

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

IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO COMPUTACIONAL PARA FILTRAGEM DE CINZAS DE  
CARVÃO VOLANTES COM FILTROS DE MANGA

por

Guilherme Santana Garber

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.

Porto Alegre, junho de 2016

---

Guilherme Santana Garber

Implementação de um Modelo Computacional Para Filtragem de Cinzas de Carvão Volantes com Filtros de Manga/ Guilherme Santana Garber. – Porto Alegre, junho de 2016-18 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Trabalho de conclusão de curso – MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA, junho de 2016.

1. Filtros de manga. 2. cinzas de carvão volantes. I. Prof. Dr. Paulo Smith Schneider. II. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. III. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Implementação de um Modelo Computacional Para Filtragem de Cinzas de Carvão Volantes com Filtros de Manga

CDU 02:141:005.7

---



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO COMPUTACIONAL PARA FILTRAGEM DE CINZAS DE  
CARVÃO VOLANTES COM FILTROS DE MANGA

por

Guilherme Santana Garber

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. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de avaliação:

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin

Prof. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, junho de 2016

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha vó Irany, por me acolher em sua casa por todos esses anos e fazer de Porto Alegre um lar.

Aos meus pais e meu irmão por todo o apoio concedido ao longo dos anos.

Ao meu orientador professor Paulo Schneider, por responder minhas mensagens de *whatsapp* em horário nobre.

Ao Lisandro Maders por pagar as contas e me acompanhar virando as noites. E às amizades construídas ao longo destes anos, que tornaram esta caminhada mais divertida.

GARBER, G. S. **Implementação de um Modelo Computacional Para Filtragem de Cinzas de Carvão Volantes com Filtros de Manga**. 2016. 25. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## **RESUMO**

O presente trabalho trata da implementação de um modelo computacional para simular a filtragem de cinzas de carvão volantes com filtros de manga. O modelo calcula a densidade de potência necessária para a filtragem em função das características das cinzas e dos filtros, bem como da eficiência de filtragem desejada ao longo do ciclo de operação. Os resultados de um modelo de referência, encontrado na literatura, são utilizados para validação do modelo implementado. A estimativa da densidade de potência é complementada com o acoplamento de um sistema de ventilação. O modelo implementado é capaz de reproduzir o comportamento previsto pela trabalho de referência, mesmo na ausência de informação de alguns parâmetros do sistema. A análise de sensibilidade foi condizente com o previsto na literatura e pelo modelo de referência. Divergências entre os resultados previstos pelo modelo de referência e por outros trabalhos da literatura foram encontradas para os efeitos do aumento da velocidade de face.

**PALAVRAS-CHAVE:** Filtragem de cinzas de carvão. filtros de manga. eficiência de filtragem. energia para filtragem de cinzas.

GARBER, G. S. **Implementação de um Modelo Computacional Para Filtragem de Cinzas de Carvão Volantes com Filtros de Manga**. 2016. 25. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## **ABSTRACT**

The current work deals with the implementation of a computational model to simulate coal fly ash filtration using bag filters. The model calculates the power density required for the filter according to the characteristics of the ash and the filter. The filtering efficiency is also calculated for the operating cycle. The results of a reference model, found in the literature are used to validate the model implemented. The estimated power density is complemented by coupling a ventilation system. The implemented model is able to reproduce the behavior predicted by the reference work, even in the absence of information for some system parameters. The sensitivity analysis was consistent with the provisions of literature and reference model. Discrepancies between the results provided by the reference model and other papers were found for the purposes of increasing face velocity.

**KEYWORDS:** Coal fly ash filtration. bag filters. filtering efficiency. energy for coal fly ash filtration.

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

|                    |  |                  |
|--------------------|--|------------------|
| $\Delta t$         | Incremento de tempo  | s                |
| $\dot{W}$          | Potência   | W                |
| $\dot{W}/A$        | Densidade de potência  | W/m <sup>2</sup> |
| $\eta$             | Eficiência de operação                                       |                  |
| $\eta_{filtragem}$ | Eficiência de filtragem                                      |                  |
| $A$                | Área   | m <sup>2</sup>   |
| $a$                | Função de decaimento da concentração                         | s/m <sup>4</sup> |
| $a_c$              | Fração limpa de um magazine após o processo de limpeza       |                  |
| $C_i$              | Concentração de particulado que entra no sistema             | g/m <sup>2</sup> |
| $C_o$              | Concentração de particulado que entra sai do sistema         | g/m <sup>2</sup> |
| $d_m$              | Diâmetro médio da partícula                                  | m                |
| $I$                | Quantidade de magazines                                      |                  |
| $inf$              | Constante do programa MATLAB® cujo valor tende ao infinito   |                  |
| $J$                | Quantidade de filtros  |                  |
| $K_2^\circ$        | Resistência ao escoamento da torta medido                    | s <sup>-1</sup>  |
| $K_{2ij,t}$        | Coeficiente de resistência ao escoamento da torta local em t | s <sup>-1</sup>  |
| $min$              | minuto   |                  |
| $Pn_s$             | Penetração de particulado em regime permanente               | g/m <sup>2</sup> |
| $Pn_t$             | Penetração total de particulado no sistema em t              | g/m <sup>2</sup> |
| $Pn_{ij,t}$        | Penetração local de particulado em t                         | g/m <sup>2</sup> |
| $S_e$              | Arrasto específico do filtro para carregamento superficial   | Pa.s/m           |
| $S_t$              | Arrasto da casa de filtros em t                              | Pa.s/m           |
| $S_{i,t}$          | Arrasto de um magazine em t                                  | Pa.s/m           |
| $S_{ij,t}$         | Arrasto local em t   | Pa.s/m           |
| $t$                | Instante de tempo  | min              |
| $V$                | Velocidade de alimentação                                    | m/s              |
| $V_R$              | Velocidade do escoamento reverso durante a limpeza           | m/s              |
| $V_{ij,t}$         | Velocidade de face de filtragem no tempo t                   | m/s              |
| $w_{ij,t}$         | Carregamento superficial local em t                          | g/m <sup>2</sup> |

## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
|          | <b>Lista de símbolos e abreviaturas</b> . . . . .  | <b>vi</b> |
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .  | <b>2</b>  |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .   | <b>2</b>  |
| 2.1      | Filtragem de cinzas de carvão volantes . . . . .   | 2         |
| 2.2      | Filtros de Manga . . . . .   | 3         |
| 2.3      | Métodos de Limpeza . . . . .   | 4         |
| <b>3</b> | <b>MODELO EPA</b> . . . . .  | <b>5</b>  |
| 3.1      | Capacidades e restrições . . . . .   | 6         |
| 3.2      | Método de Análise . . . . .  | 6         |
| 3.3      | Equações resolvidas . . . . .  | 7         |
| <b>4</b> | <b>MODELO IMPLEMENTADO</b> . . . . .   | <b>9</b>  |
| 4.1      | Lógica de Solução . . . . .  | 9         |
| 4.2      | Processo de limpeza no Modelo . . . . .  | 9         |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .   | <b>9</b>  |
| 5.1      | Validação do Modelo Implementado . . . . .   | 10        |
| 5.2      | Análise de sensibilidade . . . . .   | 11        |
| 5.3      | Estimativa de densidade de potência . . . . .  | 12        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÃO</b> . . . . .   | <b>13</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> . . . . .  | <b>15</b> |
|          | <b>APÊNDICE A – EFICIÊNCIA DE FILTRAGEM</b> . . . . .  | <b>16</b> |
|          | <b>APÊNDICE B – HIPÓTESES PARA O CÁLCULO DE PARTICULADO RE-<br/>MOVIDO DURANTE A LIMPEZA</b> . . . . . | <b>16</b> |
| B.1      | Limpeza total do magazine . . . . .  | 16        |
| B.2      | Limpeza parcial do magazine . . . . .  | 17        |
| B.3      | Hipótese adotada . . . . .   | 17        |
|          | <b>APÊNDICE C – DADOS DO FILTRO DE FIBRA DE VIDRO UTILIZADO<br/>NOS EXPERIMENTOS DO EPA</b> . . . . .  | <b>18</b> |



## 1 INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários vêm perdendo espaço atualmente. Em países mais desenvolvidos, soluções de ação integrada como atenuação, reaproveitamento, coleta seletiva, reciclagem e incineração são aplicadas para que somente os últimos resíduos sejam destinados ao aterro sanitário [Callado, 2005]. Segundo Seelig *et al.*, 2011, nesta conjuntura a opção pela coqueima aparece como uma alternativa. Este método consiste na agregação de carvão ao tratamento térmico do resíduo sólido urbano (RSU) para aumentar seu poder calorífico.

