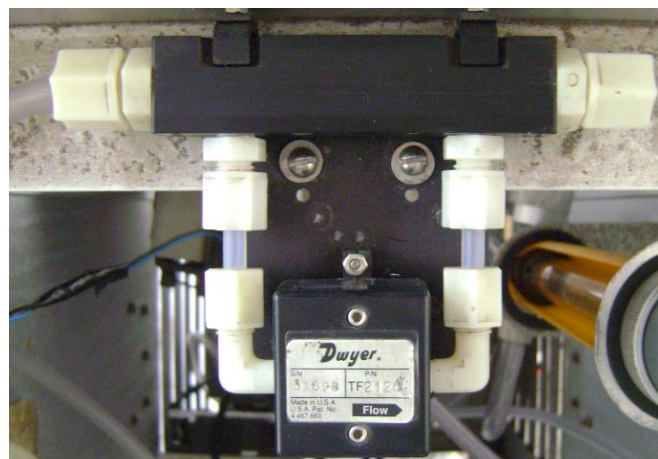


Figura 9- Medidor de vazão

### 3.3.6 Acumulador

a) Características:

Marca: TECNOBRÁS

Modelo: GALLUS 2000-G25

Q<sub>máx</sub>: 4 m<sup>3</sup>/h

Q<sub>mín</sub>: 0.025 m<sup>3</sup>/h

b) Funcionamento:

Baseia-se no movimento dos dois conjuntos de lóbulos internos que são acionados mecanicamente pelo fluido sob pressão que, ao atravessar o corpo do medidor transmite um movimento por meio de um eixo de transmissão a um acoplamento magnético que é acoplado ao registrador, indicando o volume por ele medido. O volume que passa pelo dispositivo de medição é transmitido do acoplamento magnético para o registrador de leitura mecânico, onde pode ter o seu valor totalizado lido pelo operador e/ou usuário.



Figura 10- Acumulador

### 3.3.7 Ventilador

a) Características:

Marca: Ventisilva

Tipo: E 11

115/220 Volts    50/60 Hz    19/15 W

Isolação classe 155° C

Protegido por impedância

b) Funcionamento:

Transfere energia elétrica em energia mecânica através da rotação de um eixo que é acoplado a uma hélice, esse movimento de rotação gera um fluxo de ar, que é direcionado a bomba de vácuo para o resfriamento da mesma.



Figura 11- Ventilador

### 3.3.8 Filtro

a) Características:

Filtro de Teflon:

Marca: Whatman

Diâmetro: 46,2 mm

Descrição: Quimicamente estáveis e inertes. Adequados para aplicações que envolvam solventes orgânicos agressivos e ácidos fortes. A natureza hidrofóbica da membrana também tem aplicações para o ar e esterilização de gás. A membrana pode ser utilizada em temperaturas de até 120 ° C.

Filtro de Quartzo

Marca: Whatman

Descrição: São utilizados para amostragem do ar com gases ácidos, chaminés e aerossóis.

Suportam temperaturas de até 500°C. De acordo com os padrões EPA, é adequado para a maioria das aplicações, mas tem grande eficiência em aplicações que necessitam de uma análise química do particulado.

Diâmetro: 46,2 mm



Figura 12- Filtro

### 3.4 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

A figura 12 mostra a distribuição espacial dos elementos constituintes do protótipo e a figura 13 mostra uma visão geral do protótipo montado.

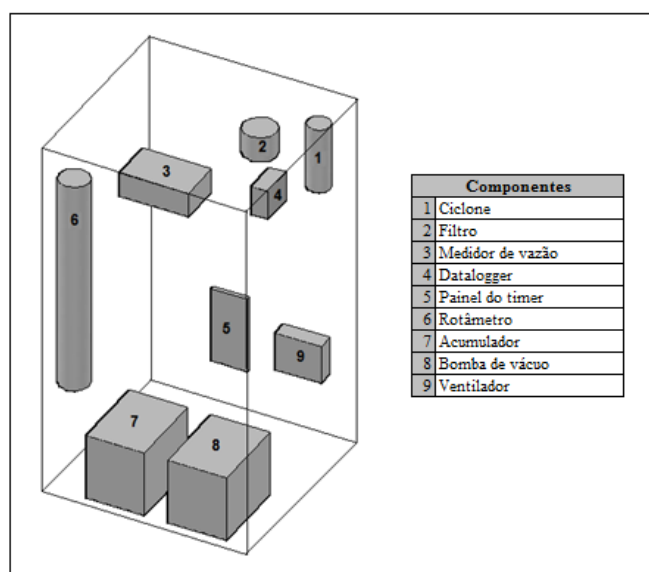


Figura 13- Distribuição espacial



Figura 14- Foto do equipamento

## 4 TESTES

Foram realizados vinte testes, seis utilizando o ciclone 1 e os demais o ciclone 2.

Os filtros usados foram de Teflon e de Quartzo, 10 filtros de cada tipo, pré e pós pesados em balança com resolução de 1 $\mu$ g.

Nos testes foi utilizada uma vazão média de 16,67 L/min, sendo esta a vazão ótima para o ciclone obter um diâmetro de corte de 2,5 $\mu$ m.

Os testes ocorreram entre os dias 17 de maio e 18 de junho de 2011. As datas, bem como as condições meteorológicas são dados nas tabelas 3 e 4. O local de coleta foi uma área coberta de 40 m<sup>2</sup>, com abertura frontal e posterior de 25 m<sup>2</sup> e 15 m<sup>2</sup> respectivamente, na orientação NE – SW.

Tabela 4 - Datas dos testes e condições meteorológicas

| Teflon |            |          |            |          |                   |
|--------|------------|----------|------------|----------|-------------------|
| Testes | Início     |          | Término    |          | Temperatura média |
|        | Data       | Hora     | Data       | Hora     |                   |
| 1      | 17/05/2011 | 13h25min | 18/05/2011 | 13h25min | 23,5°C            |
| 2      | 18/05/2011 | 13h36min | 19/05/2011 | 13h36min | 23°C              |
| 3      | 19/05/2011 | 14h50min | 20/05/2011 | 14h50min | 23°C              |
| 4      | 23/05/2011 | 12h55min | 24/05/2011 | 12h55min | 23°C              |
| 5      | 24/05/2011 | 13h17min | 25/05/2011 | 13h17min | 23°C              |
| 6      | 25/05/2011 | 13h45min | 26/05/2011 | 13h45min | 23°C              |
| 7      | 31/05/2011 | 12h55min | 01/06/2011 | 12h55min | 23°C              |
| 8      | 01/06/2011 | 13h35min | 02/06/2011 | 13h35min | 23°C              |
| 9      | 02/06/2011 | 13h53min | 03/06/2011 | 13h53min | 23°C              |
| 10     | 07/06/2011 | 12h38min | 08/06/2011 | 12h38min | 23°C              |

Tabela 5 - Datas dos testes e condições meteorológicas

| <b>Quartzo</b> |               |             |                |             |                          |
|----------------|---------------|-------------|----------------|-------------|--------------------------|
| <b>Testes</b>  | <b>Início</b> |             | <b>Término</b> |             | <b>Temperatura média</b> |
|                | <b>Data</b>   | <b>Hora</b> | <b>Data</b>    | <b>Hora</b> |                          |
| <b>1</b>       | 19/05/2011    | 14h50min    | 20/05/2011     | 14h50min    | 23°                      |
| <b>2</b>       | 23/05/2011    | 12h55min    | 24/05/2011     | 12h55min    | 23°                      |
| <b>3</b>       | 24/05/2011    | 13h17min    | 25/05/2011     | 13h17min    | 23°                      |
| <b>4</b>       | 25/05/2011    | 13h45min    | 26/05/2011     | 13h45min    | 23°                      |
| <b>5</b>       | 31/05/2011    | 12h56min    | 01/06/2011     | 12h56min    | 23°                      |
| <b>6</b>       | 01/06/2011    | 13h35min    | 02/06/2011     | 13h35min    | 23°                      |
| <b>7</b>       | 08/06/2011    | 13h02min    | 09/06/2011     | 13h02min    | 23°                      |
| <b>8</b>       | 14/06/2011    | 12h10min    | 15/06/2011     | 12h10min    | 22,5°                    |
| <b>9</b>       | 15/06/2011    | 12h23min    | 16/06/2011     | 12h23min    | 22°                      |
| <b>10</b>      | 16/06/2011    | 12h55min    | 17/06/2011     | 12h55min    | 22°                      |

## 5 RESULTADOS

Nas tabelas 5 e 6 são mostradas os valores da vazão média verificada em cada teste, oriundas do acumulador de vazões instantâneas e o diâmetro médio das partículas coletadas, calculadas pela equação (7), mostradas na seção 6.2.

Nas tabelas 7 e 8 são mostradas as massas inicial e final dos filtros, que utilizadas junto com a vazão total se obtém a concentração de particulado. As tabelas são para os filtros de Teflon e de quartzo, respectivamente. A vazão total foi obtida aplicando a regra dos trapézios como método de integração, a partir dos dados obtidos no acumulador de vazões instantâneas.

