

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO, CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DE UM DOSADOR DE POEIRA  
PARA ENSAIOS DE ELEMENTOS FILTRANTES

por

LEONARDO ZIMMER

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre  
2009



**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

**Escola de Engenharia**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DE UM DOSADOR DE POEIRA  
PARA ENSAIOS DE ELEMENTOS FILTRANTES**

por

**LEONARDO ZIMMER**

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A  
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

***BANCA EXAMINADORA:***

Prof. Dr. Horácio Antônio Vielmo  
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey  
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Bardo Ernst Ernst Josef Josef Bodmann  
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre 2009

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a minha família e namorada pela paciência e apoio.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Paulo Smith Schneider* que aconselhou os melhores caminhos à trilhar.

ao Departamento de Engenharia Química, em particular aos professores Nilson Romeu Marcílio, René Lúcio Rech , Celso Martins Brisolara e Marcelo Godinho, e colegas Cleiton Bittencourt da Porciúncula e Letícia Corbini pelo apoio e colaboração.

ao Laboratório de Estudos Térmicos e Aerodinâmicos (LETA), em particular ao *Técnico João Batista da Rosa*.

ao Laboratório de Mecatrônica e Controle (LAMECC), em particular ao professor Dr. Eduardo Andre Perondi e ao Mestre Serguei Nogueira da Silva.

ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) do Departamento de Materiais por toda a cooperação demonstrada.

ao CNPq pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento deste trabalho.

à empresa LIBRACOM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, em especial à Lauri Valdemar Krug pelo apoio e colaboração.

E, por fim, aos amigos e colegas pelo companheirismo e amizade.

*“Que ninguém se engane, só se consegue a simplicidade através de muito trabalho.”*  
*Clarice Lispector*

ZIMMER, L. **Projeto, construção e calibração de um dosador de poeira para ensaios de elementos filtrantes**. 2009. 26f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

## **RESUMO**

O desenvolvimento de novos filtros de passagem de ar para atender as mais diversas exigências de projeto e ambientais é um grande desafio. Para o completo estudo das características projetuais de filtros são necessários simulações e experimentos em bancada. Assim, esse trabalho relata o projeto, a construção e calibração de um dosador de poeira para avaliação de filtros em bancada. O dosador usa o método de transporte por rosca transportadora. Com o mesmo, a uma rotação de 6,1RPM e com um particulado com uma densidade aparente de  $275\text{kg/m}^3$ , é possível conseguir taxa mássica constantes de 840,7 mg/min com uma incerteza de 5,6%, com 95% de confiança. Segundo os resultados encontrados, o dosador opera de forma constante e repetitiva, com confiabilidade e atende às necessidades do projeto de avaliação de filtro. Além de descrever todos os processos de desenvolvimento do equipamento, são descritas as dificuldades e as soluções encontradas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dosador de poeira, particulado, rosca transportadora, avaliação de filtros, testes em bancada.

ZIMMER, L. **Project, construction and calibration of a dust feeder for filter elements tests.** 2009. 26f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

## **ABSTRACT**

The development of new air filters to meet with the diversity of requirements of engineering projects and environment laws it is a great challenge. In order to have a complete study of project filter features, simulation and bench test are necessary. Therefore, this work reports the project, the construction, and the calibration of a dust feeder used to evaluate filters. The feeder uses the screw conveyor method. Operating in 6,1RPM and using a 275kg/m<sup>3</sup> bulk density particulate, is possible to achieve constant mass flow rate of 840,7mg/min with a measurement uncertainty of 5,6%, with 95% of confidence. According to results, the dust feeder works constantly and repeatedly, with confidence and meets the needs of the validation air filter project. Apart from describing every development steps, the difficulties and the solutions found are also reported in this work.

**KEYWORDS:** Dust feeder, particulate, screw conveyor, air filter validation, bench test,.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>2</b>
2.1.	TIPOS DE DOSADORES .....	2
2.1.1.	Método Pneumático .....	2
2.1.2.	Método Disco Girante.....	3
2.1.3.	Método Rosca Transportadora.....	3
2.1.4.	Método Vibratório .....	4
<b>3.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>4</b>
3.1.	INFLUÊNCIAS NO TRANSPORTE DO MATERIAL. ....	4
3.1.1.	Umidade.....	4
3.1.2.	Fluidez .....	5
3.1.3.	Forças de Van der Waals .....	5
<b>4.</b>	<b>APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>5</b>
<b>5.</b>	<b>PROJETO DO DOSADOR .....</b>	<b>7</b>
<b>6.</b>	<b>PARTICULADO .....</b>	<b>8</b>
<b>7.</b>	<b>CALIBRAÇÃO.....</b>	<b>9</b>
7.1.	BANCADA DE CALIBRAÇÃO DO DOSADOR .....	9
7.2.	PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO.....	10
<b>8.</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>11</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>15</b>
<b>10.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>16</b>
<b>11.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....</b>	<b>16</b>
	<b>APÊNDICE A – PROJETO DO DOSADOR.....</b>	<b>17</b>
	<b>APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DOS MOTORREDUTORES.....</b>	<b>18</b>
	<b>APÊNDICE C – BANCADA DE CALIBRAÇÃO.....</b>	<b>19</b>

## 1. INTRODUÇÃO

De frente das exigências ambientais que estão cada vez mais rígidas, desenvolver processos industriais mais limpos se torna uma obrigação. Isso acarreta em estabelecer processos de combustão, quando usados, mais eficientes e também a correta eliminação de seus resíduos, incluindo os gases nocivos e materiais particulados gerados.

Nesse sentido, o Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul está desenvolvendo um sistema de tratamento térmico de resíduos sólidos da indústria coureiro-calçadista por gaseificação de biomassa, na cidade de Dois Irmãos, RS, com o intuito adicional de gerar energia, tanto térmica quanto elétrica. A gaseificação gera gases combustíveis que são queimados, no caso, em uma turbina a gás, gerando assim energia. Os gases gerados posteriormente à queima são tratados e filtrados respeitando os limites de particulados e gases nocivos liberados ao meio ambiente conforme a legislação do CONAMA 316-02.

Os principais compostos formados no processo de gaseificação são monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e nitrogênio (N<sub>2</sub>), bem como alcatrão, particulados, conforme Bridgwater, apud Vilas Bôas de Sales et al, 2006, e outros componentes químicos proveniente da biomassa. O gás produzido, a partir da gaseificação, pode conter impurezas como cinzas volantes, alcatrão, amônia e gás cianídrico, dependendo do tipo de tecnologia empregada, podem causar graves problemas durante a operação dos equipamentos que utilizam esse gás ( Hasler e Nussbaumer, apud Vilas Bôas de Sales et al, 2006). Para evitar danos à turbina, especialmente a abrasão, e para aumentar o desempenho do sistema, faz-se necessária a filtragem desses gases antes de serem queimados neste equipamento. Como o processo de gaseificação gera gases a alta temperatura, entre 500 e 1100°C, necessitam-se filtros que operem a essa faixa de temperatura. A utilização de filtros de manga de feltro torna-se inviável devido à alta temperatura e filtros de cerâmica, além de possuírem alto custo, implicam em grande perda de carga no sistema ao longo de seu funcionamento. O Departamento de Engenharia Química propôs a utilização de filtro com meio filtrante granular para esse fim. Conforme Yang e Zhou (2007), filtros de leito granular são atrativos para filtração de gases quentes devido ao baixo custo de construção e operação, alta confiabilidade em alta temperatura e grande potencial para remoção simultânea de sólidos e gases contaminantes através do uso de meios filtrantes que reagem quimicamente.

O Departamento de Engenharia Química inicialmente optou pela construção de um modelo de filtro de esferas de vidro em que operasse com ar em condições de temperatura e pressão ambientes, para a avaliação dos principais parâmetros de operação, visto também que esse meio filtrante tem tamanho de partícula controlado, facilitando o modelamento matemático e sua limpeza e manuseio. A avaliação desse filtro se dá juntamente com o Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, financiados pela Rede Carvão do CNPq.