Um extenso trabalho sobre filtragem de cinzas de carvão volantes foi realizado pela *United States Environmental Protection Agency* (EPA) sob a autoria de Dennis *et al.*, 1977. Eles apresentaram um modelo para simular sistemas de filtragem de carvão utilizando filtros de manga constituídos de fibra de vidro. Este modelo foi validado através de medições experimentais realizadas pelos autores. O estudo da influência dos parâmetros de operação na eficiência da filtragem por torta de poeira é recorrente na literatura. Cheng e Tsai, 1998, relatam um aumento do coeficiente de resistência ao escoamento ( $K_2$ ) e maior compactação da torta para velocidades maiores. Choi *et al.*, 2002, concluem que particulados não esférico possuem maior compressibilidade e tendem a causar maior queda de pressão. Segundo Al-Otoom, 2004, a eficiência de filtragem cresce com o aumento da razão entre o diâmetro da partícula e do poro do meio filtrante. O efeito da temperatura é investigado em Lupion *et al.*, 2014, que atribui a esta um efeito maior na eficiência do processo de limpeza do que na filtragem.

O objetivo do presente trabalho é implementar o modelo proposto por Dennis *et al.*, 1977, em ambiente MATLAB®. A necessidade vêm do projeto conceitual de uma planta operando por ciclo de coqueima, que está em andamento no Laboratório de Ensaio Térmicos e Aerodinâmicos, Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS. Este projeto necessita modelar sistemas de filtros para realizar a filtragem de seus particulados. Para maior entendimento do leitor, o modelo do trabalho referenciado será denominado Modelo EPA, enquanto o proposto será chamado de Modelo Implementado. A validação do presente trabalho será feita através de comparações dos valores simulados com os resultados do Modelo EPA. Uma parametrização será realizada para verificar se a sensibilidade do modelo é condizente com o encontrado literatura. Os valores simulados pelo Modelo Implementado serão utilizados para a estimativa da densidade de potência necessária na filtragem.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, aborda-se as características da filtragem de cinzas de carvão volantes, o funcionamento dos filtros de manga e seus métodos de limpeza.

### 2.1 Filtragem de cinzas de carvão volantes

A cinza de carvão volante é um resíduo da queima do carvão mineral, podendo também ser classificado como cinza leve [Rhode *et al.*, 2006]. Sua granulometria é apresentada na Figura 2.1.

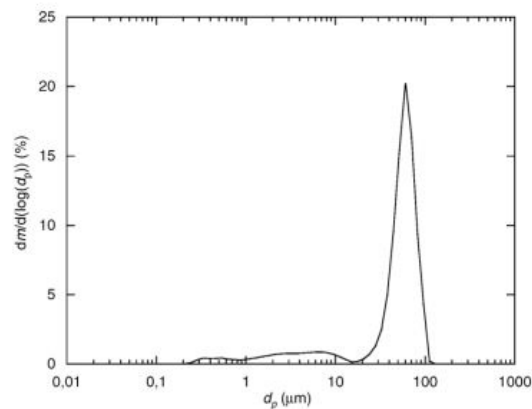


Figura 2.1 – Distribuição da granulometria para cinzas de carvão. [Fonte Ballester e Santiago, 2005]

A figura acima mostra a faixa de diâmetros na qual se encontra os particulados de cinzas de carvão volantes. Filtros de manga filtram particulados em uma faixa de  $0,5 \mu\text{m}$  a  $100,0 \mu\text{m}$  e podem operar a temperaturas de  $260^\circ\text{C}$ , se constituídos de fibra de vidro [Sutherland, 2008]. Portanto, filtros de manga feitos de fibra de vidro são aplicáveis na filtragem de cinzas volantes de carvão.

## 2.2 Filtros de Manga

Os filtros de manga são denominados desta forma, pois apresentam forma cilíndrica que remete a "manga" de uma camisa. Em sistemas de filtragem, eles são agrupado em magazines dentro de uma casa de filtro. A Figura 2.2 mostra a constituição de uma casa de filtros e o esquemático do processo de filtragem por filtros de manga.

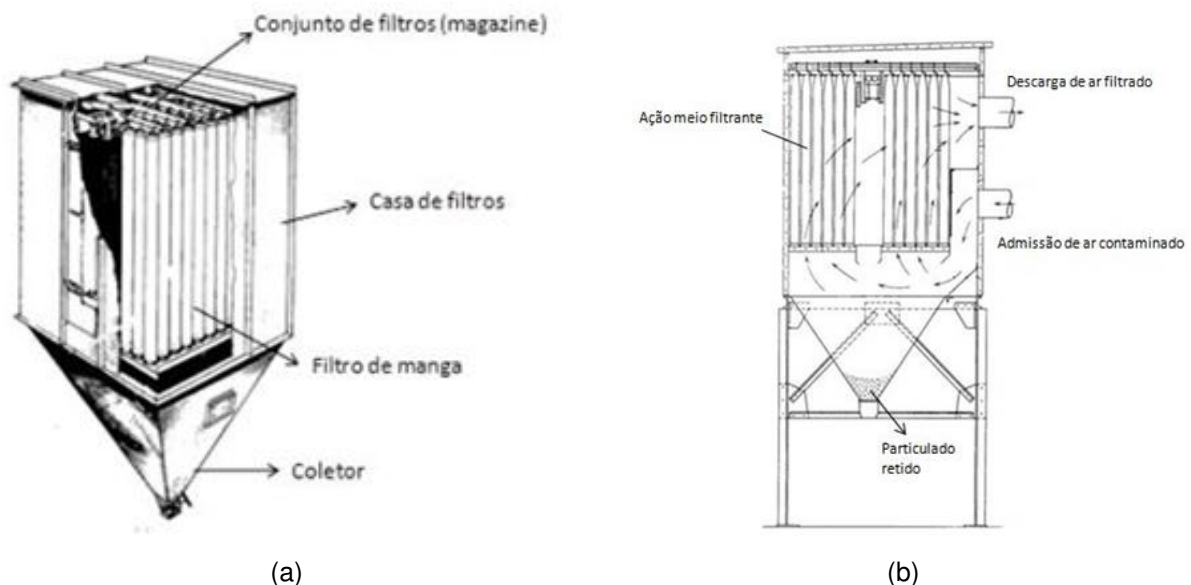


Figura 2.2 – Elementos de uma casa de filtro (a) e esquema de filtragem (b). [Adaptado de Perry e Green, 2012]

A formação da torta de poeira é uma das principais características dos filtros de manga. Ela é resultado do aglutinamento dos particulados conforme a Figura 2.3 ilustra.

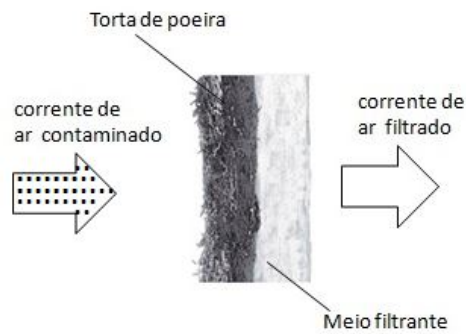


Figura 2.3 – Ilustração de uma torta de poeira.

[Adaptado [www.tapc.com.au/fabricfilter/whatis.html](http://www.tapc.com.au/fabricfilter/whatis.html) acessado em 01/06/2016]

A torta de poeira é sustentada pela estrutura do filtro e impõe uma queda de pressão ao sistema, pois obstrui a passagem das correntes de ar. No entanto, garante a alta eficiência do filtro de manga ao capturar particulados na ordem de até  $2,0 \mu\text{m}$  de diâmetro [Dennis *et al.*, 1977]. Logo, a remoção da torta de poeira em ciclos filtragem é necessária após um ponto ótimo. A Figura 2.4 mostra as curvas dos parâmetros de filtragem durante um ciclo.