Tabela 6 - Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão, para vazão e diâmetro de corte, de todos os testes que utilizaram filtros de Teflon

|                  | Vazão[L/min.] |        |       |               | Diâmetro de corte[ $\mu$ m] |        |       |               |
|------------------|---------------|--------|-------|---------------|-----------------------------|--------|-------|---------------|
|                  | Mínima        | Máxima | Média | Desvio Padrão | Mínimo                      | Máximo | Médio | Desvio Padrão |
| <b>Teflon 1</b>  | 16,19         | 16,82  | 16,48 | 1,60E-01      | 2,57                        | 2,63   | 2,60  | 1,54E-02      |
| <b>Teflon 2</b>  | 15,95         | 16,72  | 16,38 | 1,43E-01      | 2,57                        | 2,90   | 2,61  | 1,41E-02      |
| <b>Teflon 3</b>  | 16,05         | 16,73  | 16,35 | 1,56E-01      | 2,57                        | 2,64   | 2,61  | 1,51E-02      |
| <b>Teflon 4</b>  | 16,25         | 16,88  | 16,49 | 1,80E-01      | 2,56                        | 2,62   | 2,60  | 1,71E-02      |
| <b>Teflon 5</b>  | 16,15         | 16,99  | 16,41 | 2,13E-01      | 2,55                        | 2,63   | 2,60  | 2,05E-02      |
| <b>Teflon 6</b>  | 16,02         | 16,99  | 16,34 | 1,80E-01      | 2,55                        | 2,64   | 2,61  | 1,75E-02      |
| <b>Teflon 7</b>  | 16,44         | 17,03  | 16,64 | 1,52E-01      | 2,55                        | 2,60   | 2,58  | 1,43E-02      |
| <b>Teflon 8</b>  | 16,06         | 16,77  | 16,26 | 1,58E-01      | 2,54                        | 2,64   | 2,62  | 1,56E-02      |
| <b>Teflon 9</b>  | 16,25         | 16,85  | 16,47 | 1,78E-01      | 2,56                        | 2,62   | 2,60  | 1,70E-02      |
| <b>Teflon 10</b> | 16,58         | 17,16  | 16,82 | 1,18E-01      | 2,53                        | 2,59   | 2,56  | 1,10E-02      |

Tabela 7 - Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão, para vazão e diâmetro de corte, de todos os testes que utilizaram filtros de quartzo

|                   | Vazão [L/min] |        |       |               | Diâmetro de corte [ $\mu\text{m}$ ] |        |       |               |
|-------------------|---------------|--------|-------|---------------|-------------------------------------|--------|-------|---------------|
|                   | Mínima        | Máxima | Média | Desvio Padrão | Mínimo                              | Máximo | Médio | Desvio Padrão |
| <b>Quartzo 1</b>  | 16,11         | 16,96  | 16,66 | 1,27E-01      | 2,54                                | 2,63   | 2,58  | 1,21E-02      |
| <b>Quartzo 2</b>  | 16,37         | 17,03  | 16,69 | 1,20E-01      | 2,54                                | 2,61   | 2,58  | 1,13E-02      |
| <b>Quartzo 3</b>  | 16,23         | 16,92  | 16,56 | 1,30E-01      | 2,55                                | 2,62   | 2,59  | 1,24E-02      |
| <b>Quartzo 4</b>  | 16,15         | 16,88  | 16,43 | 1,45E-01      | 2,56                                | 2,63   | 2,60  | 1,40E-02      |
| <b>Quartzo 5</b>  | 16,21         | 16,79  | 16,49 | 9,59E-02      | 2,57                                | 2,62   | 2,59  | 9,19E-03      |
| <b>Quartzo 6</b>  | 16,38         | 16,83  | 16,60 | 7,54E-02      | 2,55                                | 2,60   | 2,58  | 7,29E-03      |
| <b>Quartzo 7</b>  | 16,04         | 16,85  | 16,30 | 1,71E-01      | 2,53                                | 2,64   | 2,61  | 1,67E-02      |
| <b>Quartzo 8</b>  | 16,38         | 16,95  | 16,59 | 1,16E-01      | 2,55                                | 2,60   | 2,58  | 1,10E-02      |
| <b>Quartzo 9</b>  | 16,36         | 16,89  | 16,65 | 1,04E-01      | 2,55                                | 2,60   | 2,57  | 9,83E-03      |
| <b>Quartzo 10</b> | 16,33         | 16,77  | 16,58 | 1,12E-01      | 2,56                                | 2,60   | 2,58  | 1,07E-02      |

Tabela 8 - Massa dos filtros, volume total de ar e concentração de particulado, para os filtros de Teflon

| Filtros de Teflon |                    |                  |                |                               |                                         |
|-------------------|--------------------|------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------------|
| Teste             | Massa inicial [mg] | Massa final [mg] | Diferença [mg] | Volume total [ $\text{m}^3$ ] | Concentração [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] |
| <b>1</b>          | 149,636            | 149,848          | 0,212          | 23,69                         | 8,95E-03                                |
| <b>2</b>          | 147,990            | 148,118          | 0,128          | 23,58                         | 5,43E-03                                |
| <b>3</b>          | 148,350            | 148,640          | 0,290          | 23,52                         | 1,23E-02                                |
| <b>4</b>          | 147,186            | 147,503          | 0,317          | 23,74                         | 1,34E-02                                |
| <b>5</b>          | 151,740            | 152,286          | 0,546          | 23,62                         | 2,31E-02                                |
| <b>6</b>          | 145,520            | 146,479          | 0,959          | 23,52                         | 4,08E-02                                |
| <b>7</b>          | 147,580            | -                | -              | 23,88                         | -                                       |
| <b>8</b>          | 152,029            | 152,624          | 0,595          | 23,39                         | 2,54E-02                                |
| <b>9</b>          | 147,948            | 148,560          | 0,612          | 23,71                         | 2,58E-02                                |
| <b>10</b>         | 144,830            | 145,496          | 0,666          | 24,21                         | 2,75E-02                                |

Tabela 9 - Massa dos filtros, volume total de ar e concentração de particulado, para os filtros de Quartzo

| Filtros de Quartzo |                       |                     |                   |                      |                         |
|--------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|
| Teste              | Massa inicial<br>[mg] | Massa final<br>[mg] | Diferença<br>[mg] | Volume total<br>[m³] | Concentração<br>[mg/m³] |
| 1                  | 149,181               | 149,525             | 0,344             | 23,97                | 1,43E-02                |
| 2                  | 150,689               | 151,191             | 0,502             | 23,97                | 2,09E-02                |
| 3                  | 150,866               | 151,111             | 0,245             | 23,84                | 1,03E-02                |
| 4                  | 149,321               | 149,551             | 0,230             | 23,65                | 9,73E-03                |
| 5                  | 151,461               | -                   | -                 | 23,64                | -                       |
| 6                  | 152,111               | 152,360             | 0,249             | 23,82                | 1,05E-02                |
| 7                  | 151,133               | 151,392             | 0,259             | 23,40                | 1,11E-02                |
| 8                  | 149,260               | 149,628             | 0,368             | 23,87                | 1,54E-02                |
| 9                  | 150,484               | 150,946             | 0,462             | 23,96                | 1,93E-02                |
| 10                 | 150,106               | 150,241             | 0,135             | 21,33                | 6,33E-03                |

Os dados da massa do 7º filtro de Teflon e do 5º filtro de Quartzo foram perdidos.

## 5.1 HISTOGRAMAS DO DIÂMETRO DE CORTE

### 5.1.1 Histogramas d50 do Teflon

Nos gráficos 2 a 11 são mostrados os histograma e frequência acumulada dos diâmetros de corte coletados nos filtros de Teflon.