Um modelo deste filtro está sendo construído no Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos, LETA, da Engenharia Mecânica.

Assim, este trabalho tem como objetivo projetar, construir e calibrar um dosador de poeira para o estudo de filtros de gases em bancada, o qual deverá ser capaz de dosar taxas mássicas de particulado superiores a 140mg/m<sup>3</sup> no sistema sendo que a vazão de ar é de 144m<sup>3</sup>/h. Isso representa taxas mássicas de particulado superiores a 20g/h. O equipamento deverá operar com taxas constantes e com confiabilidade. Ele será calibrado para uma faixa de uso, com um tipo de poeira e poderá ser usado posteriormente com mais de um tipo de material particulado e com outras taxas mássicas desde que seja calibrado seguindo os procedimentos aqui referenciados.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. TIPOS DE DOSADORES

Os dosadores são equipamentos que transportam material de um reservatório para um local determinado numa determinada taxa. Esta operação pode ser realizada por diferença de pressão, como utilizado em sistemas pneumáticos; por forças de atrito, como em sistemas de rosca transportadora; por vibração, como em *shakers*; ou a utilização de mais de um método ao mesmo tempo. A determinação da taxa de material dosado pode ser realizada por medição do volume ou peso de material que o equipamento dosa em certo tempo. O método mais preciso e confiável ainda é a pesagem por balança. Entretanto, o método volumétrico é mais conveniente e rápido que a pesagem, assim esse tem sido mais usado. A incerteza de medição do volume dosado é gerada pela variação da densidade do pó. A densidade aparente de um pó é afetada pelas propriedades da partícula, assim como pelas condições ambientais.

Atualmente encontram-se vários tipos de dosadores de poeira e os principais métodos utilizados são descritos abaixo.

#### 2.1.1. Método Pneumático

Este método faz uso de ar em depressão para preencher uma câmara de volume conhecido em um leito de particulado. Após o enchimento da câmara, esta é deslocada para o ponto de descarga e com o uso de ar comprimido, invertendo o fluxo de ar, o material é injetado no sistema de transporte.

A Figura 2.1 mostra um sistema que usa esse método desenvolvido por Pohořelý et al (2004).

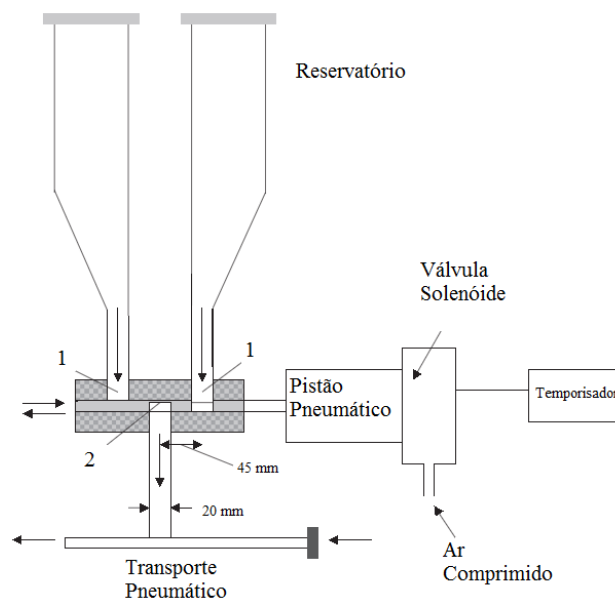


Figura 2.1. Sistema que usa um tipo de câmara deslizante e ar comprimido, adaptado de Pohořelý et al (2004).

No sistema proposto por Pohořelý, o pó sofre a ação da gravidade nos dois reservatórios, mostrado em 1, para encher um volume conhecido, em 2, de cada vez. O pistão pneumático alterna a sucção de cada volume. Esse sistema dosa um volume conhecido em tempos intercalados.

Na literatura, encontram-se registros de dosagem da ordem de 0,5 a 10mg/dose, podendo atingir grandes vazões em modelos industriais.

### 2.1.2. Método Disco Girante

Tal método se baseia em girar um disco com uma ranhura de volume conhecido. Um reservatório cilíndrico despeja o particulado somente na ranhura. Após, esse volume é aspirado por um sistema de transporte e é injetado no local desejado.

A Figura 2.2. mostra o conceito proposto por Reist e Taylor (2000).

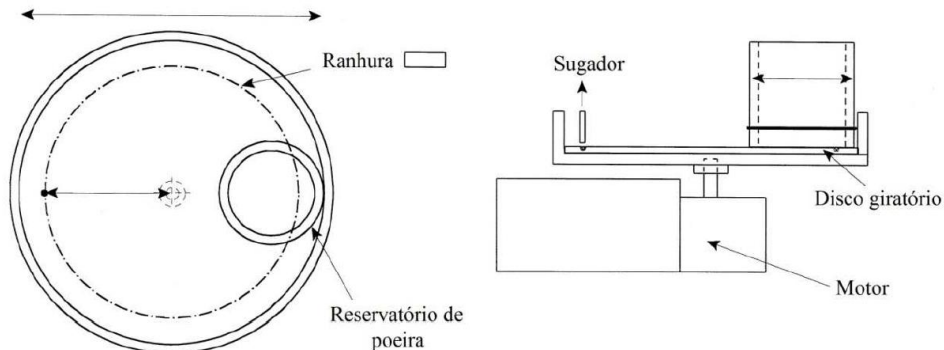


Figura 2.2 - Método Disco Girante, adaptado de Reist e Taylor (2000).

O motor faz o disco girar num sentido e o referido disco gira o reservatório de poeira que está fixo pelo seu eixo no sentido oposto. Assim, a poeira é despejada na ranhura por atrito e vibração. Após a poeira é succionada pelo sugador.

O sistema desenvolvido por Reist e Taylor, pode alcançar taxas mássicas de 100 mg/min até 50 g/min dependendo do particulado.

O sistema foi repetido por Dall'Agnol (2008) e, de acordo com a necessidade, encontrou-se uma taxa mássica de 3,95 g/min, com um desvio padrão de 0,1197 g/min. Supondo-se que esse desvio padrão é um sigma, dois sigma significariam 6% de incerteza. O método usado para a validação dos resultados foi o sistema de filtragem, pesando o filtro antes e depois da injeção.

### 2.1.3. Método Rosca Transportadora

Este método se baseia na utilização de uma rosca que gira ao fundo de um reservatório transportando uma certa quantidade de particulado através de um tubo.

A Figura 2.3. mostra um dosador patenteado por Ismail e Nicolaie (2004).

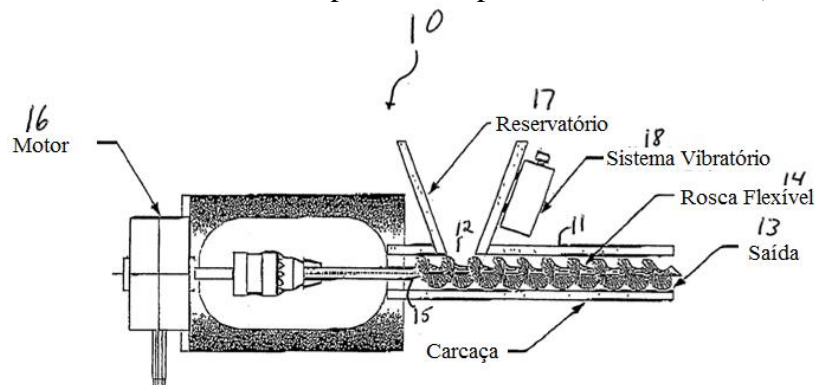


Figura 2.3.- Dosador de rosca transportadora  
Adaptado da patente de Ismail e Nicolaie (2004)

A figura mostra um dosador de poeira de rosca transportadora juntamente com um sistema de vibração acoplado ao reservatório para garantir a distribuição uniforme do

particulado dentro da rosca. O particulado sofre a ação da gravidade, em 17, e é transportado pela rosca, 12, até a saída, 13.

