



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**MECÂNICA**

**WAGNER FERREIRA LIMA**

**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE AR EM UM FILTRO DE MANGAS**  
**UTILIZANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Belo Horizonte,  
2019

Wagner Ferreira Lima

**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE AR EM UM FILTRO DE MANGAS  
UTILIZANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Versão Final

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rudolf Huebner.

Belo Horizonte  
2019

L732a	<p>Lima, Wagner Ferreira.  Análise da distribuição de ar em um filtro de mangas utilizando dinâmica dos fluidos computacional [recurso eletrônico] / Wagner Ferreira Lima. - 2019.  1 recurso online (92 f.: il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Rudolf Huebner.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 90-91.</p> <p>Bibliografia: f. 87-89.  Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Ar - Escoamento - Teses.  3. Dinâmica dos fluidos - Teses. I. Huebner, Rudolf. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621 (043)</p>
-------	--



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG  
Tel.: +55 31 3409.5145  
E-mail: [cpgmec@demec.ufmg.br](mailto:cpgmec@demec.ufmg.br)

**ATA DA QUINGENTÉSIMA NONAGÉSIMA TERCEIRA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO ALUNO WAGNER FERREIRA LIMA, REGULARMENTE MATRICULADO NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, REALIZADA NO DIA 28 DE JUNHO DE 2019.**

Aos vinte e oito dias do mês de junho de 2019, às 09:00 horas, no Auditório do Labbio, à Av. Antônio Carlos, 6627, Campus Universitário, Pampulha, reuniram-se os professores abaixo relacionados, formando a Comissão Examinadora homologada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, para julgar a defesa de dissertação do aluno **WAGNER FERREIRA LIMA**, intitulada: "**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE AR EM UM FILTRO DE MANGAS UTILIZANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**", requisito final para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração "Calor e Fluidos". Abrindo a sessão, o Senhor Presidente da Comissão, Prof. Rudolf Huebner, após dar conhecimento aos presentes o teor das normas regulamentares do trabalho final, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores com a respectiva defesa do candidato. Após a defesa, os membros da Banca Examinadora reuniram-se sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foi atribuída a seguinte indicação: o candidato foi considerado aprovado, por unanimidade. O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Senhor Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente Ata, que será assinada por todos os membros participantes da Banca Examinadora. Belo Horizonte, 28 de junho de 2019.

**Prof. Rudolf Huebner**  
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

**Prof. Guilherme de Souza Papini**  
Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

**Dr. Lúcio Barreto Pereira**  
Hunter Consultoria Ltda

## **AGRADECIMENTOS**

À UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, na pessoa do Professor e Orientador Dr. Rudolf Huebner, pelos ensinamentos e experiência profissional, transmitidos durante as aulas expositivas e na orientação deste trabalho.

À minha família e amigos, que me incentivaram e inspiraram através de gestos e palavras a superar todas as dificuldades.

E, principalmente, à minha esposa Karine, pela compreensão, paciência e amor dedicados e aos meus filhos Helena e João, a quem dedico esta conquista.

A todos que, de alguma forma, construíram a realização deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos.

*“Assim como sei que sou, sei também que me conheço.”*

(Agostinho)

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABELAS E QUADROS .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>14</b>
<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>15</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>17</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>18</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>22</b>
2.1 Objetivo geral .....	22
2.2 Objetivos específicos .....	22
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
3.1 Poluição do ar – alguns conceitos .....	23
3.1.1 Poluentes atmosféricos .....	23
3.1.2 Material Particulado (MP).....	24
3.1.3 Padrões de qualidade do ar .....	25
3.1.4 Padrão de emissão de material particulado em fontes fixas .....	25
3.2 Métodos de controle da poluição do ar.....	26
3.3 Medidas para impedir a geração de poluentes .....	26
3.4 Medidas para reduzir a geração de poluentes .....	26
3.5 Tratamento das emissões .....	27
3.6 Filtro de mangas .....	29
3.7 Princípio de funcionamento.....	30
3.8 Descrição do processo de filtração.....	31
3.9 Descrição dos componentes do filtro de mangas.....	33
3.9.1 Câmaras de ar sujo.....	33