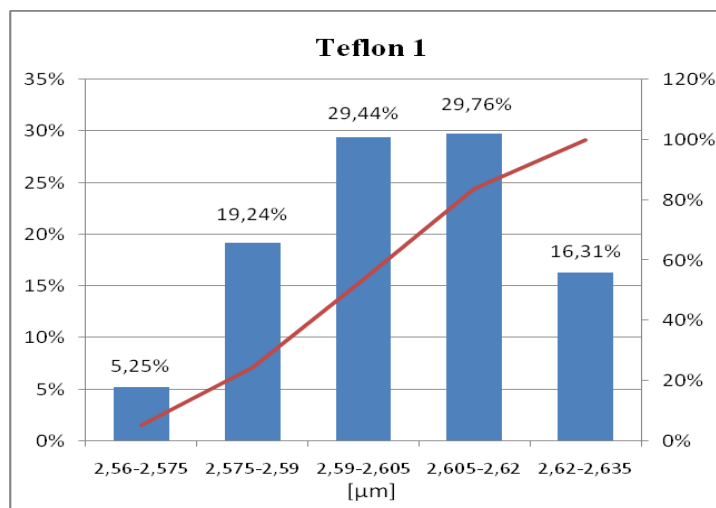


Gráfico 2 - Histograma do diâmetro de corte para o primeiro filtro de Teflon

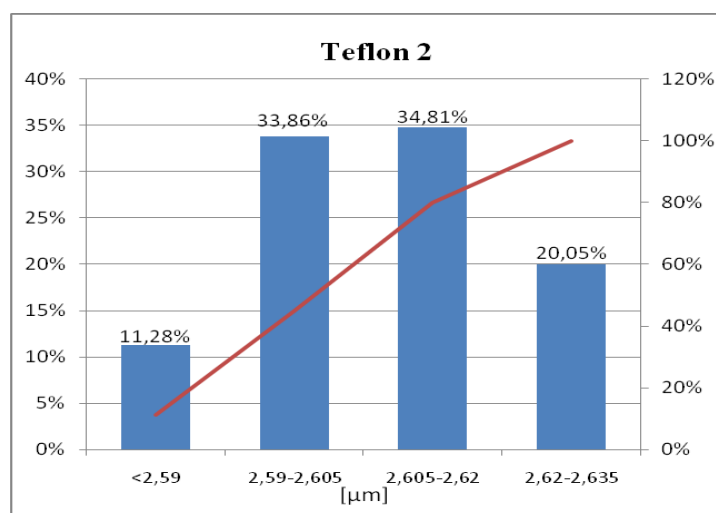


Gráfico 3 - Histograma do diâmetro de corte para o segundo filtro de Teflon

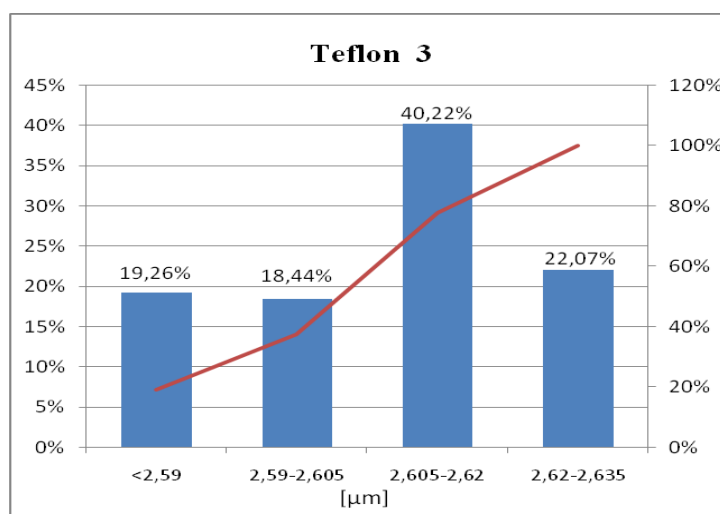


Gráfico 4 - Histograma do diâmetro de corte para o terceiro filtro de Teflon

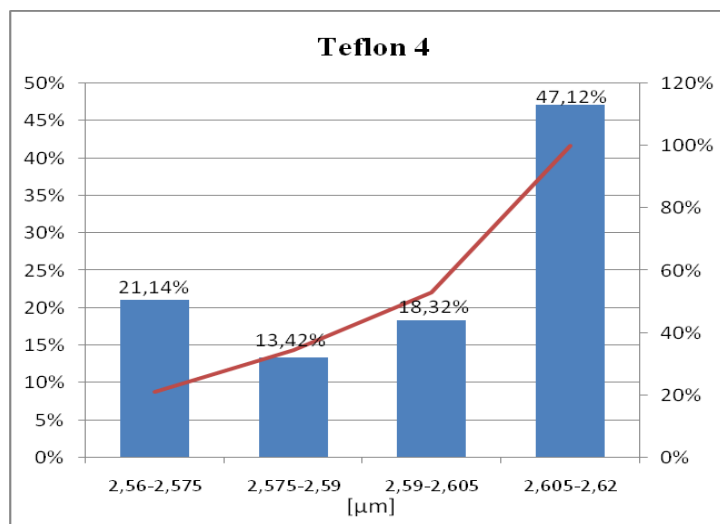


Gráfico 5 - Histograma do diâmetro de corte para o quarto filtro de Teflon

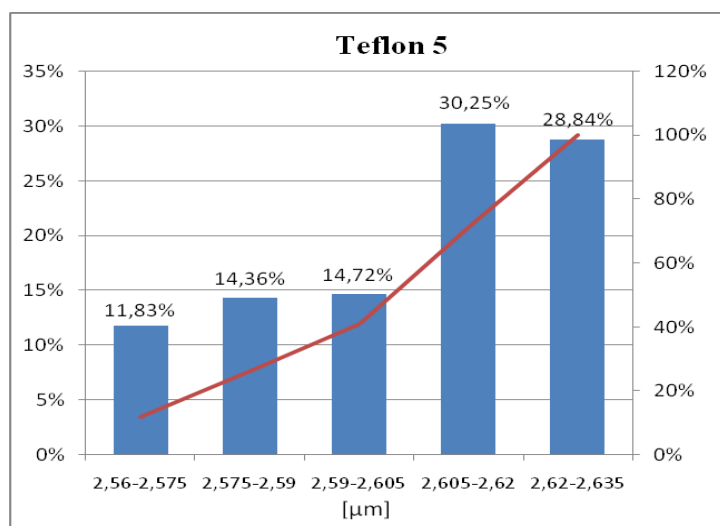


Gráfico 6 - Histograma do diâmetro de corte para o quinto filtro de Teflon

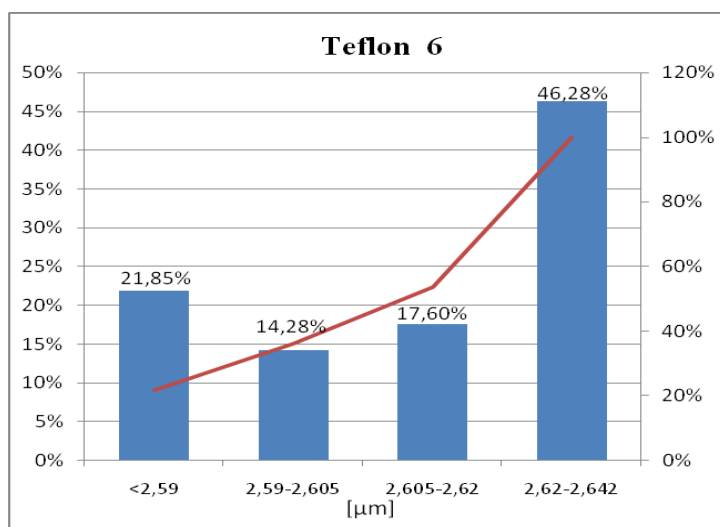


Gráfico 7 - Histograma do diâmetro de corte para o sexto filtro de Teflon

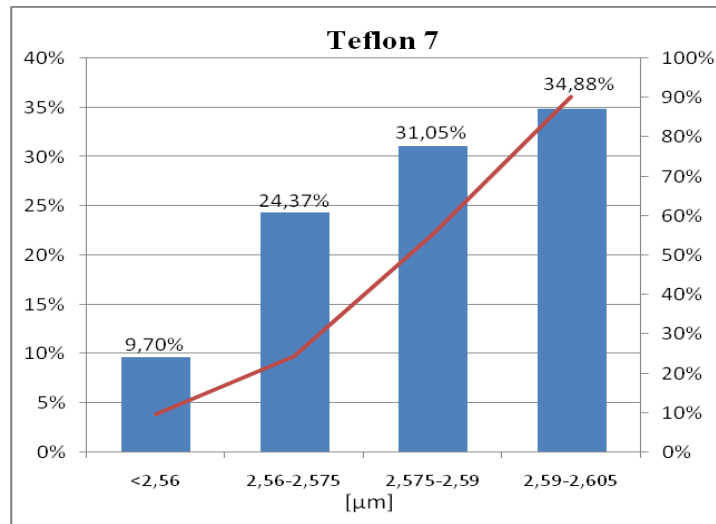


Gráfico 8 - Histograma do diâmetro de corte para o sétimo filtro de Teflon

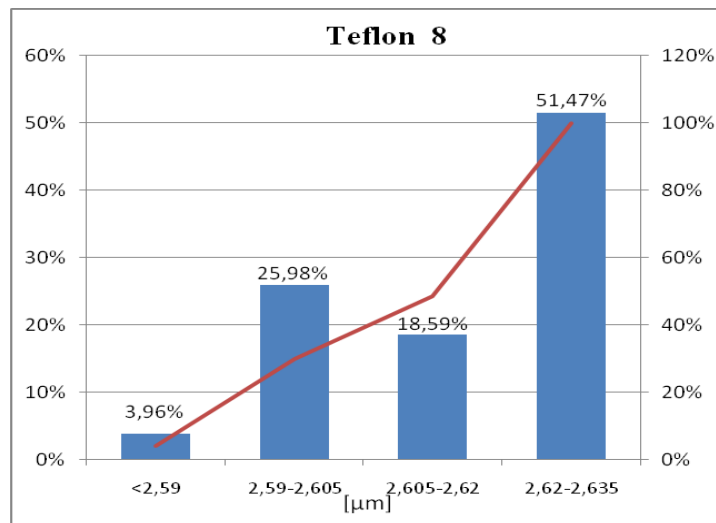


Gráfico 9 - Histograma do diâmetro de corte para o oitavo filtro de Teflon

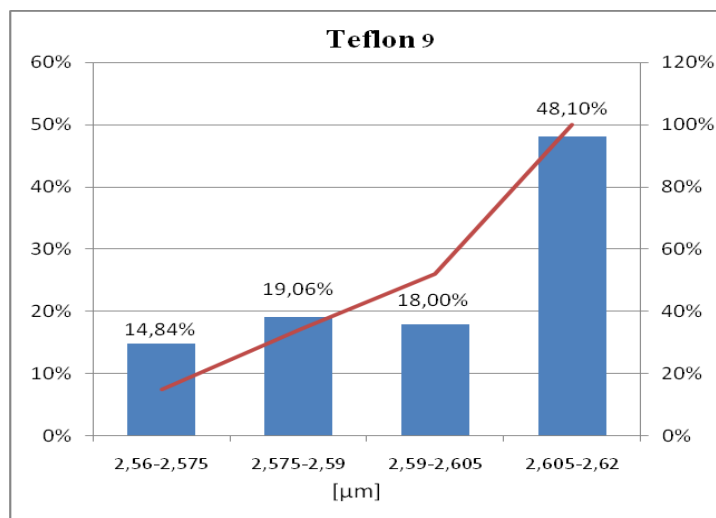


Gráfico 10 - Histograma do diâmetro de corte para o nono filtro de Teflon

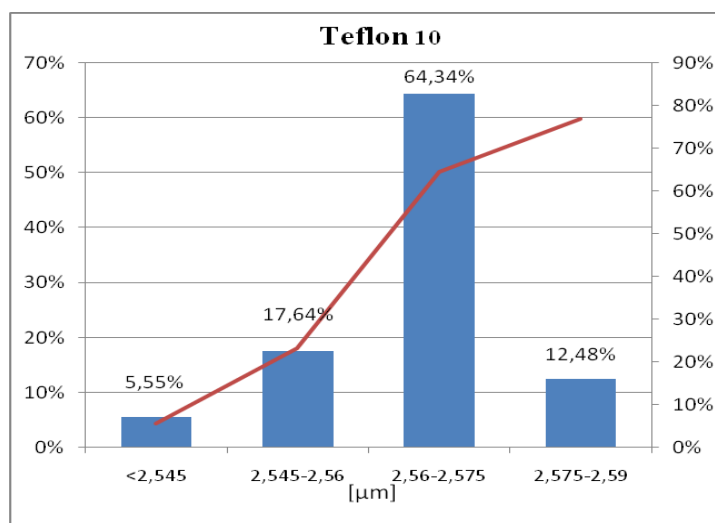


Gráfico 11 - Histograma do diâmetro de corte para o décimo filtro de Teflon

### 5.1.2 Histogramas d50 do Quartzo

Nos gráficos 12 a 21 são mostrados os histograma e frequência acumulada dos diâmetros de corte coletados nos filtros de Quartzo.