Este método tem tido várias adaptações para que não ocorram os problemas inerentes de compressão, desgaste, adesão às paredes e dosagem não uniforme, sendo amplamente usado, tanto na indústria alimentícia, dosando grande quantidade de massa, na ordem de kg/min, quanto na farmacêutica, dosando mg/s.

#### 2.1.4. Método Vibratório

O método vibratório inclui dosadores de baixa frequência, motores-acionadores ou solenóides-acionadores, dosadores vibratórios, *shakers* e ultimamente dosadores ultrasônicos. Os dosadores se baseiam em um reservatório com um orifício pequeno, na ordem de mm de diâmetro, ao fundo e vibra-se todo o sistema. Isso obriga uma quantidade de poeira a passar pelo orifício, pois a vibração evita a formação de abóbodas ou pontes, *bridging* em inglês, entre as partículas. A Figura 2.4. mostra um esboço deste sistema.

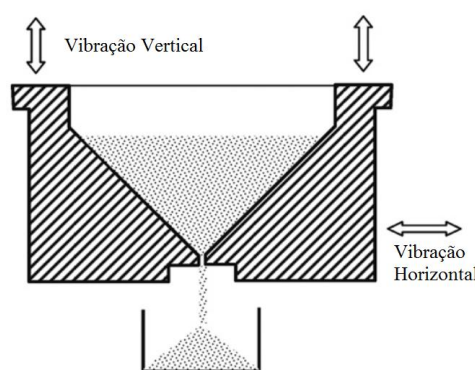


Figura 2.4. – Dosador Vibratório

O sistema representado acima mostra a utilização de sistema vibratório tanto na vertical quanto na horizontal.

Na literatura, encontram-se registros de este método ser capaz de dosar mínimas taxas, na ordem de 1mg/s, ou em dosadores ultrasônicos na ordem de 10 $\mu$ g/dose.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. INFLUÊNCIAS NO TRANSPORTE DO MATERIAL.

Conforme Yang e Evans (2007), as propriedades do pó, como formato e tamanho da partícula, distribuição granulométrica, densidade e a interação das partícula entre si, são de grande importância para o seu transporte. Umidade, carga eletrostática podem afetar a taxa de escoamento, como também a geometria do reservatório e vibrações do ambiente. Devido a essas complexidades, a taxa de transporte de um pó não pode ser tratado como a de um líquido.

##### 3.1.1. Umidade

Sutton et al, apud Yang e Evans 2007, explicam que a umidade relativa tem um efeito complexo na carga eletrostática nas partículas, assim como pode causar condensação capilar nas junções das partículas bem abaixo do ponto de orvalho, em razão da curvatura de cada partícula. Alguns materiais são intrinsecamente sensíveis à umidade, tanto através da adsorção, quanto de reações químicas.

### 3.1.2. *Fluidez*

O limitado entendimento das características dos pós que influenciam no seu escoamento e as variações na compactação ao longo do seu processo e transporte, tornam difícil a compreensão de como ele fluirá em diferentes situações, explicam Yang e Evans, 2007.

Owen e Cleary, 2009, concluíram, com o estudo de elementos discretos de um transportador de pó tipo rosca, que ao mudar o ângulo de inclinação do tubo de horizontal para vertical a vazão mássica diminuía, entretanto a distribuição do particulado em cada passo ficava mais uniforme.

Assim devem-se efetuar testes experimentais para a definição de qual pó fluirá melhor na determinada situação.

### 3.1.3. *Forças de Van der Waals*

As forças de Van der Waals são forças intermoleculares de baixo alcance que se formam devido a flutuações dos elétrons nos núcleos das partículas e a consequente polarização das moléculas.

Segundo Yang e Evans, 1994, apud Yang e Evans 2007, a força de Van der Waals torna-se dominante assim que o tamanho da partícula diminui e é a maior contribuinte para o baixo escoamento de pós finos.

## 4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Segundo Galperinet, apud Petry et al, 2008, a avaliação de equipamentos destinados à retenção de poeira, tais como filtros de ar, depende principalmente das propriedades da poeira, do tamanho das partículas e da concentração do particulado no ar assim como características de projeto destes equipamentos.

Então, para investigar o comportamento do modelo de filtro do Projeto de Gaseificação de Biomassa da Engenharia Química, da UFRGS, devem-se garantir os aspectos comentados por Galperinet.

A Figura 4.1 mostra um desenho esquemático da bancada de filtro, que se encontra no LETA, da Engenharia Mecânica.

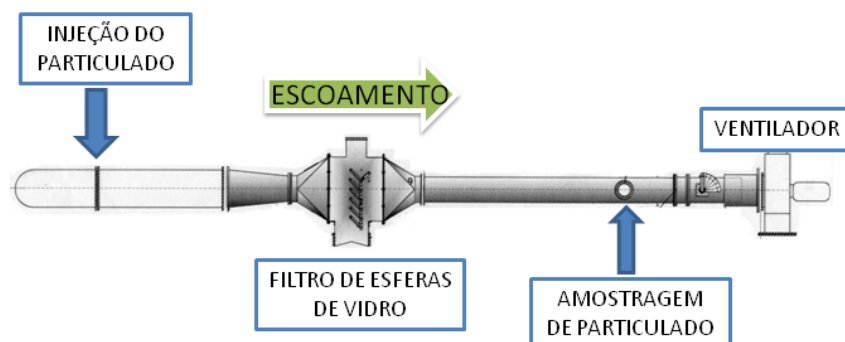


Figura 4.1 – Desenho da bancada de filtro no LETA

Conforme o desenho, o particulado será injetado anteriormente ao filtro e será feita uma amostragem posteriormente para verificar o quanto de particulado o filtro reteve.

Para a injeção deste pó será utilizado o sistema de transporte pneumático, desenvolvido por Dall'Agnol (2008), já existente no laboratório LETA, com um coletor de poeira que ficará abaixo do dosador.

A Figura 4.2 mostra o sistema de transporte e injeção e a Figura 4.3 o desenho do coletor a ser usado.

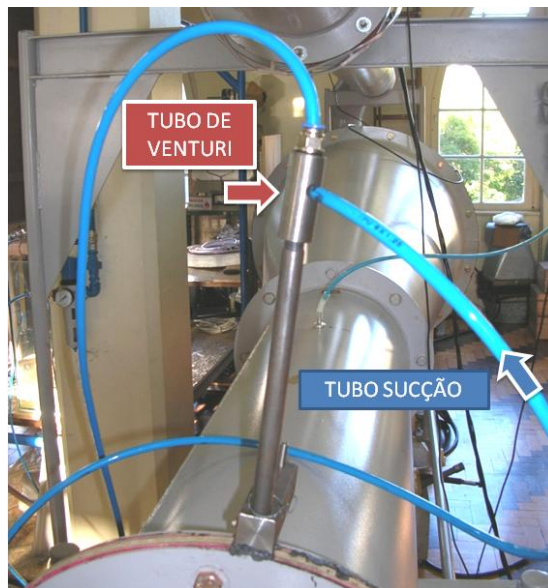


Figura 4.2 - Sistema de transporte e injeção de poeira na bancada desenvolvido por Dall'Agnol (2008)

Este sistema baseia-se no princípio de utilizar ar pressurizado em um tubo de venturi, criando assim uma depressão na seção de estrangulamento do tubo. Essa depressão pode ser usada para succionar o material dosado e injetá-lo na bancada.