3.9.2	Tremonhas .....	33
3.9.3	Carcaça e plenum de saída.....	34
3.9.4	Chapa espelho.....	34
3.9.5	Sistema de distribuição de ar de limpeza.....	35
3.9.6	Sistema de limpeza das mangas .....	36
3.9.6.1	Limpeza por sacudimento das mangas .....	36
3.9.6.2	Limpeza por jato pulsante.....	37
3.9.6.3	Limpeza por ar reverso .....	39
3.9.7	Mangas filtrantes e gaiolas de sustentação .....	40
3.9.8	Manifolds de entrada e saída .....	42
3.9.9	Damper .....	42
3.10	Principais vantagens do filtro de mangas .....	42
3.11	Principais desvantagens do filtro de mangas .....	43
3.12	Eficiência de um filtro de tecido.....	43
3.13	Projeto do filtro de mangas.....	44
3.13.1	Velocidade .....	44
3.13.2	Queda de pressão .....	47
3.13.3	Tecido Filtrante .....	48
3.13.4	Área filtrante total.....	48
3.13.5	Espaçamento entre mangas.....	49
3.14	Fluidodinâmica computacional.....	49
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>52</b>
4.1	Caracterização do Problema .....	52
4.2	Levantamento de campo .....	55
4.2.1	Aquisição dos dados experimentais.....	56
4.3	Modelagem matemática.....	58
4.3.1	Domínio computacional e malha.....	58
4.3.2	Equações básicas .....	62



4.3.3 Calibração do modelo .....	64
4.4 Análise .....	64
4.4.1 Análise analítica .....	64
4.4.2 Análise computacional .....	65
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>68</b>
5.1 Teste da malha .....	68
5.2 Filtro com defletores originais.....	68
5.3 Linhas de corrente .....	69
5.4 Velocidades .....	72
5.5 Distribuição da pressão.....	77
5.6 Conclusão após a primeira análise.....	78
5.7 Alternativas.....	79
5.7.1 Alternativa 1 .....	79
5.7.2 Alternativa 2 .....	83
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>86</b>
6.1 Sugestão para os próximos trabalhos.....	87
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>92</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – Emissão de poluentes.....	24
FIGURA 3.2 – Filtro jato pulsante - princípio de funcionamento .....	31
FIGURA 3.3 – Conjunto de montagem da manga na chapa espelho .....	34
FIGURA 3.4 – Partes de um filtro de mangas.....	35
FIGURA 3.5 – Sistema de distribuição de ar .....	36
FIGURA 3.6 – Sistema de limpeza das mangas.....	36
FIGURA 3.7 – Filtro de Mangas Tipo Limpeza por Vibração Mecânica.....	37
FIGURA 3.8 – Filtro de Mangas Tipo Limpeza por Jato Pulsante .....	38
FIGURA 3.9 – Esquema de limpeza .....	39
FIGURA 3.10 – Limpeza tipo ar reverso .....	40
FIGURA 3.11 – Mangas Filtrantes .....	40
FIGURA 3.12 – Gaiolas de sustentação das mangas .....	41
FIGURA 3.13 – Queda de pressão durante ciclo de limpeza filtro de mangas.....	47
FIGURA 3.14 – CFD aplicado ao sistema de limpeza das mangas .....	51
FIGURA 4.1 – Mangas desgastada na parte inferior.....	53
FIGURA 4.2 – Aglomerado de mangas .....	53
FIGURA 4.3 – Plenum de entrada do filtro .....	54
FIGURA 4.4 – Quadro de defletores original .....	54
FIGURA 4.5 – Filtro de mangas .....	56
FIGURA 4.6 – Pontos de medição da diferença de pressão da câmara .....	57
FIGURA 4.7 – Layout do ponto de medição e vazão .....	57
FIGURA 4.8 – Quadro defletores – projeto original.....	58
FIGURA 4.9 – Vista frontal da câmara de uma câmara do filtro de mangas.....	59
FIGURA 4.10 – Vista da câmara de uma câmara do filtro de mangas .....	59
FIGURA 4.11 – Malha gerada no compartimento .....	60
FIGURA 4.12 – Corte mostrando o interior da câmara de ar sujo.....	60
FIGURA 4.13 – Dados da malha .....	61
FIGURA 4.14 – Condição de contorno de entrada e saída do fluido na tremonha.....	66
FIGURA 4.15 – Condição de contorno das mangas .....	67
FIGURA 5.1 – Geometria conforme projeto original .....	69
FIGURA 5.2 – Linhas de corrente na face oposta a entrada da tremonha .....	69