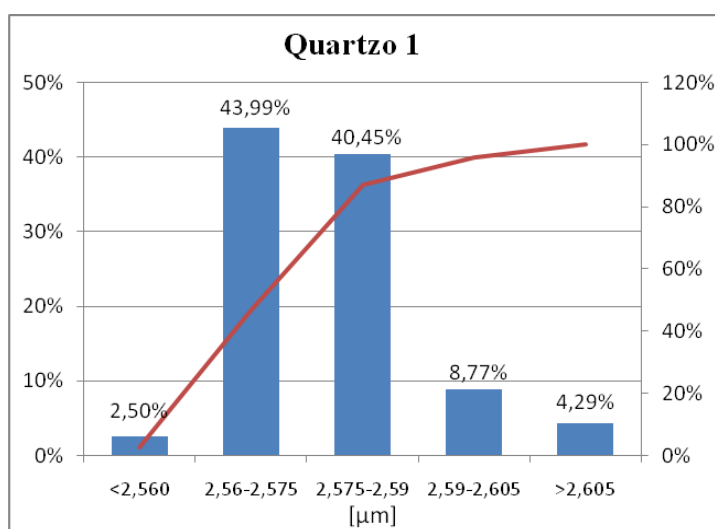


Gráfico 12 - Histograma do diâmetro de corte para o primeiro filtro de Quartzo

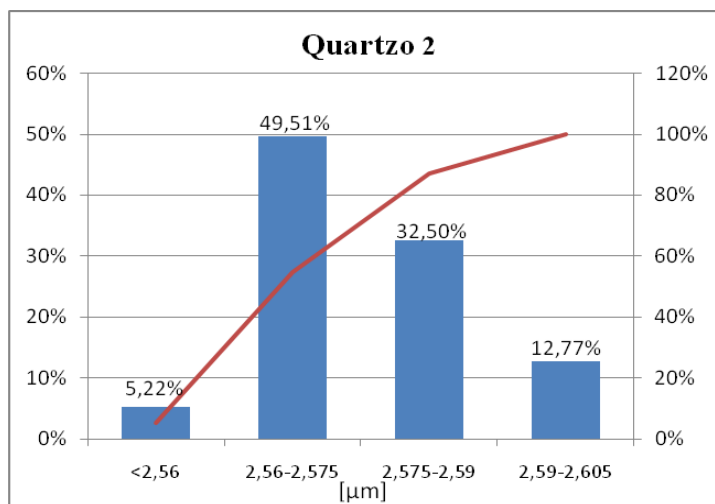


Gráfico 13 - Histograma do diâmetro de corte para o segundo filtro de Quartzo

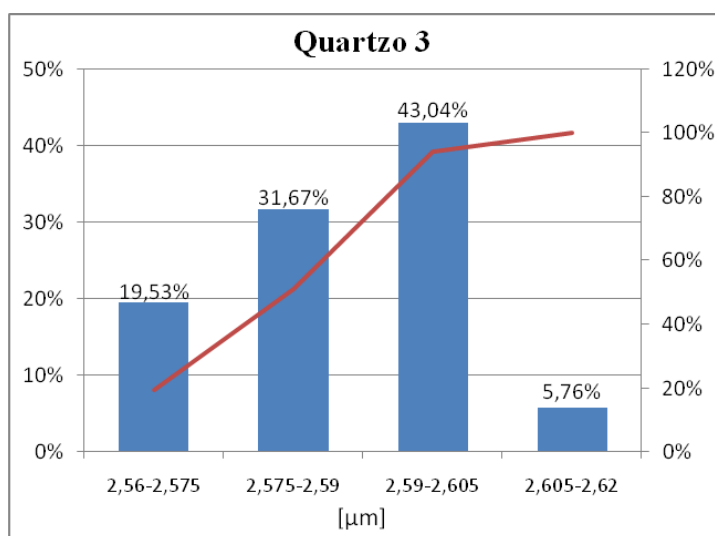


Gráfico 14 - Histograma do diâmetro de corte para o terceiro filtro de Quartzo

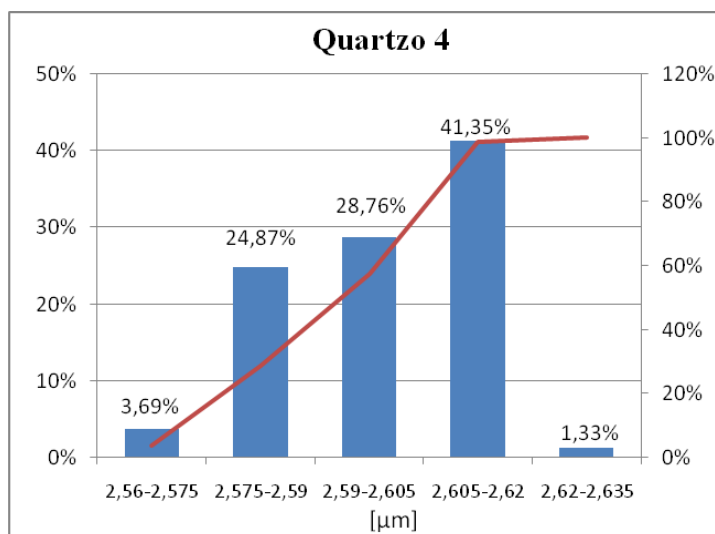


Gráfico 15 - Histograma do diâmetro de corte para o quarto de Quartzo

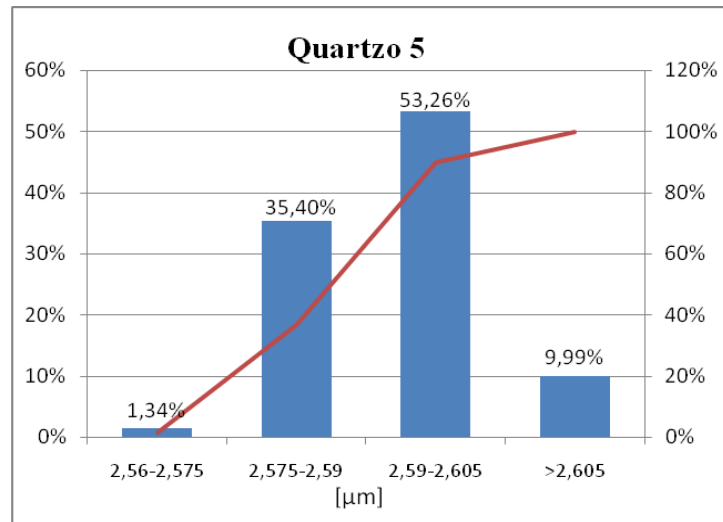


Gráfico 16 - Histograma do diâmetro de corte para o quinto filtro de Quartzo

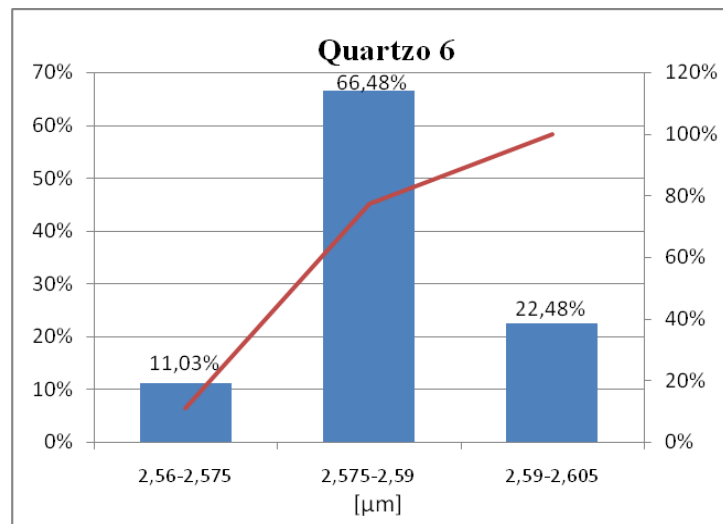


Gráfico 17 - Histograma do diâmetro de corte para o sexto filtro de Quartzo

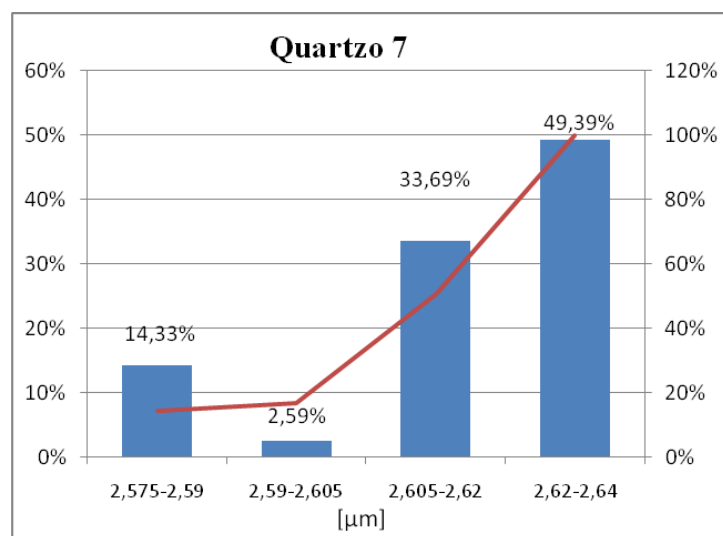


Gráfico 18 - Histograma do diâmetro de corte para o sétimo filtro de Quartzo

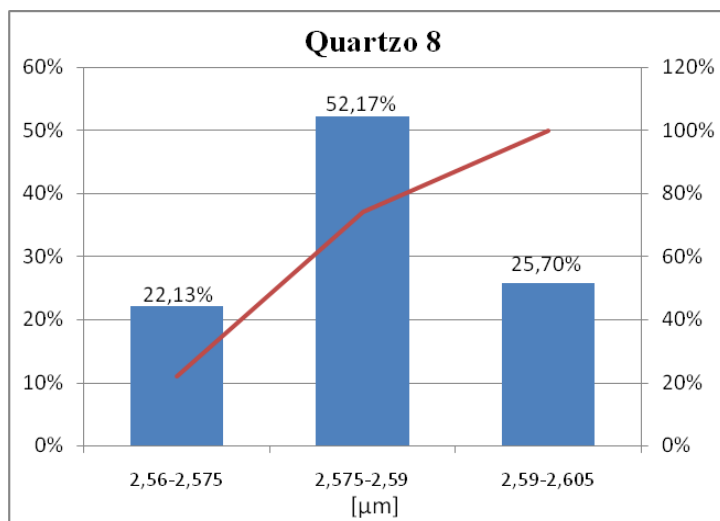


Gráfico 19 - Histograma do diâmetro de corte para o sétimo filtro de Quartzo