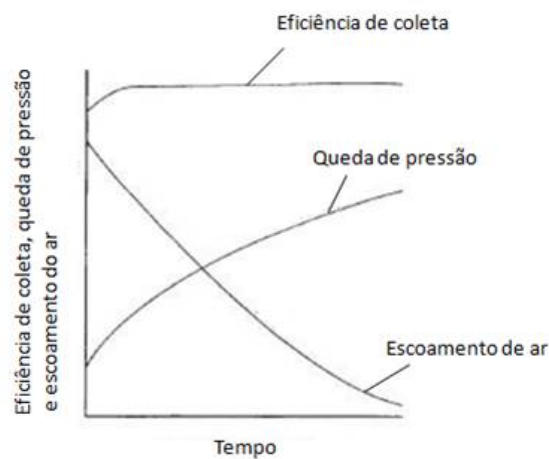


Figura 2.4 – Curva de funcionamento do filtro de manga em relação aos seus principais parâmetros. [Adaptado de Sutherland, 2008].

Na Figura 2.4, os valores para a queda de pressão aumentam, enquanto a quantidade de ar escoando pelo filtro diminui. Percebe-se também que o valor de eficiência cresce rapidamente e tende a permanecer constante ao longo do ciclo.

### 2.3 Métodos de Limpeza

Em Sutherland, 2008, são apresentados os três principais métodos para a limpeza de filtros de tecido: os *shakers* mecânicos, o escoamento reverso (*reverse flow*) e os jatos em pulso (*pulse jets*) ilustrados na Figura 2.5.

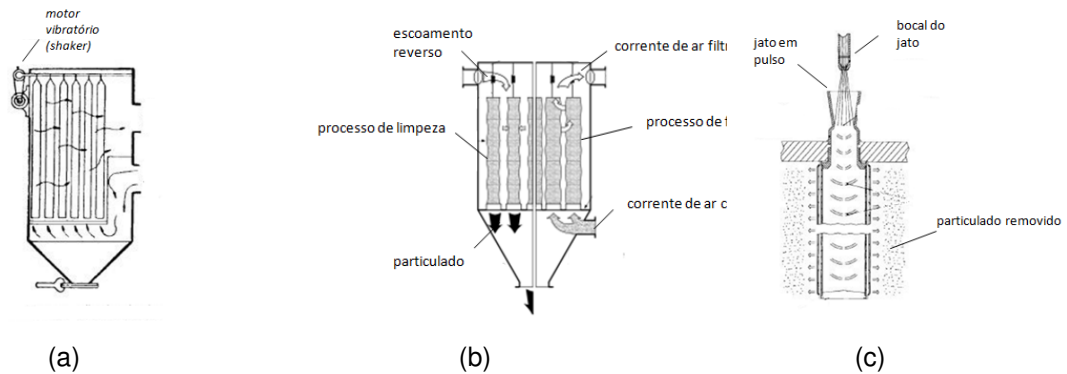


Figura 2.5 – Esquema dos principais métodos de limpeza para filtros de manga. As Figuras 2.5a, 2.5b e 2.5c ilustram respectivamente, o *shaker* mecânico, o escoamento reverso e os jatos em pulso. [Sutherland, 2008]

A torta de poeira é destacada do filtro através de vibração induzida pelos métodos apresentados. Para o escoamento reverso, o escoamento é aplicado no sentido oposto para induzir o filtro a vibrar. Dentre estes métodos, o mais eficiente é o jato em pulso. No entanto, esse método não é apropriado para filtros feitos de materiais frágeis, condição na qual utiliza-se o escoamento reverso [Perry e Green, 2012]. Para realizar a limpeza de um magazine é preciso retirá-lo de operação. Deste modo, para não interromper o ciclo de operação, os magazines são limpos individualmente de forma sequencial. A Figura 2.6 ilustra o processo de limpeza dos magazines.

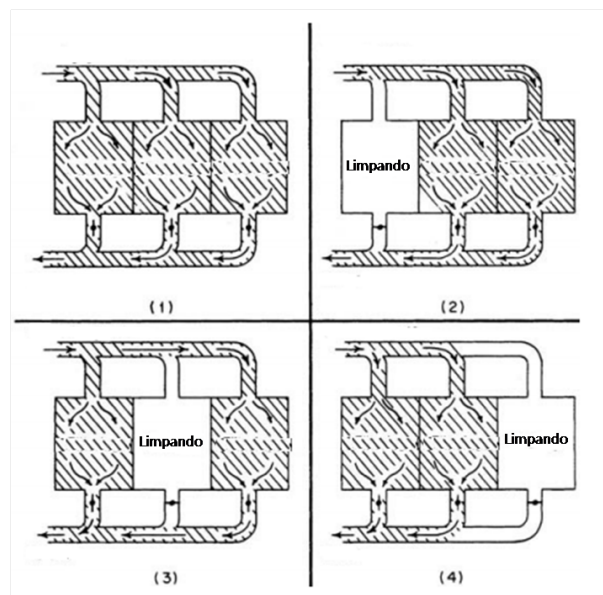


Figura 2.6 – Limpeza em estágio de três magazines. [Perry e Green, 2012]

Conforme a figura acima, uma casa de filtros composta por três magazines passa por um processo de limpeza. Enquanto um magazine é limpo os outros continuam operando de forma independente.

### 3 MODELO EPA

Esta seção trata das capacidades e restrições do Modelo EPA, seu método de análise e as equações resolvidas. Todas as equações desta seção são encontradas em Dennis *et al.*, 1977.

### 3.1 Capacidades e restrições

O Modelo EPA simula uma casa de filtros. Sua principal característica é analisar um sistema multi compartimentado de forma iterativa. A seguir segue suas capacidades:

- Análise de sistemas com multi compartimentos,  $I$  magazines possuindo  $J$  filtros dentro de uma casa de filtros.
- Simulação de processos de limpeza controlados por tempo ou por uma queda de pressão máxima admissível.
- Métodos de limpeza empregados por escoamento reverso (*reverse flow*), *mechanical shaking* ou a combinação de ambos.
- Os parâmetros de operação são calculados para todos os elementos (filtro  $j$  de um magazine  $i$ ).

As restrições estão relacionadas com as correlações empíricas utilizadas no equacionamento do Modelo EPA (seção 3.3) e as condições de contorno necessárias para a simulação. As restrições do modelo são dadas nos itens a seguir:

- O sistema precisa ter como condição de contorno uma velocidade de alimentação constante ou uma queda de pressão constante.
- O particulado deve ser constituído de cinzas de carvão volantes ou possuir propriedades físicas semelhantes. A granulometria destes será discutida na seção 3.3.
- O meio filtrante deve ter características similares aos utilizados no trabalho referenciado. (Apêndice C).

### 3.2 Método de Análise

O problema é analisado na forma de um circuito, esquematizado na Figura 3.1. Nesta figura, os retângulos maiores representam os magazines e os menores os filtros. Os parâmetros físicos do problema são situados localmente pelos subíndices  $i$  e  $j$ . Conforme comentado na seção 3.1, o modelo implementado necessita de uma velocidade  $V$  de alimentação constante ou uma queda de pressão  $\Delta P$  prescrita. Uma analogia pode ser feita com circuitos elétricos, em que  $\Delta P$  é o diferencial de potencial,  $V$  a corrente elétrica e  $w$  a resistência. O Modelo EPA pode simular até 10 filtros. A quantidade de filtros  $J$  é dada em função do parâmetro de entrada  $a_c$ , que representa a fração de filtros que são limpos após o processo de limpeza.

A representação matemática do processo de limpeza no Modelo EPA está na Figura 3.2. Nesta figura, o magazine n°5 destacado, está em processo de limpeza. Na modelagem matemática, essa representação é dada por um valor de arrasto ( $S_{ij}$ ) de  $10^{20}$  e velocidade de face de filtragem ( $V_{ij}$ ) nula. Em outra analogia com circuitos elétricos, pode-se considerar o magazine limpo com corrente nula e resistência infinita.