FIGURA 5.3 – Vista lateral das linhas de corrente dentro da câmara .....	70
FIGURA 5.4 – Velocidade do escoamento dentro da tremonha e câmara de ar sujo .....	71
FIGURA 5.5 – Contornos da velocidade dentro da câmara de ar sujo e tremonha do filtro....	71
FIGURA 5.6 – Plano de referência mostrando a velocidade na entrada da tremonha .....	72
FIGURA 5.7 – Perfil de velocidade na face oposta à entrada da tremonha .....	73
FIGURA 5.8 – Perfil de velocidades no plano imediatamente antes das mangas.....	74
FIGURA 5.9 – Perfil de velocidades no plano antes das mangas .....	74
FIGURA 5.10 – Perfil de velocidades no plano de simetria .....	75
FIGURA 5.11 – PPerfil de velocidade nos planos inferior, central e superior na câmara de ar sujo .....	75
FIGURA 5.12 – Perfil de pressão na câmara de ar sujo.....	77
FIGURA 5.13 – Geometria alterada.....	749
FIGURA 5.14 – Defletores da tremonha e defletor da entrada .....	80
FIGURA 5.15 – Perfil de velocidade no plano de simetria.....	81
FIGURA 5.16 – Linhass de corrente mostrando o escoamento .....	81
FIGURA 5.17 – Perfil de velocidade no plano oposto à entrada .....	82
FIGURA 5.18 – Perfil de velocidade nos planos inserido dentro da câmara de ar sujo .....	83
FIGURA 5.19 – Perfil de velocidade com a vazão reduzida.....	84
FIGURA 5.20 – Perfil de velocidade face de entrada da tremonha .....	84
FIGURA 5.21 – Perfil de velocidade na face oposta à entrada do escoamento .....	85

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

QUADRO 3.1 - Comparação entre os principais tecidos filtrantes.....	41
QUADRO 3.2 - Características dos principais meios filtrantes .....	42
TABELA 4.1 - Dados do filtro de mangas estudado.....	55
TABELA 5.1 - Dados do filtro obtidos via cálculo analítico .....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ASME</b>	Society of Mechanical Engineers
<b>CAE</b>	Computer-Aided Engineering ou, em português, Engenharia Auxiliada por Computador
<b>DEMEC</b>	Departamento de Engenharia Mecânica
<b>MEF</b>	Método dos Elementos Finitos
<b>PPGMEC</b>	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
<b>UFMG</b>	Universidade Federal de Minas Gerais
<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency
<b>COPAM</b>	Conselho Estadual De Política Ambiental
<b>CONOMA</b>	Conselho Nacional do Meio Ambiente
<b>SISNAMA</b>	Sistema Nacional de Meio Ambiente

## LISTA DE SÍMBOLOS

$g$	Aceleração da gravidade [m s <sup>-2</sup> ]
$p$	Pressão [mmCA]
$p_m$	Pressão manométrica [mmCA]
$Q_m$	Vazão mássica [kg s <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Massa específica [kg m <sup>-3</sup> ]
$t$	Tempo [s]
$u_i$	Componente da velocidade na direção $i$ [m s <sup>-1</sup> ]
$\overline{u_i}$	Média da componente da velocidade na direção $i$ [m s <sup>-1</sup> ]
$\overline{u}$	Velocidade média nas direções [m s <sup>-1</sup> ]
$\Delta t$	Variação de tempo [s]
$\epsilon$	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta [m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> ]
$k$	Energia cinética turbulenta [m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> ]
$\mu$	Viscosidade do fluido [N s m <sup>-2</sup> ]