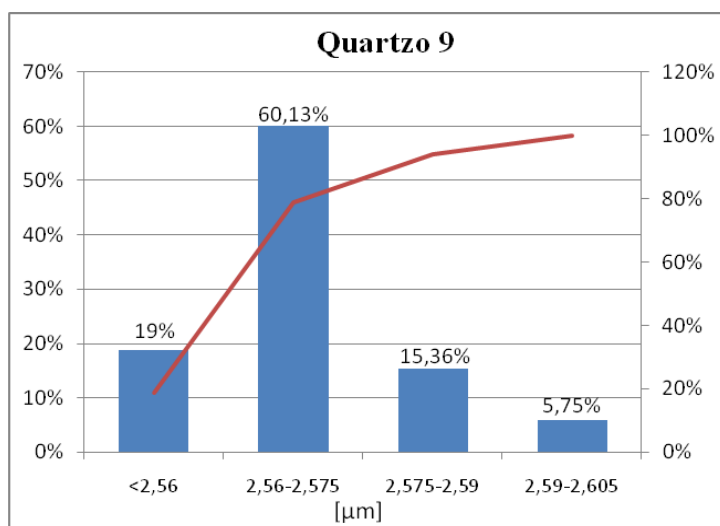


Gráfico 20 - Histograma do diâmetro de corte para o nono filtro de Quartzo

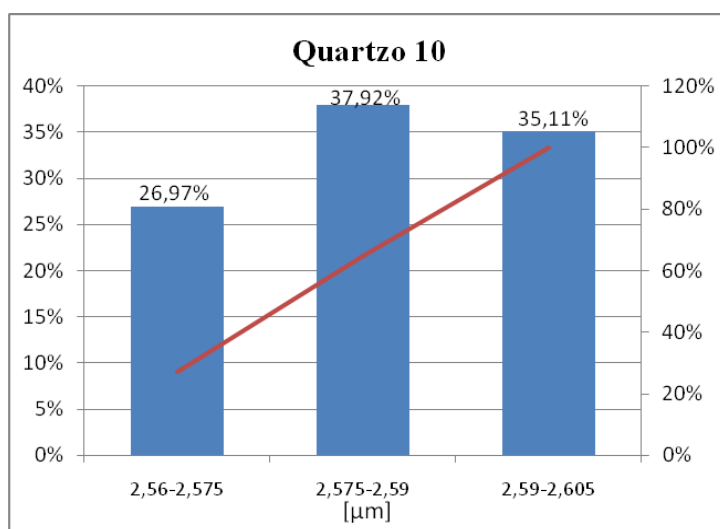


Gráfico 21 - Histograma do diâmetro de corte para o décimo filtro de Quartzo

## 5.2 SÉRIES TEMPORAIS

Para o resultado de séries temporais foram escolhidos 3 testes entre os 10 realizados para cada tipo de filtro. O critério para escolha dos três testes foram os seguintes: o teste que registrou a menor média da vazão, o teste que registrou a maior média da vazão e o teste que registrou um comportamento mediano da vazão. Desse modo, os testes escolhidos foram os relativos aos 8º, 9º e 10º filtros de Teflon e relativos aos 5º, 7º, e 9º filtros de Quartzo.

### 5.2.1 Séries temporais de vazões

Nos gráficos 22 e 23 são mostradas as séries temporais das vazões, obtidas do medidor de vazão, para os filtros de Teflon e Quartzo respectivamente.