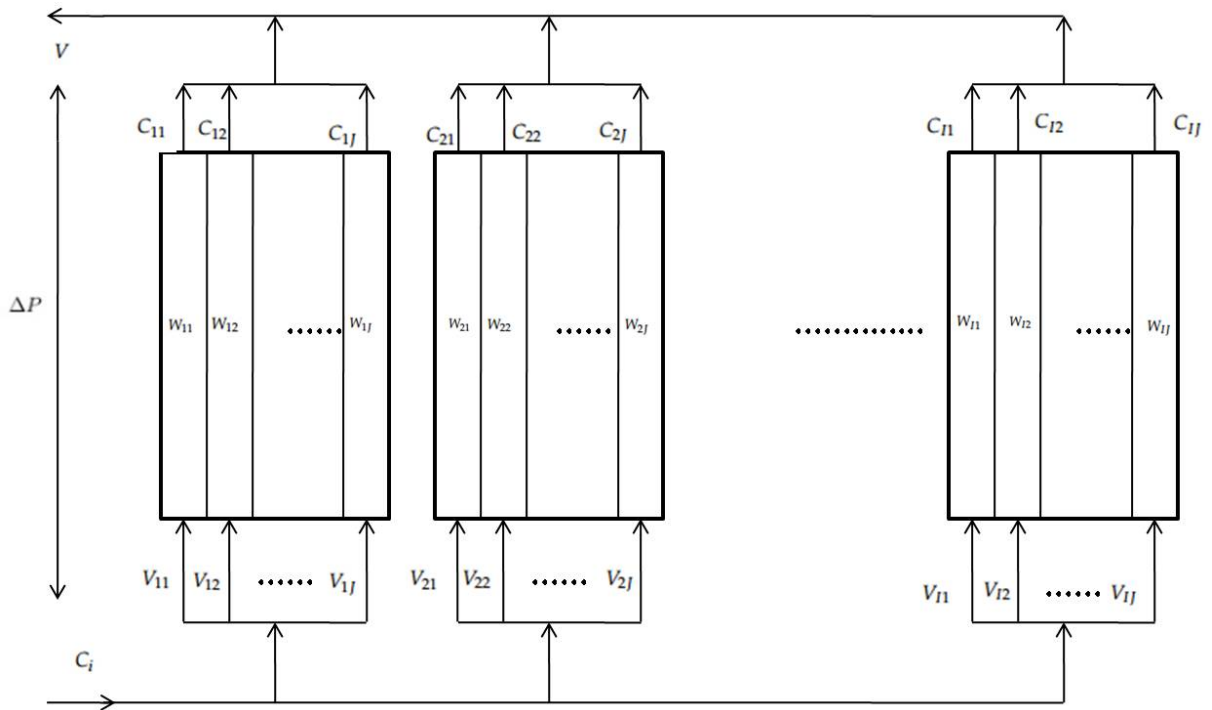


Figura 3.1 – Método de análise do Modelo EPA para sistemas multi compartimentado. [Adaptado de Dennis *et al.*, 1977].

| BAG-DRAG=   | AREA 1   | AREA 2   | AREA 3   | AREA 4   | AREA 5   | AREA 6   | AREA 7   | AREA 8   | SBAG     |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1   | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.22E+03 | 1.22E+03 | 1.22E+03 | 1.51E+03 |
| 2   | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.23E+03 | 1.23E+03 | 1.23E+03 | 1.52E+03 |
| 3   | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.24E+03 | 1.24E+03 | 1.24E+03 | 1.52E+03 |
| 4   | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.25E+03 | 1.25E+03 | 1.25E+03 | 1.52E+03 |
| 5   | 1.00E+20 | 1.00E+20 | 1.00E+20 | 1.00E+20 | 1.00E+20 | 1.00E+20 | 1.00E+20 | 1.00E+20 | 1.00E+20 |
| 6   | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.77E+03 | 1.21E+03 | 1.21E+03 | 1.21E+03 | 1.51E+03 |
| BAG-FLOW=   | AREA 1   | AREA 2   | AREA 3   | AREA 4   | AREA 5   | AREA 6   | AREA 7   | AREA 8   | QBAG     |
| 1   | 8.57E-01 | 8.57E-01 | 8.57E-01 | 8.57E-01 | 8.57E-01 | 1.24E+00 | 1.24E+00 | 1.24E+00 | 1.00E+00 |
| 2   | 8.58E-01 | 8.58E-01 | 8.58E-01 | 8.58E-01 | 8.58E-01 | 1.23E+00 | 1.23E+00 | 1.23E+00 | 9.97E-01 |
| 3   | 8.58E-01 | 8.58E-01 | 8.58E-01 | 8.58E-01 | 8.58E-01 | 1.22E+00 | 1.22E+00 | 1.22E+00 | 9.94E-01 |
| 4   | 8.58E-01 | 8.58E-01 | 8.58E-01 | 8.58E-01 | 8.58E-01 | 1.21E+00 | 1.21E+00 | 1.21E+00 | 9.93E-01 |
| 5   | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 1.51E-17 |
| 6   | 8.57E-01 | 8.57E-01 | 8.57E-01 | 8.57E-01 | 8.57E-01 | 1.25E+00 | 1.25E+00 | 1.25E+00 | 1.00E+00 |
| T= 190.0 DELP= 1.51E+00 DELQ= 0.00 CONCENTRATION= .245E-02<br>BAG 1 BAG 2 BAG 3 BAG 4 BAG 5 BAG 6 BAG<br>T= 6.00 10.00 14.00 18.00 22.00 2.00<br>CAKE 9.1977E+02 9.2291E+02 9.2621E+02 9.2969E+02 9.2874E+02 9.1676E+02<br>SBAG 0.1513E+04 0.1518E+04 0.1524E+04 0.1530E+04 0.1000E+21 0.1508E+04<br>QBAG 0.1001E+01 0.9972E+00 0.9936E+00 0.9897E+00 0.1514E-16 0.1604E+01 |          |          |          |          |          |          |          |          |          |

Figura 3.2 – Representação matemática do Modelo EPA para processos de limpeza. [Adaptado de Dennis *et al.*, 1977]

### 3.3 Equações resolvidas

O coeficiente de resistência ao escoamento da torta local,  $K_{2ij}$ , é calculado por

$$K_{2ij} = K_2 \cdot (V_{ij} / 0.61)^{1/2}, \tag{3.1}$$

o arrasto local, para um filtro,  $S_{ij}$ , é dado por

$$S_{ij} = S_E + K_{2ij} w_{ij}. \tag{3.2}$$

De modo análogo, o arrasto para um magazine,  $S_i$ , é definido por

$$S_i = J \sum_{j=1}^J \frac{1}{S_{ij}}, \tag{3.3}$$

e o arrasto para a casa de filtros,  $S_t$ , é dado por

$$S_t = I \sum_{i=1}^I \frac{1}{S_{it}}. \quad (3.4)$$

A queda de pressão da casa de filtros,  $\Delta P_t$ , é calculada por

$$\Delta P_t = V_{f_t} S_t + V_R S_t / I, \quad (3.5)$$

$V_R$  apenas é contabilizada na expressão durante o processo de limpeza, caso contrário, seu valor é nulo.