# NOMENCLATURA

## Letras Latinas

<i>mm</i>	Unidade de comprimento [Milímetro]
<i>min</i>	Unidade de tempo [Minuto]
<i>s</i>	Unidade de tempo [Segundo]
<i>h</i>	Unidade de tempo [Hora]
<i>m</i>	Unidade de comprimento [Metros]
<i>mmCA</i>	Unidade de pressão [Milímetro de coluna de água]
<i>Pa</i>	Unidade de pressão [Pascal]
<i>m/s</i>	Unidade de velocidade [Metros por segundo]
<i>kg</i>	Unidade de massa [Quilograma]
<i>mg</i>	Unidade de massa [Miligrama]
<i>g</i>	Unidade de massa [Gramma]
°	Unidade de ângulo [Grau (s)]
<i>N</i>	Unidade de força [Newton]
<i>F</i>	N ou kgf [Força]
<i>M</i>	Massa [kg]
<i>m<sup>3</sup></i>	Unidade de volume [Metro cúbico]
<i>m<sup>2</sup></i>	Unidade de área [Metro quadrado]
<i>Nm<sup>3</sup></i>	Unidade de volume normalizado [Normal metro cúbico]
<i>m<sup>3</sup>/h</i>	Unidade de vazão [Metro cúbico por hora]
<i>Nm<sup>3</sup>/h</i>	Unidade de vazão normalizada [Normal metro cúbico por hora]
<i>Re</i>	Número de Reynolds [adimensional]
<i>We</i>	Número de Weber [adimensional]
<i>SI</i>	Sistema Internacional de Unidade [sistema de unidades de medida]
<i>NR</i>	Norma Regulamentadora [legislação brasileira]

## Letras Gregas

$\rho$	Massa específica [kg/cm <sup>3</sup> ]
$\mu$	Viscosidade do fluido [N s m <sup>-2</sup> ]

$\sigma$  Tensão [N/m<sup>2</sup>]

$\tau$  Tensão [N/m<sup>2</sup>]



## RESUMO

Os filtros de mangas são equipamentos amplamente utilizados dentro de indústrias para redução de emissão de poluentes na atmosfera. Com as normas ambientais mais restritivas e a necessidade de evitar a emissão de poluentes na atmosfera, a exigência por melhores resultados em termos de eficiência de coleta e filtração se torna cada vez maior. Um bom desempenho de um filtro de mangas está intimamente ligado a uma correta distribuição de fluxo em seu interior, quer seja na tremonha ou nas mangas. Outras variáveis também são de grande importância para um bom desempenho, como velocidade interna, velocidade de filtração (RAP), queda de pressão, eficiência de limpeza, etc. A atualização dos filtros de mangas existentes a normas atuais é um grande desafio nas indústrias, de forma geral devido, entre outros fatores, a regulamentos de emissões e restrições físicas e dimensionais comuns em equipamentos existentes. Assim, a técnica de análise por volumes finitos (CFD) se torna uma grande aliada, pois é possível realizar diversas análises a custo mais baixo e com grande acurácia nos resultados obtidos, principalmente quando comparadas às abordagens tradicionais. Neste trabalho será realizada a análise de um filtro de mangas existente, que apresenta sérios problemas de desgaste prematuro de componentes devido à não uniformidade na distribuição interna do escoamento. Esta análise contará com várias etapas, dentre elas, levantamento de documentação, levantamento de campo, medições de vazão e queda de pressão (diferencial de pressão entre o lado limpo e o lado sujo do filtro) com o auxílio de CFD, com o objetivo de levantar os campos de pressão e velocidade e identificar possíveis alterações dimensionais para a uniformização do fluxo.

*Palavras-chave: Filtro de mangas; Distribuição do escoamento; Uniformização do escoamento; Computational Fluid Dynamics (CFD); Escoamento interno.*