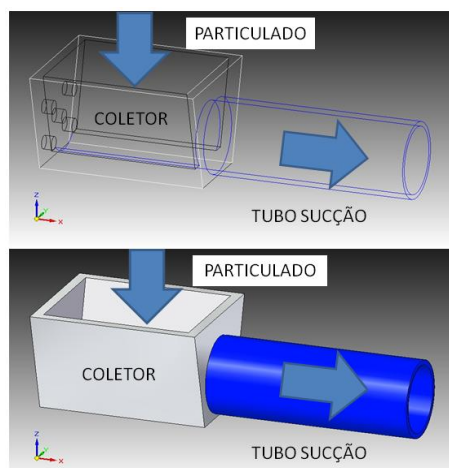


Figura 4.3 - Desenho do coletor

O coletor será utilizado abaixo do dosador juntamente com o tubo de sucção do sistema de transporte do particulado. Este coletor não faz parte do dosador e sim do sistema de transporte.

A vazão de ar utilizada para o transporte do particulado até a sua injeção na bancada pode ser desconsiderada, pois a mesma é baixa em relação à vazão de  $144 \text{ m}^3/\text{h}$  de operação do sistema.

O filtro desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Química deverá filtrar partículas de tamanho maior que  $5 \mu\text{m}$ , assim o particulado injetado no sistema deverá ter um tamanho médio de partícula superior à  $5 \mu\text{m}$ .

Por ser um projeto de filtro experimental, foram adotadas taxas superiores de  $140\text{mg}/\text{m}^3$  de particulado a serem filtradas no sistema. Sendo a vazão de ar de trabalho da bancada igual a  $144\text{ m}^3/\text{h}$ , deve-se dosar e injetar taxas superiores a  $20\text{g}/\text{h}$  ( $336\text{mg}/\text{min}$ ) de material particulado.

## 5. PROJETO DO DOSADOR

Para poder dosar taxas mássicas constantes maiores que  $20\text{g}/\text{h}$  de particulado, sem interrupção e com confiabilidade, optou-se por construir um dosador de rosca transportadora. O método de calibração usado para a validação do equipamento foi a pesagem, em balança de precisão, da massa dosada ao longo do tempo. Outros fatores que foram levados em conta para a escolha deste modelo foram a facilidade e o baixo custo de construção e manutenção em relação aos outros métodos aqui relatados.

Partiu-se do princípio de que o equipamento deveria ter um reservatório com uma rosca ao fundo, que transportasse certa quantidade de particulado. A rotação da rosca deveria ser variável para atingir várias faixas de operação.

A Figura 5.1 mostra o desenho do dosador projetado no presente trabalho.

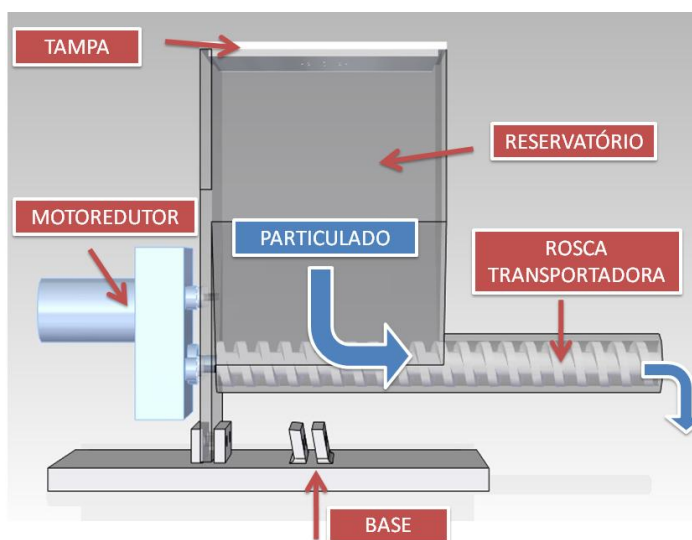


Figura 5.1 – Desenho do dosador

O particulado é colocado no reservatório e, com o acionamento do motoredutor, o pó é transportado para fora do dosador pela rosca transportadora, numa taxa mássica de acordo com a rotação da mesma. Na base há uma segunda opção de fixação do conjunto, fazendo com que a rosca fique inclinada em  $30^\circ$  para cima favorecendo a distribuição do pó dentro da rosca.

Na construção da estrutura optou-se por utilizar aço inox 304 com o intuito de evitar a contaminação do particulado e facilitar sua limpeza. Para a construção da rosca, optou-se por utilizar Teflon® por ser material inerte, isto é, não reage com outras substâncias, e também por possuir baixo coeficiente de atrito.

Foram utilizados 2 motoredutores de 12V, com rotações de 3RPM e de 9RPM, e torque de 23 e 6,8 kgfcm, respectivamente. Os mesmos foram adquiridos da empresa Motron, Indústria de Motores Redutores. Foram escolhidos dois motores de rotações diferentes para se poder ter uma faixa de operação mais ampla.

A Figura 5.2 apresenta o projeto do dosador e o dosador construído.

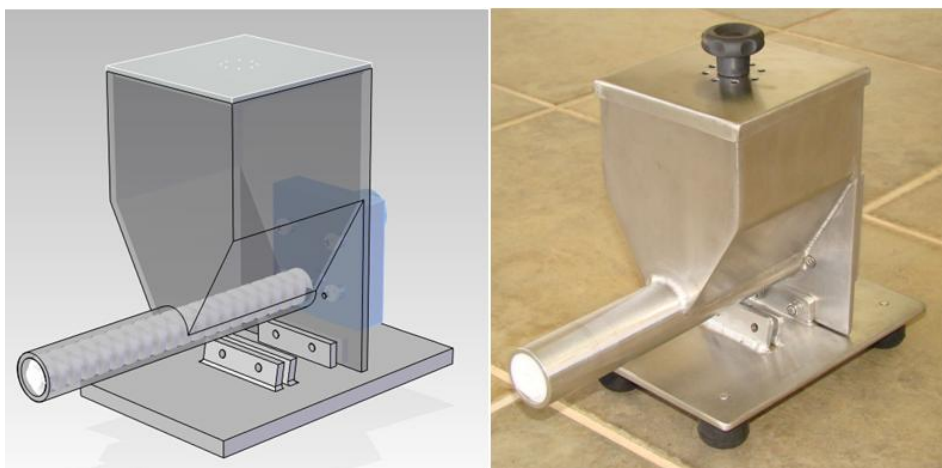


Figura 5.2 –Projeto e o dosador construído.

O dosador foi inicialmente projetado e desenhado com a ferramenta CAD, Solid Edge<sup>1</sup>, e posteriormente foi construído de acordo com as especificações do projeto. Outras figuras do dosador podem ser vistas nas Figuras A.1 e A.2 do Apêndice A.

O reservatório foi projetado com uma capacidade de 1000 cm<sup>3</sup> de poeira, sendo esse volume adequado para qualquer tipo de carregamento.

A rosca transportadora foi projetada com as seguintes especificações:

Passo: 10 mm;

Coprimento total: 200mm;

Área disponível na rosca para transporte de particulado: 30mm<sup>2</sup>;

Volume transportado: 2420mm<sup>3</sup> por volta.

Isso representa uma vazão volumétrica por volta disponível, não representando na realidade a vazão do particulado, pois conforme comentado anteriormente a densidade aparente e compressão de cada pó é relacionada com fatores intrínsecos da partícula, do processo e de fatores ambientais.

## 6. PARTICULADO

Para a escolha do particulado a ser filtrado na bancada, optou-se por uma distribuição granulométrica conhecida e com uma grande porcentagem de partícula com tamanho acima de 5µm. Assim, para a validação do dosador e para o uso do equipamento em bancada, foi escolhido o *carvão ativado em pó*. Também foram considerados os fatos de que o carvão não é um produto tóxico, ele auxilia na manutenção do baixo atrito entre a rosca transportadora com o tubo de aço inox, ele se assemelha ao carvão encontrado nas cinzas volantes do sistema descrito e o seu custo é baixo.

<sup>1</sup> Software Solid Edge [www.solidedge.com](http://www.solidedge.com)

### CARACTERÍSTICA DA POEIRA:

A densidade aparente, medida no laboratório LPR2 do Departamento da Engenharia Química, com o pó seco, foi de 280 a 350 kg/m<sup>3</sup>, e, com o pó umido, saturado com o ambiente à 70% de umidade relativa, foi de 250 a 300 kg/m<sup>3</sup>.