A velocidade de face de filtragem,  $V_{ij_t}$ , só pode ser determinada após calculada a queda de pressão, portanto é resolvida para o próximo passo de tempo por

$$V_{ij_{t+\Delta t}} = \Delta P_t / S_{ij_t}. \quad (3.6)$$

no primeiro passo, seu valor é igual ao valor da velocidade alimentação. A velocidade média de filtragem da casa de filtros pode ser calculada por

$$V_{t+\Delta t} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{V_{ij_t}}{IJ}. \quad (3.7)$$

A penetração de particulado,  $Pn_{ij}$ , é um parâmetro adimensional dado por

$$Pn_{ij} = C_o / C_i, \quad (3.8)$$

em que  $C_o$  é a concentração de particulado após a filtragem e  $C_i$  a concentração anterior a esta. Portanto, em uma filtragem de eficiência máxima a penetração é nula, ou seja todo o particulado é capturado. Mais detalhes são apresentados no Apêndice A. Para cinzas de carvão volantes em filtros de fibra de vidro a penetração,  $Pn_{ij_t}$ , é calculada localmente por

$$Pn_{ij_t} = Pn_s + (0.1 - Pn_s) e^{-aw_{ij_t}} + C_R / C_i, \quad (3.9)$$

em que a penetração em regime permanente,  $Pn_s$ , é dada por

$$Pn_s = 1.5 \cdot 10^{-7} e^{12.7(1 - e^{-1.03V_{ij_t}})}, \quad (3.10)$$

e a taxa de decaimento,  $a$ , de crescimento da torta de poeira é definida por

$$a = \frac{3.6 \cdot 10^{-6}}{V_{ij_t}^4} + 0.094. \quad (3.11)$$

A penetração total da casa de filtros é

$$Pn_t = \frac{1}{VIJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J Pn_{ij_t} V_{ij_t}. \quad (3.12)$$

Estas equações de penetração consideram apenas a penetração de partículas de tamanho menor ou igual a  $1,0 \mu m$ . Segundo Dennis *et al.*, 1977, não houve tentativas de estimar partículas maiores pois a captura é certa. O cálculo do carregamento superficial local,  $w_{ij_{t+\Delta t}}$ , para o próximo passo no tempo é dado por

$$w_{ij_{t+\Delta t}} = V_{ij_t} (1 - Pn_{ij_t}) \Delta t C_i + w_{ij_t}. \quad (3.13)$$



## 4 MODELO IMPLEMENTADO

### 4.1 Lógica de Solução

O fluxograma do Modelo implementado é ilustrado na figura na Figura 4.1.

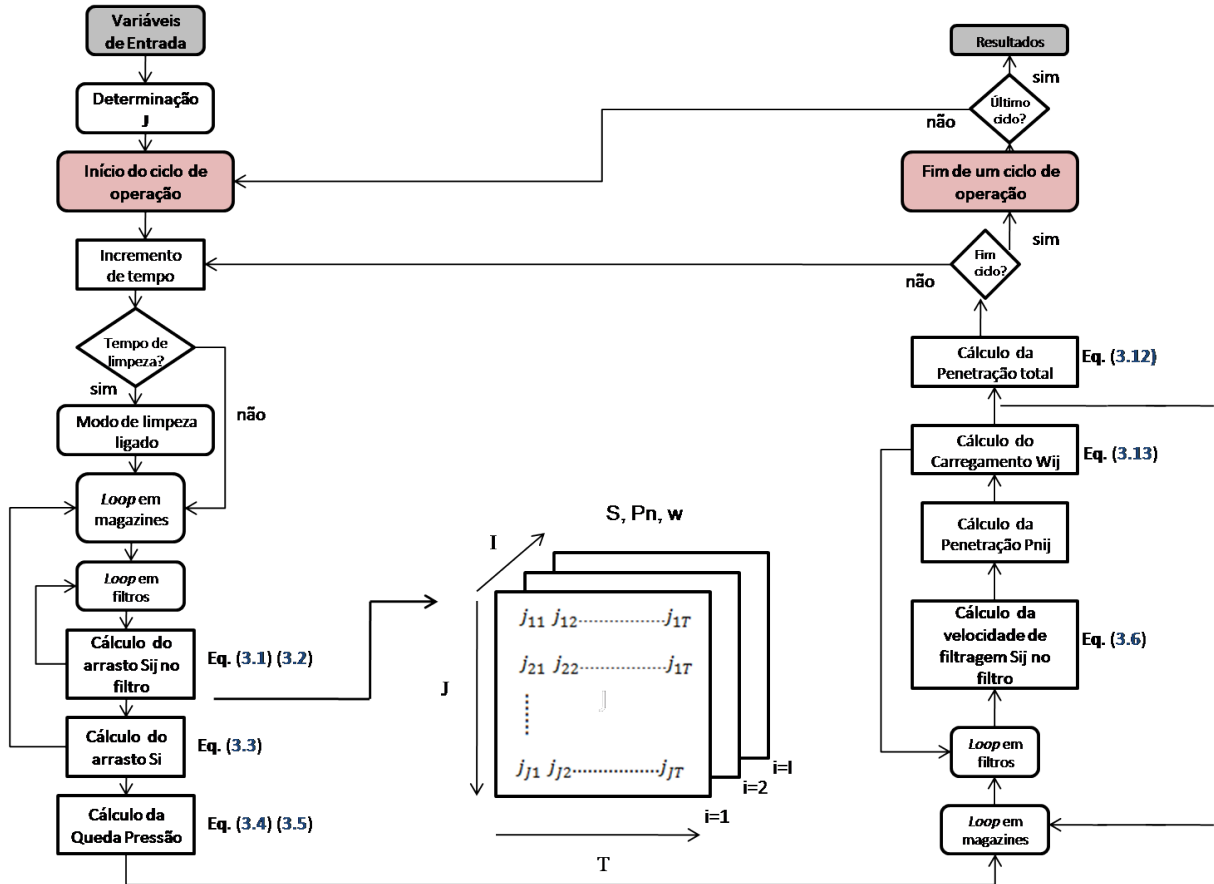


Figura 4.1 – Fluxograma da lógica do Modelo Implementado.

O cálculo dos parâmetros ocorre dentro de laços de repetição, estes dão o posicionamento dentro de uma matriz de dados em que o parâmetro será armazenado. O processo de limpeza inicia quando o teste condicional retorna verdadeiro, ao final do processo inicia-se um novo ciclo de filtração.

### 4.2 Processo de limpeza no Modelo

No Modelo Implementado, o processo de limpeza ocorre individualmente em estágios, conforme a Figura 2.6. Seu cálculo é feito de forma diferente do Modelo EPA. Devido a dificuldades em utilizar o mesmo valor do Modelo EPA para o arrasto  $S_{ij}$ , neste trabalho utilizou-se a constante *inf* do MATLAB®.

No Modelo EPA, o cálculo da quantidade de particulado retirado durante a limpeza é feito fora do algoritmo. Logo, o presente trabalho apresentou hipóteses para calculá-lo. No Apêndice B foi realizada uma comparação entre as principais hipóteses para escolher o melhor método.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção contém a validação do modelo, sua análise de sensibilidade e uma estimativa da densidade de potência em função da queda de pressão.



## 5.1 Validação do Modelo Implementado

A Tabela 5.2 mostra a comparação entre os erros relativos entre os resultados calculados pelo Modelo Implementado e o trabalho de referência (EPA). Os dados de entrada utilizados na simulação estão na Tabela 5.1. Os resultados do Modelo Implementado foram capazes de captar o comportamento das curvas do Modelo EPA. Foram simulados três ciclos de filtração, intercalados por dois processos de limpeza. As discontinuidades dos valores dos parâmetros queda de pressão, penetração e velocidade média de filtração presentes na Figura 5.1 decorrem do processo de limpeza. Os valores de queda de pressão (Figura 5.1a) foram calculados pela Equação 3.5, os valores de penetração (Figura 5.1b) pela Equação 3.12 e os valores de velocidade média de filtração (Figura 5.1a) pela Equação 3.7.

Tabela 5.1 – Dados de entrada utilizados na simulação.

| Dados de entrada   |                   |
|--|-------------------|
| Número de magazines, $I$   | 6                 |
| Tempo de limpeza por magazine, min                                   | 4,0               |
| Velocidade de alimentação, $V$ , m/min                               | 0,824             |
| Concentração de entrada, $C_i$ , g/m <sup>2</sup>                    | 2,6               |
| Queda de pressão admissível, $\Delta P_{m\acute{a}x}$ , Pa           | 1160              |
| Temperatura do gás de entrada, °C                                    | 139               |
| Velocidade de escoamento reverso, $V_R$ , m/min                      | 0,0415            |
| Arrasto efetivo do filtro, $S_E$ , N.min/m <sup>3</sup>              | 434               |
| Coeficiente de resistência da torta, $K_2$ °, N.min/g.m <sup>3</sup> | 0,76 <sup>a</sup> |
| Carregamento superficial residual, $w_R$ , g/m <sup>2</sup>          | 806               |
| Carregamento superficial inicial, $w_i$ , g/m <sup>2</sup>           | 806               |

<sup>a</sup>Medido a 25°, 0,61 m/min.