## ABSTRACT

The baghouse filters are equipment used broadly of the industry to reduce the emission of pollutants in the atmosphere. With the stricter environmental regulations and the need to avoid the emission of pollutants into the atmosphere, the demand for better results in terms of collection efficiency and filtration becomes more and more. A good performance of a baghouse filter is closely linked to a correct flow distribution inside it, whether in the hopper or in the middle of the bags. Other variables are also of great importance for good performance, such as internal speed, filtration rate (RAP), pressure drop, cleaning efficiency, etc. The upgrading of existing bag filters to current standards is a major challenge at the plants, generally due to, among other factors, emissions regulations and common physical and dimensional constraints on existing equipment. Thus, the Computational Fluid Dynamics analysis (CFD) becomes a great ally because it is possible to perform several analyzes at lower cost and with great accuracy in the results obtained mainly when compared with the traditional approaches. In this work the analysis of an existing bag filter will be performed, which presents serious problems of premature discharging of components due to nonuniformity in the internal distribution of the flow. This analysis will have several steps, among them, the documentation survey, field survey, flow and pressure drop measurements (pressure differential between the clean side and the dirty side of the filter) with the aid of CFD, with the objective to raise pressure and velocity fields and to identify possible dimensional changes to improve the flow uniformity.

*Keywords: Fabric Filter; Flow distribution; Flow uniformization; Computational Fluid Dynamics (CFD); Internal Flow.*

## 1 INTRODUÇÃO

As normas ambientais vigentes têm se tornado cada vez mais restritivas em virtude da crescente preocupação com as modificações climáticas, saúde dos colaboradores e vizinhos das indústrias. Assim diante desta situação, surgiu a necessidade de controlar a qualidade do ar, minimizando a quantidade de poluentes atmosféricos lançados no ar pelo setor industrial em todo o mundo.

Diante dessa preocupação, em agosto de 1981 a questão ambiental no Brasil passou a ser regido pela Lei nº 6.938/81 de 31/08/81, cujo principal objetivo foi tornar o desenvolvimento econômico e social do país compatível com a preservação do meio ambiente e do equilíbrio ecológico. Nessa lei, foram estabelecidas a estrutura e as regras gerais da política ambiental brasileira, bem como a criação do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA). Já em 2006 criou-se a Resolução CONAMA 382 e posteriormente, em 2011, a Resolução CONAMA 436/2011. Recentemente a Deliberação Normativa Copam (CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – COPAM) nº 187, de 19 de setembro de 2013, estabeleceu as condições e limites máximos de emissão (LME) de poluentes atmosféricos para fontes fixas em função do tipo de poluente e da tipologia da fonte.

Nesse contexto, os sistemas de proteção ambiental têm se tornado cada vez mais importantes dentro de instalações industriais, com a finalidade de exaurir os gases oriundos do processo produtivo, contendo material particulado, prover a separação e descartar na atmosfera os gases limpos (isentos de particulado) ou contendo material particulado dentro dos limites pré-estabelecidos.

Existem diversos tipos de sistema de proteção industrial, dentre eles: filtros de mangas, ciclones e multiciclones, lavadores de gases, precipitadores eletrostáticos, câmara inercial etc. Apresentar-se-á, a seguir, uma breve descrição de cada tipo.

O filtro de mangas é o mais utilizado dentro da indústria, pois apresenta alta eficiência de coleta (acima de 99%) para partículas inaláveis. Utiliza-se como mecanismo de captura de partículas a impactação direta. A mistura gasosa é exaurida por um sistema de exaustão, que pode ser instalado antes ou depois do filtro, passando por dentro de rede de dutos até chegar no filtro propriamente dito, obrigando a passagem dessa mistura que contém as partículas através de um material filtrante (mangas filtrantes). A mistura atravessa os seus poros e as partículas, na sua maioria, ficam retidas na sua superfície, sendo necessário retirá-las de

tempos em tempos para evitar uma camada muito espessa, que dificultaria a passagem do gás (aumento da queda de pressão).

Os Precipitadores eletrostáticos utilizam a força eletrostática para captura do material particulado. O ar com poluentes passa pela unidade ionizante (eletrodos) onde são carregados eletrostaticamente, ou seja, as moléculas que constituem a partícula têm os polos norte e sul alinhados e tornam-se magnéticas. Na unidade coletora as partículas já magnetizadas são atraídas pelas placas coletoras de polaridade oposta, onde se depositam e se aglomeram.