A distribuição granulométrica realizada pelo laboratório LACER, UFRGS, é mostrada na Figura 6.1.

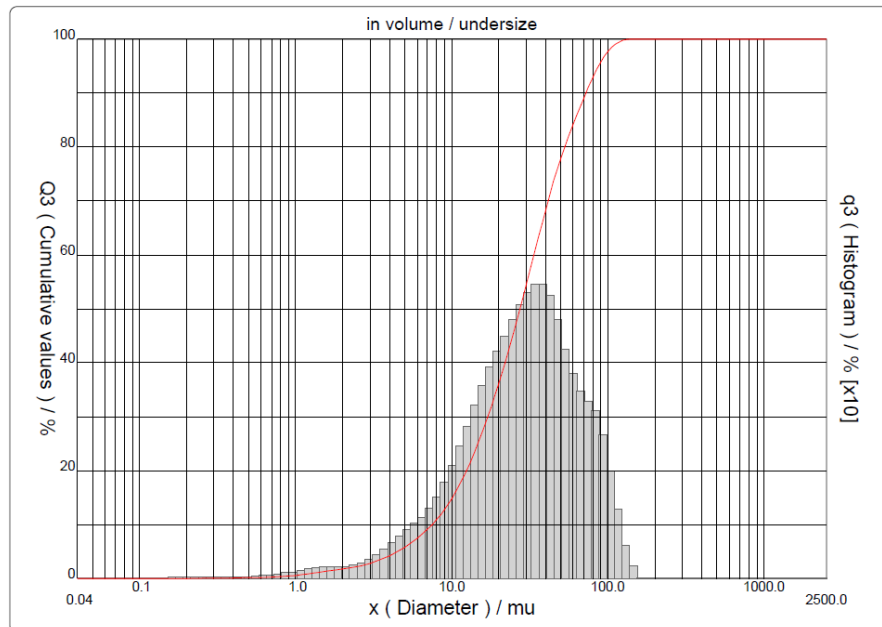


Figura 6.1 - Distribuição granulométrica do carvão ativado em pó.

A figura nos mostra a distribuição granulométrica do carvão em pó mencionando, a porcentagem de cada diâmetro de partícula como, também, o valor cumulativo. Assim, o gráfico demonstra que aproximadamente 90% das partículas estão acima de 5µm, sendo esta amostra uma excelente poeira para testar a eficiência do filtro.

## 7. CALIBRAÇÃO

### 7.1. BANCADA DE CALIBRAÇÃO DO DOSADOR

A calibração foi realizada no Laboratório LPR2, pois necessitava-se de um ambiente fechado, controlado e uma balança analítica para a pesagem da massa dosada.

Foram utilizados:

- Balança analítica marca Gibertini, modelo E42-B, de 6½ dígitos significativos, com resolução de 0,1mg;
- Fonte de alimentação Minipa, modelo MPL-1303, 0-30V para variar a tensão de entrada do motoredutor, variando a rotação da rosca transportadora;
- Contador de RPM marca Veeder;
- Cronômetro marca Oregon;
- Multímetro Minipa, modelo ET-2030 3½ dígitos significativos, com resolução de 10 mV;
- Equipamento para medição de temperatura, pressão ambiente e umidade relativa, marca Vaisala.



A bancada de calibração do dosador é mostrada na Figura 7.1.

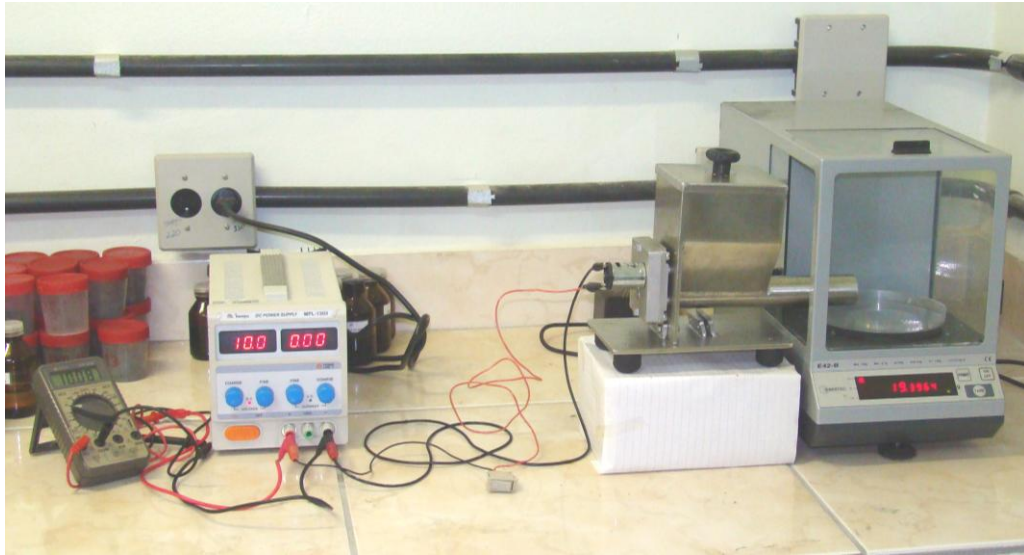


Figura 7.1 - Bancada de calibração do dosador

Como pode ser visto, à esquerda, o multímetro é usado para ler a tensão aplicada ao dosador, garantindo uma maior certeza sobre a rotação da rosca, ao meio a fonte de tensão e a direita o dosador e a balança analítica.

## 7.2. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

Foram realizadas as calibrações dos motoredutores utilizando o contador de RPM, o multímetro, o cronômetro e a fonte de alimentação. Variou-se a tensão de entrada e foi registrada a quantidade de rotações proporcional a essa tensão. Tanto acoplado no dosador, com carga, quanto livre, o comportamento de cada motoredutor foi o mesmo. Assim foram geradas as curvas de calibração representadas nas Figuras B1 e B2 do Apêndice B

Os testes de avaliação do filtro terão duração de 1h, 1,5h ou 2h. Assim, assegurando um comportamento constante, repetitivo e confiável ao longo da primeira hora, pode-se dizer que o mesmo continuará nas demais horas de teste. Essa extrapolação pode ser confirmada com a massa dosada após 1,5 e 2h, sem o necessário monitoramento do seu funcionamento ao longo do teste.

Para a calibração do dosador realizam-se as seguintes etapas:

1. Considerações iniciais:
  - a. Manter a temperatura e umidade relativa do laboratório;
  - b. Secar a poeira em estufa por 24h e deixar ela adsorver a umidade do laboratório até se saturar e não adsorver mais massa de água do ambiente;
2. Ajustar a inclinação do dosador;
3. Ligar a balança analítica, esperar a sua estabilização e zerar o valor da massa;
4. Pesar o carregamento inicial de particulado do reservatório, 100g, e mais 4 cargas de 10g para serem adicionadas ao longo do teste para compensar a saída de massa;
5. Despejar o carregamento inicial no reservatório;
6. Ligar a fonte, o multímetro e o medidor Vaisala;
7. Ajustar a tensão desejada;
8. Ligar o dosador e disparar o cronômetro;
9. Registrar a massa a cada 2min 30s, com o equipamento em funcionamento;

10. Despejar a primeira carga adicional nos 15 primeiros minutos, a segunda nos 30 minutos e as duas últimas aos 40 e aos 50 minutos, com o equipamento em funcionamento;
11. Parar o teste em 60min e desligar os equipamentos;
12. Gerar curva de comportamento ao longo do tempo, que analisa a vazão mássica para cada tempo de amostra, e também gerar a média e a incerteza de medição do teste;
13. Após cada teste, desmontar e limpar todo o dosador;

## 8. RESULTADOS E ANÁLISES

Durante os testes de calibração foram registradas certas influências no comportamento do dosador e estas são descritas abaixo:

### Influência da umidade:

Constatou-se que após a secagem do carvão ativado, o mesmo adsorveu a massa de água do ar ambiente. Esse fato interferiu na leitura da massa dosada. Já que a utilização do dosador será em ambiente aberto, suscetível às intempéries, a solução adotada para este fator foi deixar a poeira adsorver toda a umidade possível do ambiente até a sua saturação.