Tabela 5.2 – Erros relativos entre os valores simulados no presente trabalho e Modelo EPA.

| Ciclo de filtração | Erro $\Delta P$ | Erro Eficiência de filtração |
|--------------------|-----------------|------------------------------|
| 1°                 | 9,55%           | 4,05%                        |
| 2°                 | 5,73%           | 3,02%                        |
| 3°                 | 13,16%          | 28,83%                       |

Para determinar os valores da Tabela 5.2, foram feitas interpolações entre os dados simulados e posteriormente calculado uma integral no tempo para estas. Com os resultados finais calcularam-se os erros relativos. A Tabela 5.2 apresenta uma menor precisão nos valores para o terceiro ciclo, apesar de contradizer a Figura 5.1a. Isto ocorre pois o Modelo Implementado simula valores de maior magnitude do que o Modelo EPA neste ciclo. Logo, pelo do erro relativo é maior a incerteza.

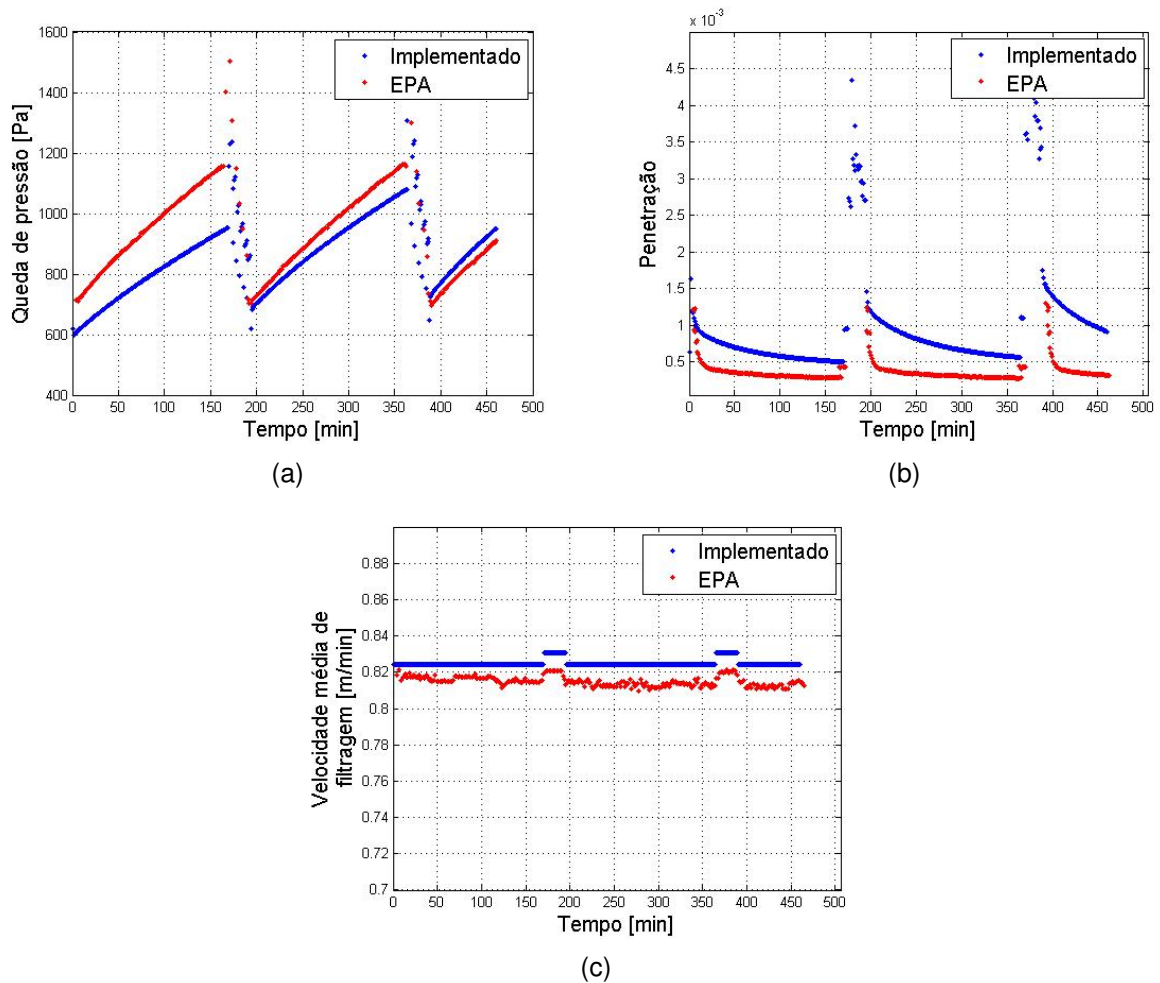


Figura 5.1 – Queda de Pressão (a), Penetração (b), Velocidade média de filtragem (c), obtidas no presente trabalho em comparação com os resultados do Modelo EPA.

## 5.2 Análise de sensibilidade

Os processos de limpeza foram excluídos e o cálculo foi realizado com o acúmulo de particulados de forma constante, conforme a Equação 3.13. Os dados de entrada permanecem os mesmos da simulação de validação. As Figuras 5.2(a) e (b) apresentam o comportamento da queda de pressão e penetração, respectivamente, para diferentes velocidades de face de filtragem. Na Figura 5.2a, a velocidade é incrementada linearmente, porém a queda de pressão é mais acentuada para velocidades mais altas, o que evidencia a relação quadrática da queda de pressão com a velocidade de face de filtragem. Esse comportamento é encontrado em estudos experimentais como em Cheng e Tsai, 1998. Na Figura 5.2b, os valores de penetração aumentam junto com a velocidade de face de filtragem, o que leva à diminuição da eficiência de filtragem. Este comportamento também foi relatado no trabalho de referência [Dennis *et al.*, 1977]. De acordo com estes autores, maiores emissões em altas velocidades são consistentes para tortas de poeira formadas em tecidos de fibra de vidro. Todavia, outros estudos relatam menor penetração de particulados em velocidades mais elevadas. Chen e Hsiau, 2009, que utilizam a combinação de cinzas de carvão com filtro de papel, descrevem este último efeito.

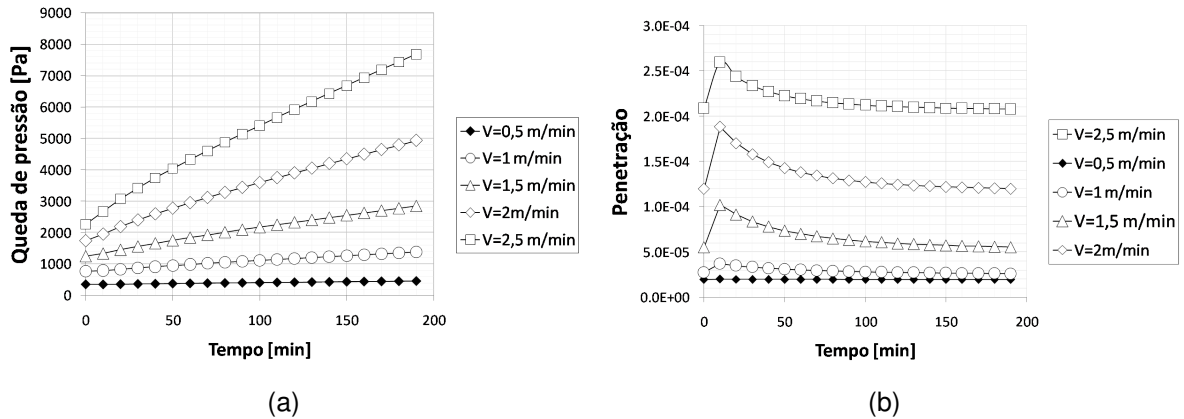


Figura 5.2 – Análise de sensibilidade pela parametrização da velocidade de face de filtragem para queda de pressão (5.2a) e penetração de particulado (5.2b).