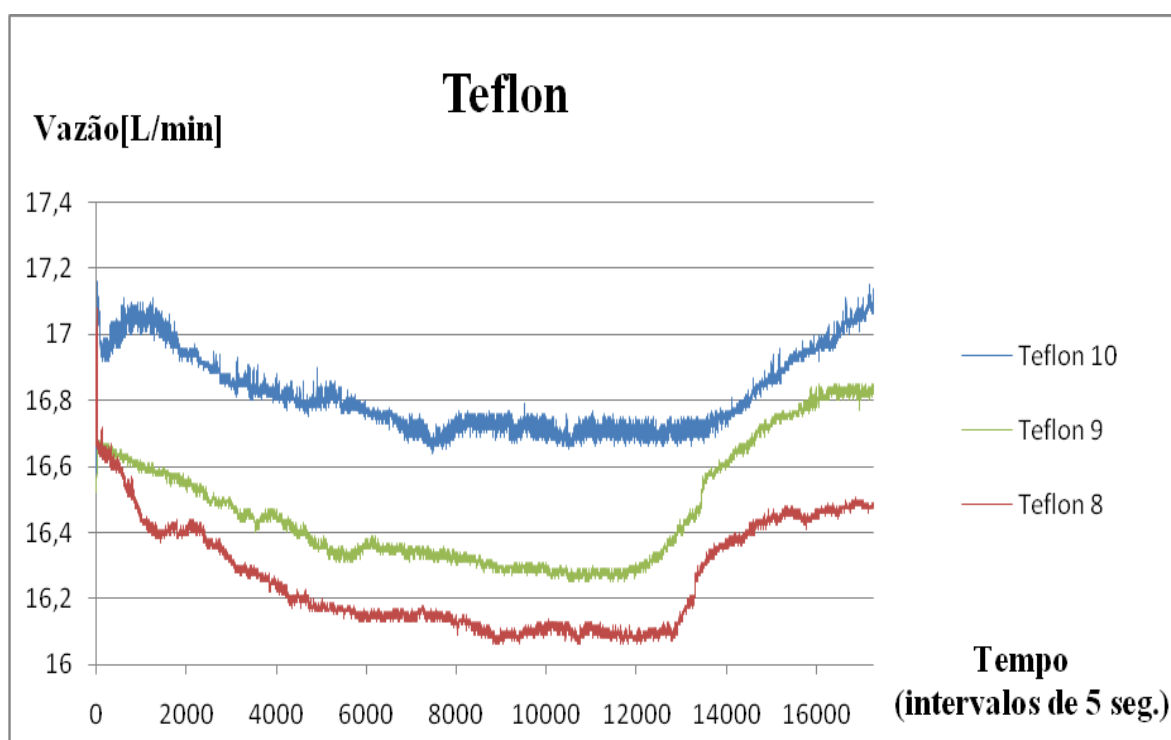


Gráfico 22 - Série temporal das vazões medidas para filtros de teflon

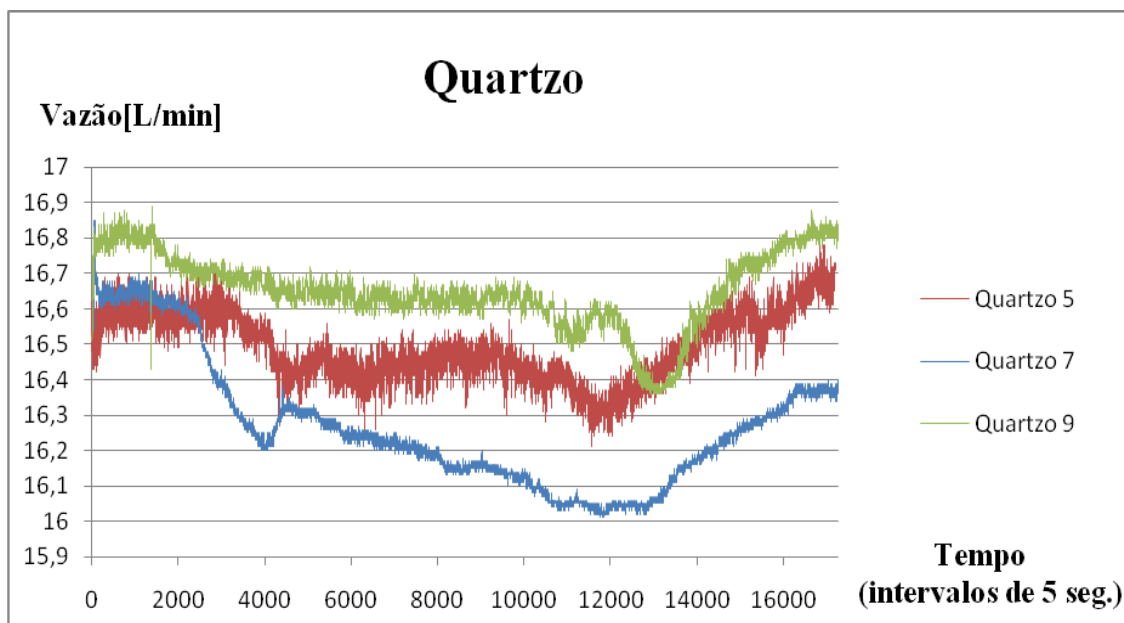


Gráfico 23 - Série temporal das vazões medidas para filtros de quartzo

### 5.2.2 Séries temporais de diâmetros de corte

Nos gráficos 24 e 25 são mostradas as séries temporais dos diâmetros de corte calculados pela equação (7), demonstrada na seção 6.2.

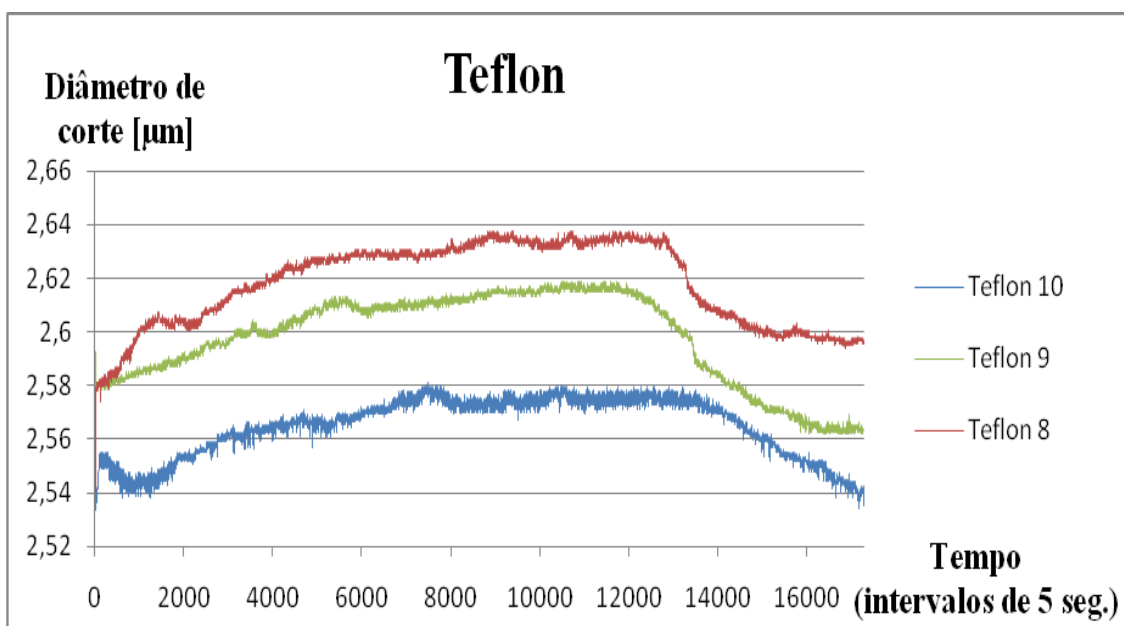


Gráfico 24 - Série temporal dos diâmetros de corte para filtros de teflon

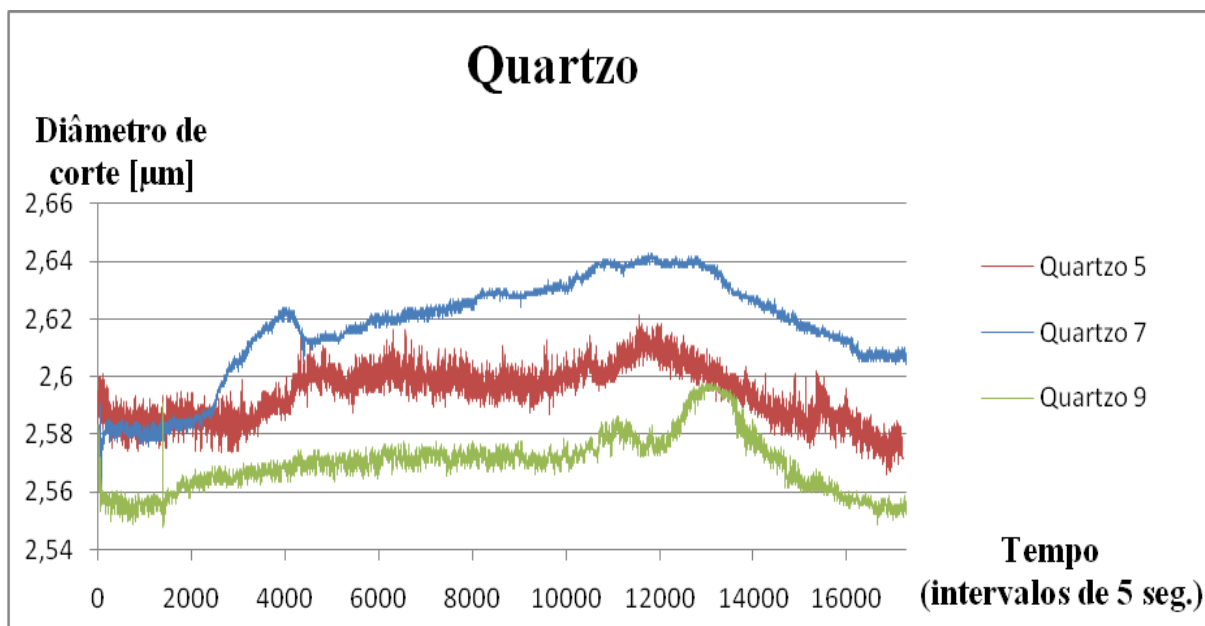


Gráfico 25 - Série temporal dos diâmetros de corte para filtros de quartzo

### 5.2.3 Séries temporais de erros relativos

Nos gráficos 19 e 20 são mostradas as séries temporais dos erros relativos do diâmetro de corte em relação ao diâmetro de corte proposto para o equipamento, que é de 2,52  $\mu\text{m}$ , calculados para os filtros de Teflon e Quartzo respectivamente.

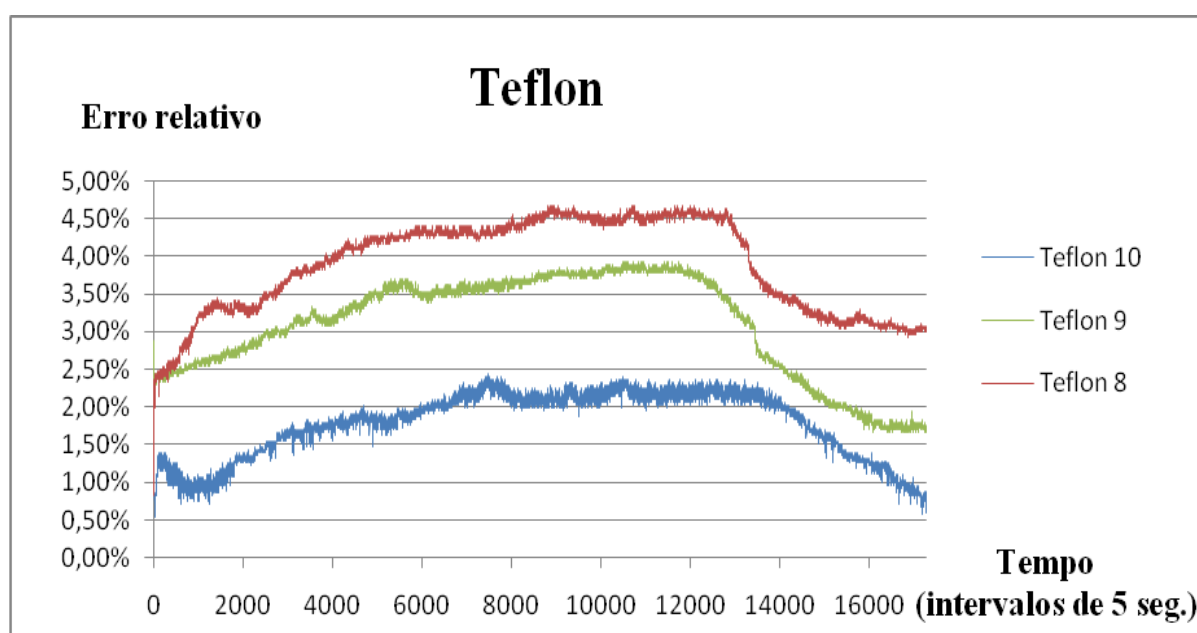


Gráfico 26 - Série temporal do erro relativo entre o d50 e 2,52 $\mu\text{m}$  para filtros de teflon