### Influência da uniformidade do particulado no reservatório:

Constatou-se que ao longo dos ensaios a poeira não se distribuiu uniformemente dentro do reservatório e formou ligações intermoleculares, conseqüentemente não fluiu uniformemente ao longo da rosca. Essa não uniformidade do escoamento pode ser vista na Figura 8.1.

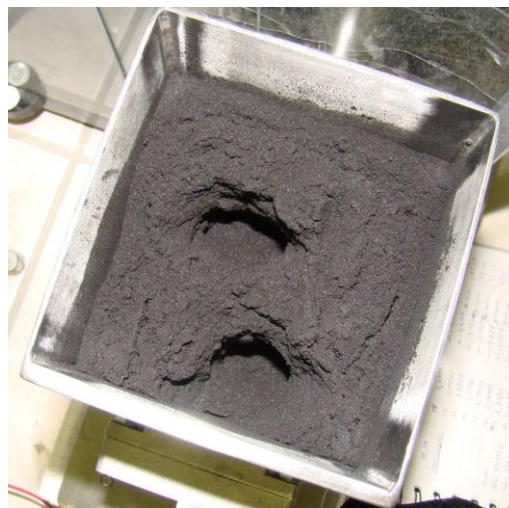


Figura 8.1 – Distribuição não uniforme do pó no reservatório

Pode-se ver que o pó fluiu em dois determinados pontos mais que em todo o reservatório. Esse fato é devido a formação de “pontes”, *bridging*, entre o material e a parede, fazendo com que o material arme e não flua, e também ao ângulo de repouso do particulado. Com esse escoamento não uniforme ao longo do reservatório, geraram-se alterações de massa específica e compactação ao longo do material transportado pela rosca, alterando assim as vazões mássicas do ensaio.

A solução para este problema foi a utilização de um misturador no reservatório para que fosse homogeneizado o pó dentro do reservatório, com isso, não favorecer o aparecimento das

“pontes”. O misturador construído foi acoplado ao motorreductor de 3RPM na tampa do reservatório, conforme Figura 8.2.



Figura 8.2 – Misturador fixado à tampa do reservatório.

O misturador construído possui um formato assimétrico com o propósito de provocar a agitação e redistribuir o pó. Entretanto, ao longo dos testes, o formato escolhido não se mostrou eficaz, pois mesmo com o uso deste misturador, o particulado não ficou homogeneizado.

A Figura 8.3 mostra o resultado do uso desse misturador no reservatório.

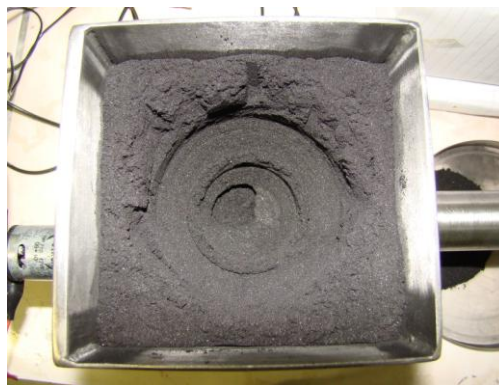


Figura 5.3 – Compactação do particulado no reservatório

Nota-se que o formato do misturador exercia uma pressão maior ao longo das paredes, fazendo com que o particulado se compactasse, não propiciando o seu escoamento.

De frente a esse novo problema, foi construído outro misturador, misturador II, visto na Figura 8.4.

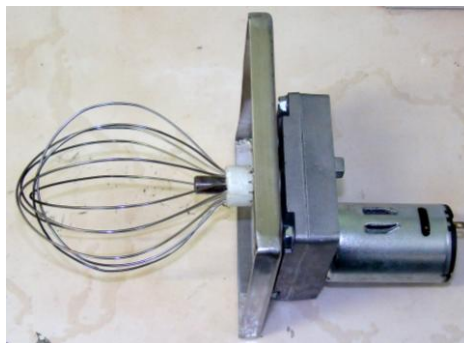


Figura 8.4 – Misturador II

Como se pode perceber, o novo misturador tem um formato com pouca área de contato, mas mesmo assim pode uniformizar o volume principal do reservatório.

Outra influência vista na vazão mássica do dosador, com a utilização do misturador II, foi que de acordo com a distância que mesmo se encontrava em relação à rosca transportadora a vazão mássica se alterava. Aumentando a distância entre os dois, a vazão mássica diminuía, e a mesma relação segue para o inverso. Pode-se concluir que o misturador além de uniformizar também compactava o particulado uniformemente na rosca.

Vale ressaltar que, para a inclusão e as modificações do misturador, foi acoplado uma nova fonte de alimentação, igual a usada para o dosador, para manter essa nova variável fixa quando mudada a tensão (rotação) da rosca transportadora. Para o misturador foi mantida uma tensão de 12V, que com o motorreductor de 3RPM significa 2,9 RPM reais. O rearranjo do dosador pode ser visto na Figura C.1 do Apêndice C.

## RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

A calibração deste equipamento foi baseada em três testes consecutivos. Os dados de entradas e as condições ambientais seguem abaixo na Tabela 8.1.

Tabela 8.1 – Dados de entrada e condições ambientais do laboratório

Descritivo	Valores	Unidade
Tensão aplicada ao motoredutor principal (que aciona a rosca)	9,5	V
Rotação do motoredutor principal associada à tensão	6,1	RPM
Tensão aplicada ao motoredutor secundário (que aciona o misturador II)	12	V
Rotação do motoredutor secundário associada à tensão	2,9	RPM
Distância entre o misturador e a rosca transportadora	1	mm
Ângulo de funcionamento da rosca em relação a base	0	°
Pressão Ambiente	100095 ± 188	Pa
Temperatura média do ambiente	22,9 ± 0,2	°C
Umidade relativa do ambiente	66,0 ± 5,3	%

Como pode ser visto, a rotação utilizada para esses teste foi de 6,1RPM e o ar condicionado manteve, ao longo dos testes, as condições ambientais do laboratório.

A Figura 8.5 mostra a massa dosada ao longo dos testes.

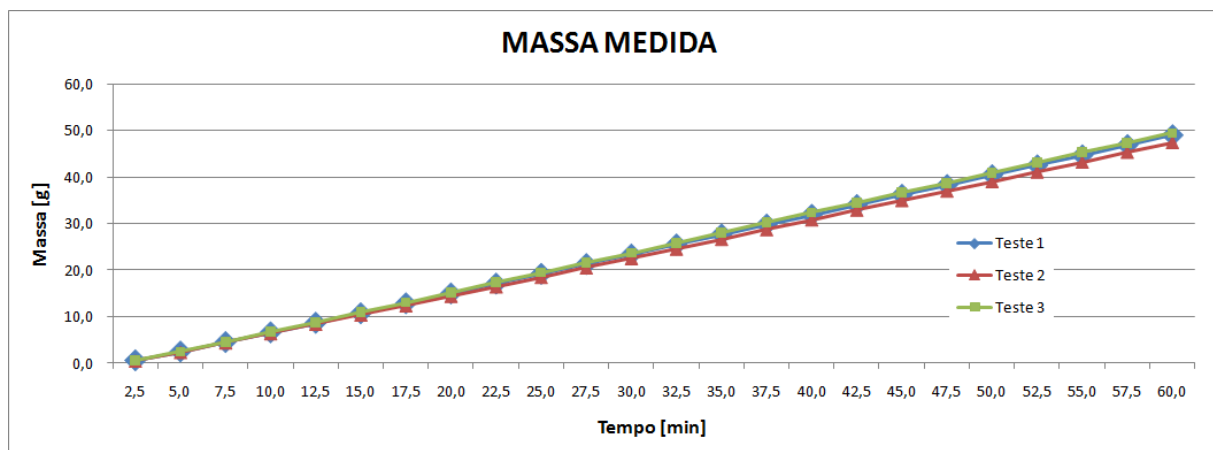


Figura 8.5 - Massa dosada nos testes

A massa dosada ao longo do tempo é constante e se assemelha em cada teste.