A Figura 5.3 mostra a variação do carregamento superficial para diferentes velocidades de filtragem. A figura mostra que o carregamento superficial será maior para velocidades mais elevadas. Logo, a deposição do particulado e conseqüentemente o crescimento da torta nestas velocidades é maior, resultando no aumento mais rápido da perda de carga. Este efeito foi relatado em Silva *et al.*, 1999.

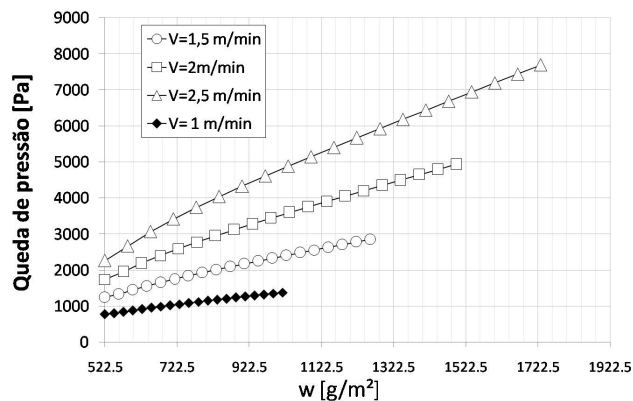


Figura 5.3 – Análise de sensibilidade pela parametrização da velocidade de face de filtragem para o carregamento de particulado.

### 5.3 Estimativa de densidade de potência

A estimativa de densidade de potência,  $\dot{W}/A$ , foi calculada pela variação da equação encontrada em Henn, 2006, para máquinas de fluxo dado por

$$\frac{\dot{W}}{A} = \frac{\Delta P V_f}{\eta} \quad (5.1)$$

Foi simulado um processo de filtragem com os dados da Tabela 5.1, para uma velocidade de face de filtragem ( $V_{i,j_i}$ ) de 1,5 [m/min] e eficiência de operação,  $\eta$ , de 60%.

Tabela 5.3 – Estimativa da densidade de potência necessária para filtração em função da perda de carga.

| $w$ [g/m <sup>2</sup> ] | $\Delta P$ [Pa] | $\dot{W}/A$ [W/m <sup>2</sup> ] |
|-------------------------|-----------------|---------------------------------|
| 522.50                  | 1241,80         | 51,74                           |
| 561.08                  | 1328,20         | 55,34                           |
| 599.71                  | 1446,80         | 60,28                           |
| 638.36                  | 1554,50         | 64,77                           |
| 677.05                  | 1654,60         | 68,93                           |
| 715.75                  | 1748,50         | 72,85                           |
| 754.47                  | 1838,30         | 76,60                           |
| 793.20                  | 1924,80         | 80,20                           |
| 831.94                  | 2008,70         | 83,70                           |
| 870.69                  | 2090,40         | 87,10                           |
| 909.45                  | 2170,50         | 90,44                           |
| 948.21                  | 2249,10         | 93,71                           |
| 986.98                  | 2326,60         | 96,94                           |
| 1025.70                 | 2403,10         | 100,13                          |
| 1064.50                 | 2478,80         | 103,28                          |
| 1103.30                 | 2553,70         | 106,40                          |
| 1142.10                 | 2628,10         | 109,50                          |
| 1180.80                 | 2701,90         | 112,58                          |
| 1219.60                 | 2775,30         | 115,64                          |
| 1258.40                 | 2848,40         | 118,68                          |

calculado para  $V_f = 1,5$  m/min.

Estes resultados foram simulados para um tempo total de 200 minutos, com um incremento de tempo de 10 minutos. Neste caso também foi considerado um acúmulo de particulados constante, sem processos de limpeza. Verifica-se que os valores para a densidade de potência aumentam com a queda de pressão.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta a implementação do modelo apresentado por Dennis *et al.*, 1977, em ambiente MATLAB®. O modelo implementado conseguiu captar o comportamento das curvas do trabalho de referência. Estes valores calculados possuem menor erro nos dois primeiros ciclos, porém aumentam consideravelmente no terceiro ciclo. Estes erros são associados ao método utilizado para estimar a quantidade de particulado removido durante os processos de limpeza (Apêndice 2.3). Em Dennis *et al.*, 1977, este cálculo não é equacionado, pois ocorre fora do algoritmo.

Após implementado o modelo, foi realizada uma análise de sensibilidade e uma estimativa de densidade de potência necessária para ciclos de filtração. Nesta análise, as principais variáveis referentes a filtração por torta foram parametrizadas. Os resultados foram condizentes com o encontrado na literatura. Foi possível perceber a relação quadrática entre o aumento da queda de pressão e a velocidade de face de filtração. Observou-se também que a taxa de crescimento da torta é mais rápida em velocidades mais elevadas. Foram encontradas divergências para o efeito da velocidade de face de filtração com a eficiência de filtração. Nos resultados obtidos pelo Modelo Implementado e Dennis *et al.*, 1977, a eficiência é menor para velocidades mais elevadas. Todavia, outros trabalhos na literatura relatam que a eficiência cresce junto com a velocidade de face de filtração.

Para trabalhos futuros, propõe-se mais pesquisas sobre a influência da velocidade de face na eficiência de filtragem de cinzas de carvão voltantes em filtros de fibra de vidro. Obter a estimativa da eficiência do processo de limpeza para quantificar o particulado removido. Também sugere-se, estipular correlações de penetração para particulados oriundos de RSU em geral para que o modelo implementado possa equacionar particulados oriundos de coqueima.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Otoom, A. "**Prediction of the collection efficiency, the porosity, and the pressure drop across filter cakes in particulate air filtration**". Atmospheric Environment, University of Mutah, Jordan, v.39, p.51–57, 2004.
- Ballester, J., Santiago, J. "**Kinetic parameters for the oxidation of pulverised coal as measured from drop tube testsOriginal**". Combustion and Flame, v.142, n.3, p.210–222, 2005.
- Callado, N. "**Gerenciamento de Resíduos Sólidos**". Disciplina do Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió, 2005. (Notas de aula) – Centro de Tecnologia do Departamento de Engenharia Civil - UFAL, Universidade Federal de Alagoas., v.27, 2005.
- Chen, Y., Hsiau, S. "**Cake formation and growth in cake formation**". Powder Technology, Department of Mechanical Engineering, National Central University, Chung-Li, 32001, Taiwan, ROC, v.192, p.217–224, 2009.
- Cheng, Y., Tsai, C. "**Factors Influencing Pressure Drop through a Dust Cake during Filtration**". Aerosol Science and Technology, 1998.
- Choi, J., Ha, S., Park, Y. "**The Effect of Particle Shape on the Pressure Drop across the Dust Cake**". Korean Journal of Chemical Engineering, v.19, n.4, 2002.
- Dennis, R., Class, R., Klemm, H. "**Filtration Model for Coal Fly Ash With Glass Fabrics**". Environmental Protection Agency.ed. Washington D.C., US: [s.n.], 1977.
- Henn, E. "**Máquinas de Fluido**". 2ª edição.ed. Santa Maria, RS, Brasil: editoraufsm, 2006.
- Lupion, M., Rodriguez-Galan, M., AAlonso-Fariñas, B., Ortiz, F. "**Investigation of the parameters of influence on dust porosity in hot gas filtration**". Powder Technology, Chemical and Environmental Engineering Department, University of Seville, Spain, p.592–598, 2014.
- Perry, R., Green, D. "**Perry's Chemical Engineerings**". 8ª edição.ed. [S.l.]: The McGraw-Hill Global Education Holdings, 2012. 1886–1921p.
- Rhode, G., Zwonok, M., Chies, O., Da Silva, N. "**Cinzas de carvão fóssil no Brasil: aspectos técnicos e ambientais.**". Porto Alegre: CIENTEC, 2006. v1.
- Seelig, M., Smith Schneider, P., Saffer, M. "**Coqueima de carvão e resíduos sólidos urbanos: será o lixo o futuro do carvão?**". In:, 2011. Anais... [S.l.: s.n.], 2011.
- Silva, C., Negrini, V., Aguiar, M., Coury, J. "**Influence of gas velocity on cake formation and detachment**". Powder Technology, DEQ/UFSCar, C.P. 676, São Carlos (SP), Brazil, n.101, 1999.
- Sutherland, K. "**Filters and Filtration Handbook**". 5ª edição.ed. [S.l.]: Elsevier, 2008.