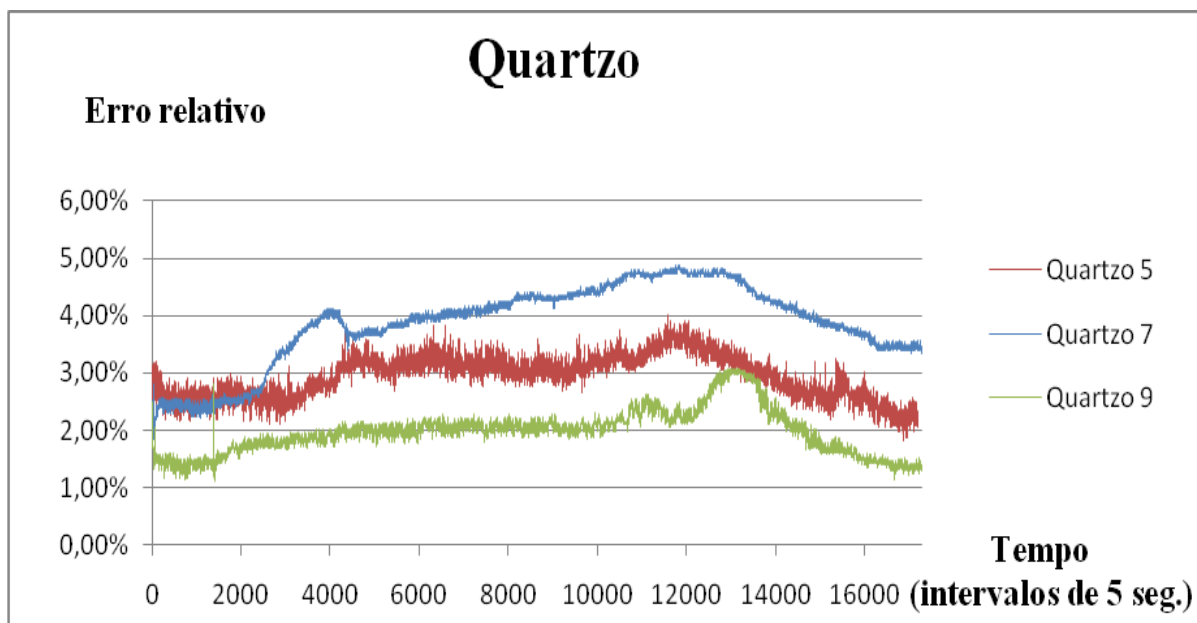


Gráfico 27 - Série temporal do erro relativo entre o d50 e 2,52 $\mu$ m para filtros de quartzo

### 5.3 HISTOGRAMAS DE ERROS RELATIVOS DE DIÂMETROS DE CORTE

Os resultados demonstrados são para os mesmos testes apresentados nas séries temporais foram os relativos aos 8º, 9º e 10º filtros de Teflon e relativos aos 5º, 7º, e 9º filtros de Quartzo.

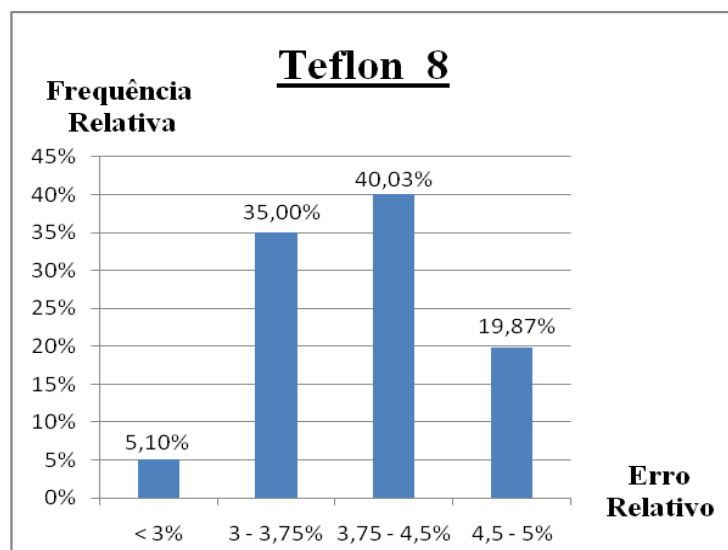


Gráfico 28 - Histograma do erro relativo entre o d50 e 2,52 $\mu$ m para o 8º filtro de teflon

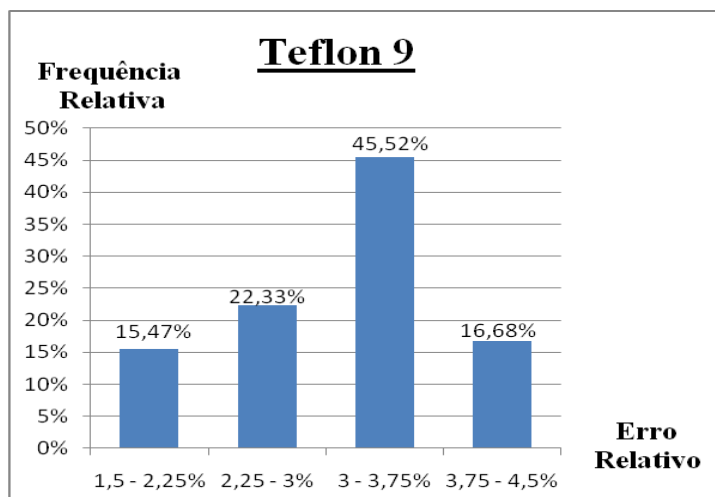


Gráfico 29 - Histograma do erro relativo entre o d50 e 2,52 $\mu$ m para o 9º filtro de teflon

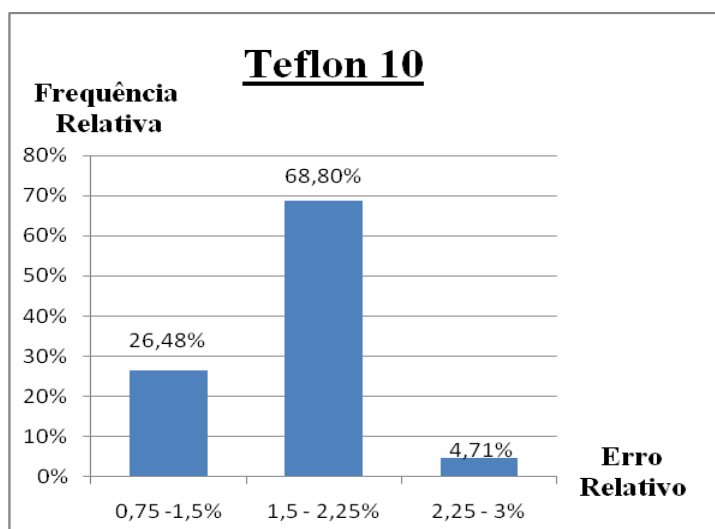


Gráfico 30 - Histograma do erro relativo entre o d50 e 2,52 $\mu$ m para o 10º filtro de teflon

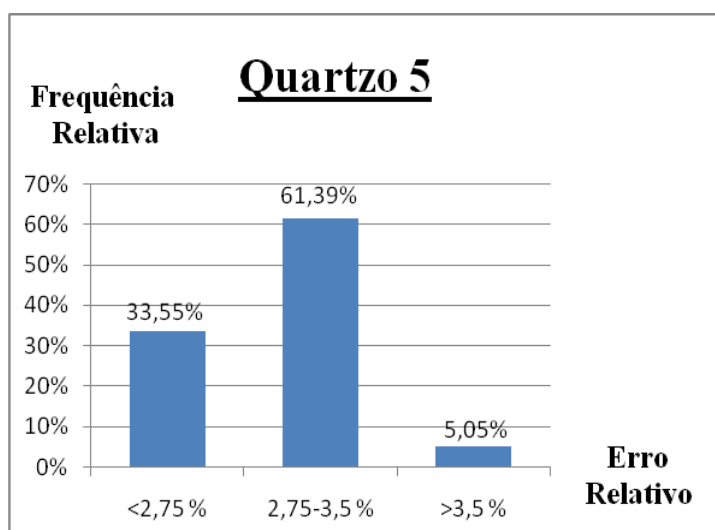


Gráfico 31 - Histograma do erro relativo entre o d50 e 2,52 $\mu$ m para o 5º filtro de quartzo

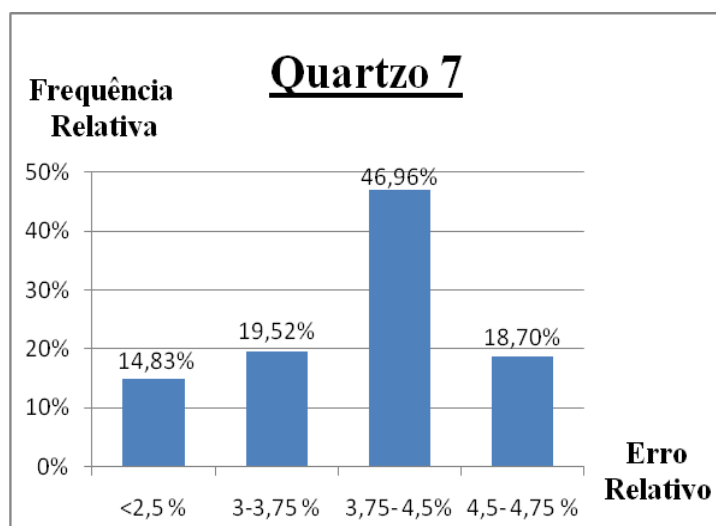


Gráfico 32 - Histograma do erro relativo entre o d50 e 2,52 $\mu$ m para o 7º filtro de quartzo