Com os registros da massa dosada, pega-se o valor da massa medida do tempo em questão, subtrai-se o valor da massa anterior e divide-se pelo tempo de amostragem. O resultado desse cálculo é a taxa mássica média que o dosador transporta.

Essas vazões mássicas encontradas são mostradas na Figura 8.6.

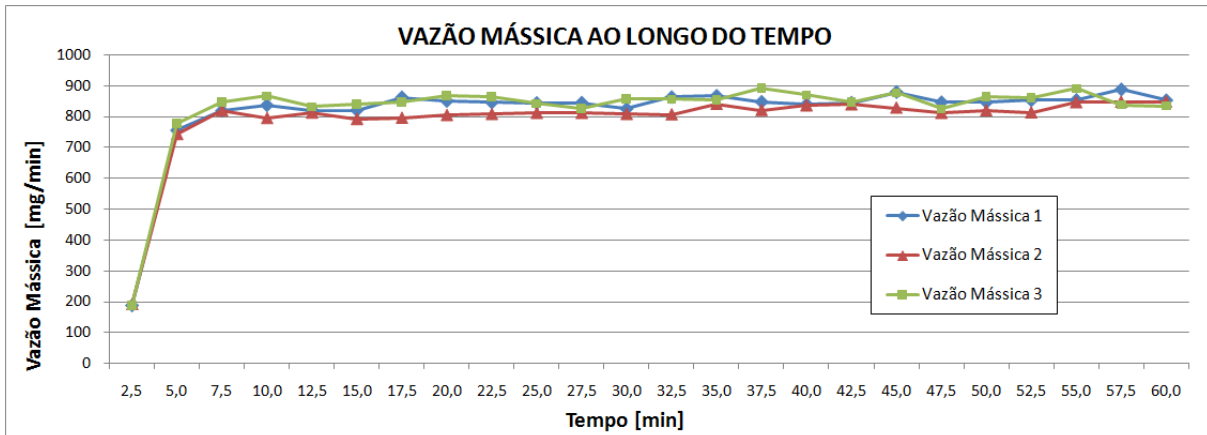


Figura 8.6 - Resultados encontrados

Percebe-se que o sistema se estabiliza em 7,5 minutos, tempo necessário até o completo preenchimento da rosca. Além disso, o desenvolvimento de cada teste se mostrou estável ao longo do tempo, tanto que nos minutos 12,5, 35, 42,5 e 60 os três testes tiveram a mesma vazão mássica.

O pó dosado no período de estabilização não será utilizado na avaliação de filtro, sendo assim, o dosador será acoplado ao sistema de injeção somente após 7,5 minutos.

Os dados estatísticos dos resultados apresentados são mostrados na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 -Dados estatísticos dos resultados

Média da Vazão Mássica	840,7	mg/min	50,4	g/h
Desvio Padrão	23,7	mg/min	1,4	g/h
2 $\sigma$ (95% Confiança)	47,4	mg/min	2,8	g/h
Incerteza de medição	5,6	%	5,6	%

Os dados mostrados acima foram retirados dos testes, confirmando a estabilidade do equipamento.

Considerando volume disponível na rosca para ser dosado, de  $2420\text{mm}^3$  por volta a uma rotação de 6,1RPM, e a densidade do carvão ativado saturado com o ambiente igual a  $275\text{kg/m}^3$ , supõe-se uma vazão mássica de  $4.060\text{mg/min}$ . Entretanto, a vazão medida foi de  $840,7\text{mg/min}$ . Assim, podemos dizer que houve uma vazão mássica de somente 20% do total disponível, indicando a particularidade do pó no processo.

## 9. CONCLUSÕES

Conclui-se que o dosador construído atinge os requisitos da avaliação do filtro de esferas de vidro construído pelo Departamento de Engenharia Química, UFRGS. O equipamento dosa o particulado a taxas constantes, visto que, com uma rotação de 6,1 RPM ele dosa 840,7mg/min, e com repetibilidade e confiabilidade, que no caso de uma rotação de 6,1RPM a incerteza de medição é de 5,6%, com 95% de confiança.

Assim como visto nas pesquisas realizadas e também experienciado neste trabalho, cada particulado possui um comportamento único. As propriedades físicas, a densidade aparente e o seu comportamento ao longo do transporte podem variar de acordo com as condições ambientais e do processo.

A vazão mássica encontrada nos testes é resultado de uma faixa de rotação, podendo ser futuramente explorado todo o potencial do equipamento. Também fica como sugestão para trabalho futuros: verificar a relação da distância do misturador em relação à rosca com a vazão mássica, verificar a relação da uniformidade da vazão com a inclinação do dosador em 30° e testar outros tipos de particulados.

## 10. REFERÊNCIAS

DALL'AGNOL, E. C. **Desenvolvimento e Operação de um Alimentador de Poeira para Bancada de Testes de Filtros de Ar**. 2008. 27f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ISMAIL, A. A., CRISTESCU, N. D. ; **Flexible Screw Feeder/Mixer For Precision Dosing And Feeding Of Particulate Systems**; Patent Publication Number WO2004011131; (2004)

OWEN, P.J., CLEARY, P.W.; **Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM)**; Powder Technology 193 (2009) 274–288;

PARKER C. REIST , LAURALYNN TAYLOR; **Development and operation of an improved turntable dust feeder**; Department of Environmental Sciences and Engineering, USA, 2000.

PETRY, A. P.; SCHNEIDER, P. S.; SAVICKI, D. L.; PICCOLI, G. P.; ROSA, J. B.; SOUZA, W. B.; DALL'AGNOL, E. C.; **Desenvolvimento de Procedimentos de Avaliação de Filtros de Ar para Turbo Geradores**, 2008. (Relatório interno de projeto).

POHOŘELÝ , M.; SVOBODA, K.; HARTMAN, M.; **Feeding small quantities of particulate solids**; Institute of Chemical Process Fundamentals AS CR, Czech Republic; 2004.

VILAS BÔAS DE SALES, C. A. ; ANDRADE, R. V. ; SILVA LORA, E. E.; **Geração de eletricidade a partir da gaseificação de biomassa**; Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2006

YANG G.; ZHOU J. **Experimental Study on a New Dual-Layer Granular Bed Filter for Removing Particulates**. Journal of China University of Mining and Technology, v.17, p. 201-204, 2007.

YANG, S.; EVANS, J.R.G.; **Metering and Dispensing of Powder; the quest for new solid freeforming techniques**; Powder Technology, 2007.

## 11. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

LINK, W.; **Metrologia Mecânica: Expressão da Incerteza de Medição**; 2 ed., 1999.

LIRA, F. A. ; **Metrologia na Indústria**; 6ª ed. Editora Érica Ltda, SP – 2007.

SHIGLEY, J.E; MISHKE, C.R. ; BUDYNAS, R. G.; **Projeto de Engenharia Mecânica**, Bookman, 7ª edição, 2005.