## APÊNDICE A – EFICIÊNCIA DE FILTRAGEM

A Eficiência de filtragem é o complemento da penetração de particulado. Seu equacionamento é dado a seguir

$$\eta_{filtragem} = 1 - Pn. \quad (A.1)$$

A Figura A.1 apresenta os valores calculados para a Eficiência de filtragem a partir dos dados da Tabela 5.1.

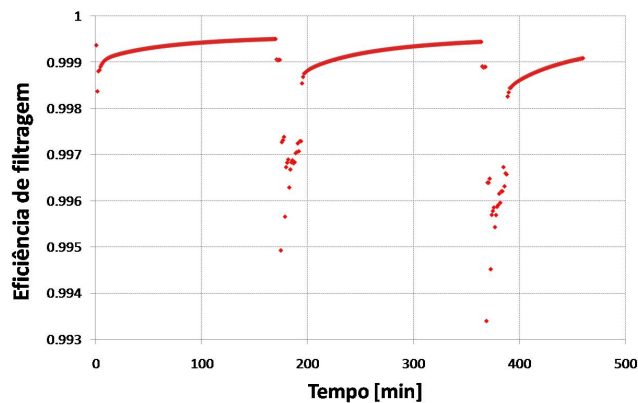


Figura A.1 – Simulação da Eficiência de filtragem.

Nesta figura, os valores de eficiência rapidamente assumem caráter assintótico para um valor entre 0,99 e 1. As descontinuidades são decorrentes do processo de limpeza.

## APÊNDICE B – HIPÓTESES PARA O CÁLCULO DE PARTICULADO REMOVIDO DURANTE A LIMPEZA

### B.1 Limpeza total do magazine

É removido todo o particulado dos filtros durante o processo de limpeza. Portanto, seu carregamento ao fim do processo é igual ao residual,  $w_R$ , dado de entrada da simulação. As Figuras A.2a e A.2b apresentam uma comparação entre uma simulação com essa hipótese e o trabalho de referência.

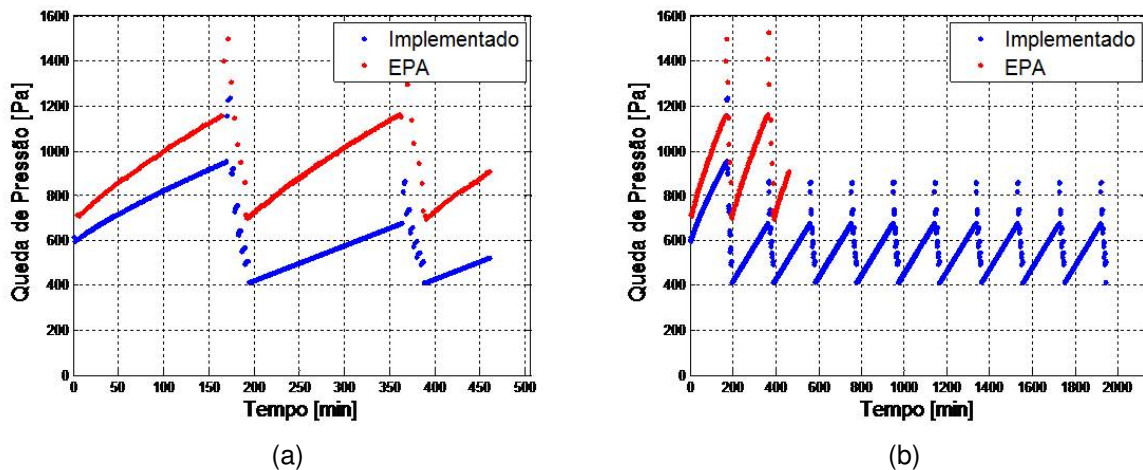


Figura A.2 – Simulação para 2,5 ciclos de filtragem (a) e simulação para 10 ciclos de filtragem (b) para uma limpeza total do magazine.

Nestas figuras, o valor simulado é sempre menor que o de referência. Isto ocorre devido a uma superestimação da eficiência do processo de limpeza, em que todo o particulado é retirado.

## B.2 Limpeza parcial do magazine

Apenas dos filtros inicialmente limpos é retirado carregamento durante o processo de limpeza. Ao fim deste, os filtros limpos apresentam densidade de carregamento igual ao residual. Os que não sofrem o processo continuam com o mesmo carregamento. A Figuras A.3 (a) e (b) apresentam os resultados com essa hipótese em comparação aos valores da referência.

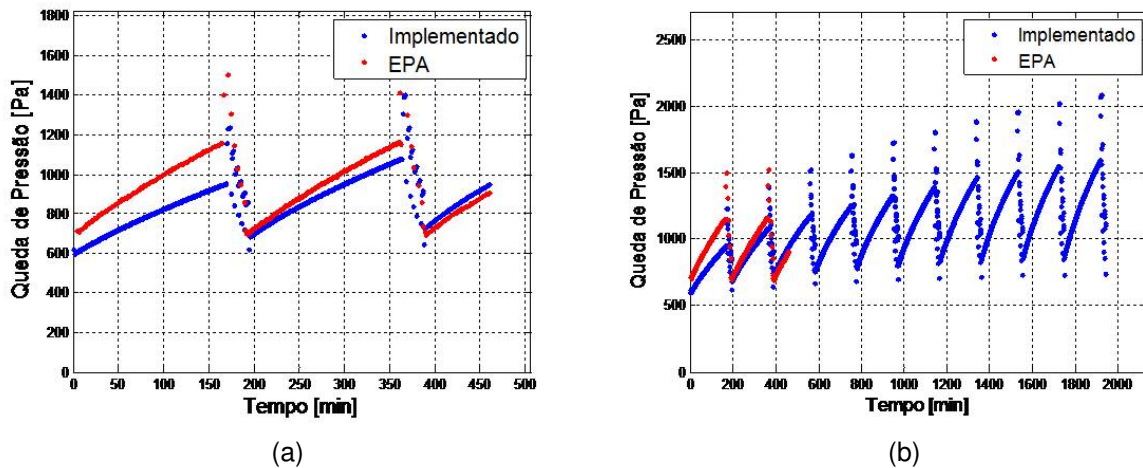


Figura A.3 – Simulação para 2,5 ciclos de filtragem (a) e simulação para 10 ciclos de filtragem (b) para uma limpeza parcial do magazine.

Nestas figuras, o valor simulado é maior que o da referência a partir do terceiro ciclo. Isto ocorre, pois o processo de limpeza tem sua eficiência subestimada neste caso.

## B.3 Hipótese adotada

A hipótese adotada foi a Limpeza parcial, pois apesar de subestimar a quantidade de particulado retirado ela retrata melhor o processo de limpeza. Isto porque estima uma eficiência



ao processo. A hipótese apresenta altos valores de queda de pressão para a uma simulação com vários ciclos. Porém, é a que melhor capta o comportamento da curva do trabalho de referência nos primeiros ciclos.

#### APÊNDICE C – DADOS DO FILTRO DE FIBRA DE VIDRO UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS DO EPA

Tabela C.1 – Informações sobre o tecido de fibra de vidro utilizados nos experimentos em Dennis *et al.*, 1977.

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| Dimensão, comprimento x diâmetro, ft x in         | 22 x 8                              |
| Massa do filtro, g/m <sup>2</sup>                 | 248,89                              |
| <i>Weave</i>                                      | 3x1 <i>Twill</i>                    |
| <i>Warp (w) yarn</i>                              | Multifilamento                      |
| <i>Fill (f) yarn</i>                              | <i>Bulked staple</i>                |
| <i>Yarn (thread) count - w/in.</i>                | 66 x 30                             |
| Permeabilidade por 0,5 in. - ft <sup>3</sup> /min | 86,5                                |
| Aplicação primária                                | <i>shaking</i> e escoamento reverso |
| Tratamento de tecido                              | Proteção de silicone-grafita        |
| Fabricante  | W.W Criswell No. 640048             |