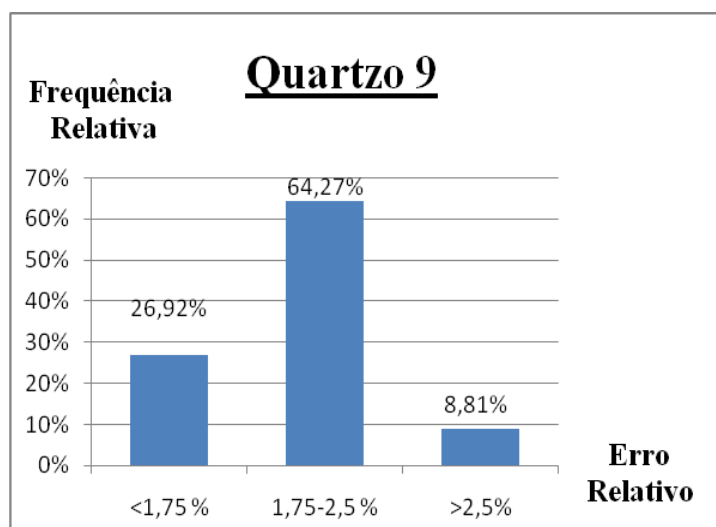


Gráfico 33 - Histograma do erro relativo entre o d50 e 2,52 $\mu$ m para o 9º filtro de quartzo

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De acordo com os histogramas mostrados nos gráficos 2 a 20, o comportamento do diâmetro de corte foi bastante uniforme. Partículas com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a  $2,60\mu\text{m}$  foram maioria em todos os testes.

Os desvios padrão calculados foram baixos, afetando apenas a segunda casa decimal do diâmetro de corte, assegurando uma baixa incerteza nas medições.

Analizando as séries temporais da vazão nota-se um comportamento típico entre os testes. Do início até a metade da duração do teste a vazão diminui progressivamente, e a partir da metade do teste a vazão aumenta progressivamente voltando praticamente à vazão inicial. A possível causa é a grande variação da temperatura que ocorreu durante os testes, foi observada uma variação média de  $7^{\circ}\text{C}$  ao longo de cada teste.

Como o diâmetro de corte é inversamente proporcional à vazão, de acordo com a equação (7) do roteiro de cálculos, o comportamento da série temporal do diâmetro de corte foi o inverso da série temporal da vazão.

Analizando a série temporal do erro relativo entre o diâmetro de corte médio e o padrão observamos que o erro relativo também mantém o comportamento típico da série temporal da vazão, o erro relativo começa baixo e aumenta progressivamente até a metade do teste, onde começa a diminuir progressivamente, retornando praticamente ao erro relativo inicial. Desse modo o equipamento no início do teste, que acabou de ser regulado com a vazão padrão, apresenta um erro relativo baixo. Devido à variação na temperatura e conseqüente variação na vazão, o erro relativo aumenta chegando a um valor máximo aproximadamente na metade do teste, pois as vazões nessa região possuem os maiores desvios comparados a vazão regulada inicialmente.

De acordo com os histogramas do erro relativo entre  $d_{50}$  e  $2,52\mu\text{m}$ , mostrados nos gráficos 28 a 33, pouquíssimas amostras apresentaram um erro relativo maior do que 4%.

Os erros relativos mostram distribuições normais, o que estatisticamente é satisfatório, não

demonstrando a existência de fatores externos que poderiam influenciar o aparecimento de erros não aleatórios.

Nos filtros de Teflon o desvio padrão médio na vazão foi de 16,38%, e o desvio padrão médio de apenas 1,58% no diâmetro de corte. Nos filtros de Quartzo o desvio padrão médio foi de 11,97% na vazão e o desvio padrão médio de apenas 1,15% no diâmetro de corte. Desse modo, apesar do desvio padrão médio ter sido alto na vazão, o desvio padrão do diâmetro de corte foi baixo, mostrando que o equipamento sem controle automatizado da vazão ou temperatura foi capaz de manter o diâmetro de corte bastante uniforme ao longo do teste.

O diâmetro de corte padrão para o equipamento é  $2,52\mu\text{m}$ . Porém foi observado que a média foi de  $2,60\mu\text{m}$  para o filtro de Teflon e  $2,59\mu\text{m}$  para o filtro de Quartzo. Essa diferença ocorreu pois a vazão utilizada nos testes foi a definida por Saltzman e Hochstrassser (1983), e uma diferença significativa ocorreu entre as temperaturas dos testes presentes e as temperaturas que foram registradas nos testes realizados por Saltzman e Hochstrassser (1983). A diferença entre as temperaturas foi de aproximadamente  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Além disso, Saltzman e Hochstrassser (1983) mostraram que existe um desvio padrão de 1,5% entre a modelagem matemática e o comportamento real do ciclone utilizado no protótipo.

## 7 CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi alcançado, mostrando uma eficiência satisfatória do equipamento, pois o desvio padrão médio do diâmetro de corte foi baixo e o erro relativo médio entre o diâmetro de corte e o adotado como padrão foi relativamente baixo. Ainda assim, com pequenos ajustes o erro relativo entre o diâmetro de corte e o adotado como padrão pode diminuir significativamente, quando regulada a vazão padrão para um valor adequado com as condições meteorológicas dos testes e com as dimensões particulares dos ciclones produzidos, obtendo desse modo um diâmetro de corte mais próximo de 2,52  $\mu\text{m}$ .

A proposta de um equipamento de baixo custo foi alcançada, pois o custo total do protótipo foi de R\$ 4.340,00, enquanto o custo dos equipamentos para medição de partículas respiráveis atualmente no mercado, que são importados, é em média R\$60.000,00, justificado pelos componentes caros presentes no equipamento, que são responsáveis por manter a vazão do equipamento constante.

## 8 REFERÊNCIAS

Murray E. Moore; Andrew R. McFarland. **Performance Modeling of Single- Inlet Aerosol Sampling Cyclones.** *Environ. sci. Technol.* 1993, 27, 1842-1848

Bernard E. Saltsman; John M. Hochstrasser. **Design and Performance of Miniature Cyclones for Respirable Aerosol Sampling.** *Environ. Sci. Technol.* 1983, 17, 418-424

Ta-Chih Hsiao; Da-Ren Chen; Sang Young Son. **Development of mini-cyclones as the size-selective inlet of miniature particle detectors.** *Aerosol Science.* 2009. 40. 481 – 491

R. A. Gussman; L. C. Kenny; M; Labickas; P. Norton. **Design, Calibration, and Field Test of a Cyclone for PM1 Ambient Air Sampling.** *Aerosol Science and Technology.* 2002. 36: 361–365

Barth, W. **Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations.** *Brennst. Warme Kraft.* 1956.8, 1–9.

Lapple, C. E. **Gravity and centrifugal separation.** *Ind. Hyg.* 1950. Q., 11, 40–48

Leith, D., & Licht, W. **The collection efficiency of cyclone type particle collectors.** *AIChE Symp.* 1972. Ser., 68, 196–206.

Dietz, P. W. **Collection efficiency of cyclone separators.** *AIChE J.* 1981, 27, 888–892

Mothes, H., & Löffler, F. **Prediction of particle removal in cyclone separators.** *Int. Chem. Eng.* 1988. 28, 231–240.

Lidén, G., & Gudmundsson, A. **Semi-empirical modelling to generalise the dependence of cyclone collection efficiency on operating conditions and cyclone design.** *J. Aerosol Sci.* 1997. 28, 853–874.

SVAROVSKY, L. **Hydrocyclone,** Holt, Rinehart & Winston, Eastbourne, UK. 1984, 198p.

SCHAPEL, S.C; CHASE, G.G. **Modeling of Hydrocyclone Flows with Permeable Walls.** Advances in Filtration and Separation Technology, Vol. 11, p. 33-36, 1998.

FOX. Robert W.; McDONALD Alan T.; **Introdução a Mecânica dos Fluidos.** 6 ed. Brasil. 2006

**NOVUS AUTOMATION.** Products. Disponível em: <<http://www.novusautomation.com>>. Acesso em: 20 junho 2011.

**DWYER INSTRUMENTS, INC.** Table of Contents Series. Disponível em: <[http://www.dwyerinst.com/Products/Product.cfm?Group\\_ID=8](http://www.dwyerinst.com/Products/Product.cfm?Group_ID=8)>. Acesso em: 20 junho 2011.

**WHATMAN.** Membrane filter. Disponível em: <[www.whatman.com](http://www.whatman.com)>. Acesso em: 21 junho, 2011

**GAST** a unit of index corporation. Vacuum pump. Disponível em: <[www.gastmfg.com/pdf/diaphragm/specsht/doadol.pdf](http://www.gastmfg.com/pdf/diaphragm/specsht/doadol.pdf)>. Acesso em: 21 junho 2011

**WEATHER,** canal do tempo. Disponível em: < <http://br.weather.com/> >. Acesso em: 18 junho 2011