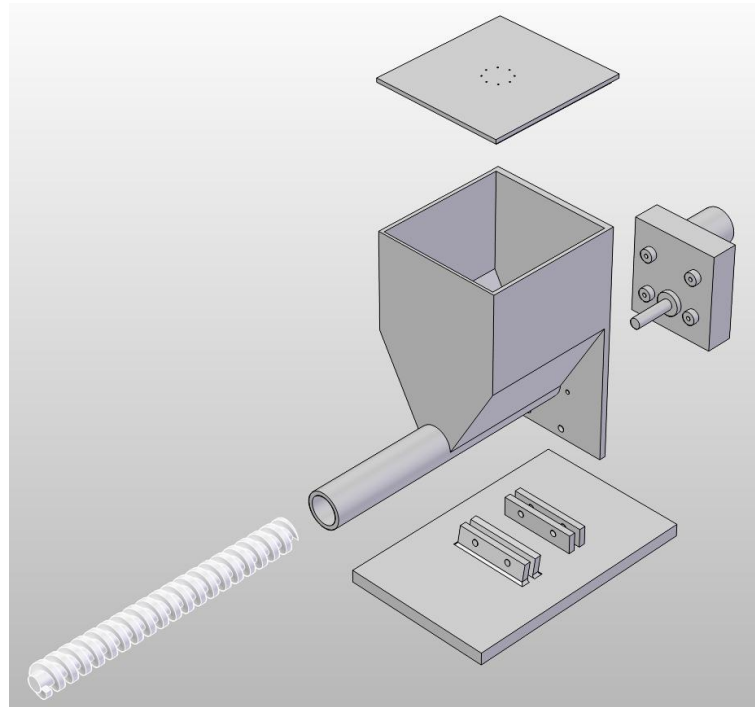
**APÊNDICE A – PROJETO DO DOSADOR**

Figura B.1 – Vista explodida do desenho



Figura B.2 – Dosador desmontado



## APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DOS MOTORREDUTORES

Foram realizadas as calibrações dos motores redutores utilizando o contador de RPM, o multímetro, o cronômetro e a fonte de alimentação. Variou-se a tensão de entrada e foi registrado a quantidade de rotações proporcional a essa tensão. Tanto acoplado no dosador, com carga, quanto livre, o comportamento de cada motoredutor foi o mesmo. Assim foram geradas as curvas de calibração representadas nas figuras A.1 e A.2 do apêndice A.

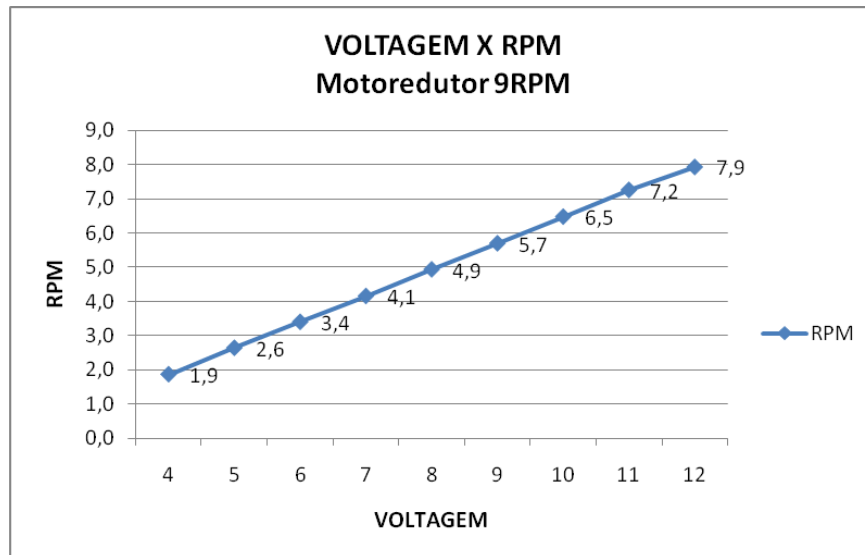


Figura 5.1 – Comportamento motoredutor de 9RPM

Constata-se que o motoredutor tem um comportamento linear, mas com menor desempenho que sua especificação.

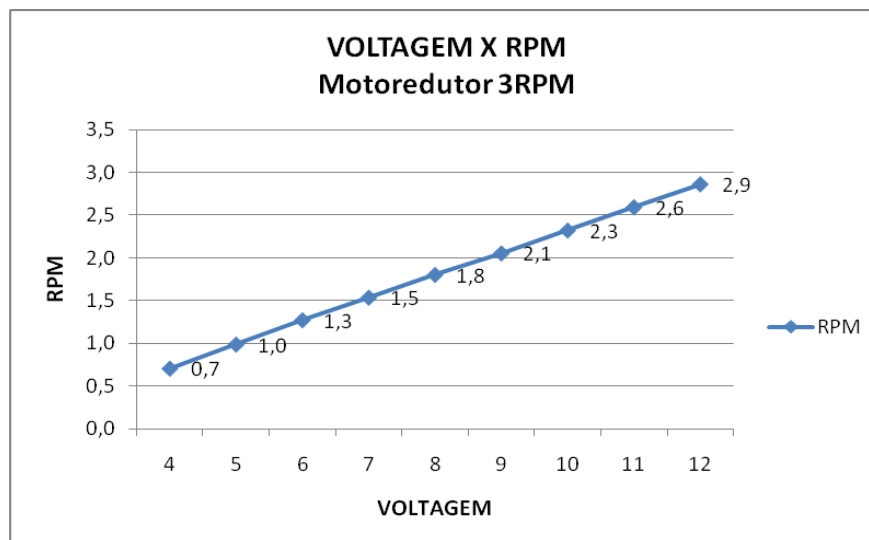


Figura 5.2 - Comportamento motoredutor de 3RPM

Constata-se que o motorredutor tem um comportamento linear e bem próximo de sua especificação.

## APÊNDICE C – BANCADA DE CALIBRAÇÃO

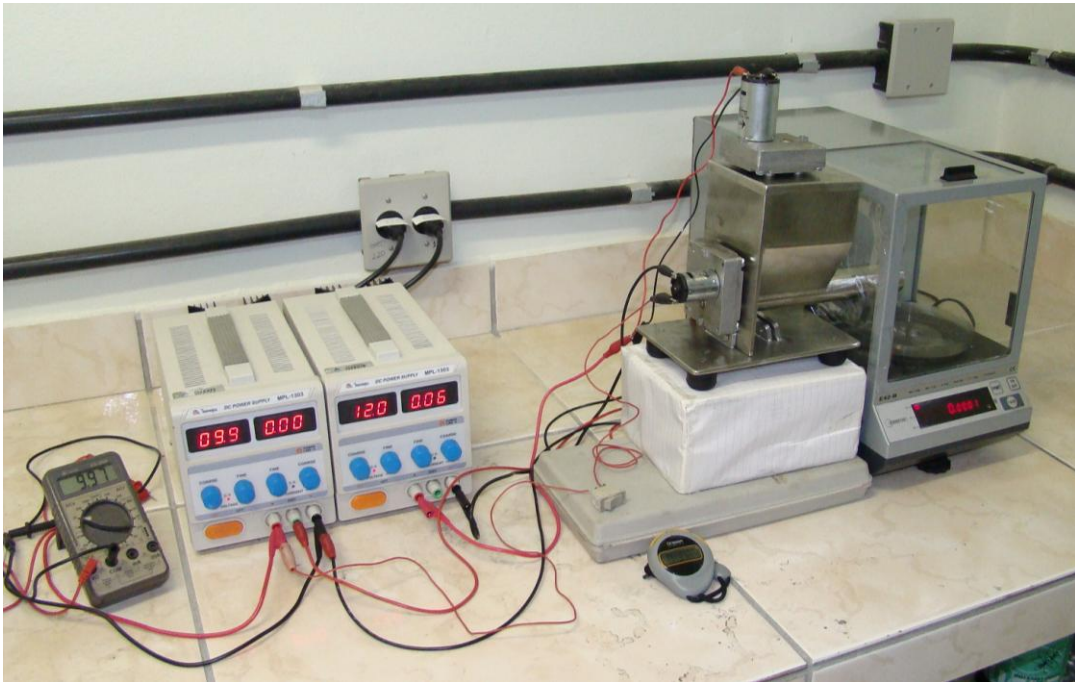


Figura C.1 – Bancada de calibração com o misturador