Os lavadores de gases utilizam a impactação inercial para separarem as partículas. O gás é forçado através de uma aspersão de gotas, que colidem com o material particulado, aglomerando as partículas e promovendo a separação dessas do fluxo gasoso. Após a aglomeração, a água contendo as partículas é retirada do sistema (gravitacional ou inercial) e enviada ao tratamento de água

Os ciclones e multiciclones operam através do princípio da força centrífuga. Através da inércia induzida pelos ângulos de entrada eles realizam a separação das partículas sólidas do fluxo gasoso. A aceleração normal age sobre as partículas fazendo com que elas se afastem do centro e colidam contra as paredes do equipamento, desacelerando e caindo pelo cone inferior.

As câmaras inerciais utilizam as forças gravitacionais para separar as partículas dos gases, levando a uma diminuição brusca da velocidade de escoamento dos gases, reduzindo os efeitos da turbulência e provocando a deposição das partículas mais pesadas do que o gás.

A necessidade de se adequar os equipamentos já existentes se torna dispendiosa por uma série de motivos, dentre os quais pode-se citar: restrição de espaço, altos custos envolvidos em retrofits, além da necessidade de parada do equipamento e/ou produção por um longo período de tempo.

Devido aos fatores citados, a otimização de projetos e recursos se faz cada vez mais necessárias, e nesse contexto as ferramentas de modelamento e simulação se tornam cada vez mais utilizadas, visto que consistem em alternativas mais baratas, mais rápidas e eficazes na solução e/ou otimização de problemas envolvendo dinâmica de gases.

Estudo recentes mostram o potencial de melhoria da performance de filtros de mangas por meio da otimização da distribuição do fluxo de gás através de modificações e testes do escoamento em diferentes projetos (NIELSEN; SKRIVER; CASTANO, 2011). Esse tipo de problema de engenharia pode ser resolvido por métodos analíticos, métodos numéricos e experimentação em laboratório (MALISKA, 2004). O emprego de métodos analíticos é, muitas vezes, inviável, pela baixa precisão e falta de informações na literatura sobre o tema, o que

torna difícil analisar casos complexos. Por outro lado, os métodos experimentais tipicamente envolvem grandes custos e, em muitos casos, são difíceis de serem executados.

Já o método numérico se mostra extremamente atrativo, principalmente levando em consideração o aumento exponencial da velocidade de processamento dos computadores, bem como a redução de seu custo nas últimas três décadas. Além disso, houve o desenvolvimento de diferentes *softwares* de simulação, o aumento de sua flexibilidade e a melhoria de rotinas fundamentais, como geração da malha, de modo que as simulações de fluidodinâmica computacional (CFD) aumentaram drasticamente desde a década de 1990. Em filtros de mangas, a análise CFD é importante para novos projetos, assim como para retrofits, para alcançar a uniformização do escoamento, o balanceamento do escoamento compartimento por compartimento, redução das perdas de pressão, aumentar a vida útil da manga, etc. Estes modelos de simulação podem se estender desde o duto de entrada até todo o filtro, considerando todos os detalhes que podem afetar o comportamento do escoamento do gás, como defletores, janelas, suportes internos dos filtros de mangas e outras possíveis restrições. (NIELSEN, 2015). Nas análises via CFD pode-se incluir dados experimentais nas simulações, ação conhecida como calibração do modelo, de modo que seus resultados se aproximem mais da condição real.

Essas análises se tornaram ferramentas valiosas e indispensáveis na concepção, testagem e comparação de diferentes soluções, apresentando grande flexibilidade e ainda a vantagem de um menor custo e tempo. Nesse contexto, simulações de fluidodinâmica computacional (CFD), através de modelos virtuais, auxiliam na avaliação de diferentes cenários de operação de um filtro de mangas, identificando campos de pressão, velocidade, zonas de recirculação, regiões sujeitas a baixas velocidades, acúmulo de material, ou regiões sujeitas a altas velocidades, desgaste excessivo da rede de dutos etc.

Neste trabalho será estudado um sistema de proteção ambiental tipo filtro de mangas instalado para exaurir e tratar os gases provenientes do sistema de armazenamento e transporte de matéria-prima (coque, minério de ferro e sinter) de um Alto Forno.

O filtro de mangas foi instalado em 2007 e desde então vem apresentado desgaste prematuro das mangas filtrantes, o que ocasiona uma série de outros problemas como necessidade constante de intervenções, alto custo com reposição de mangas filtrantes, desgaste prematuro do sistema de exaustão, dentre outros.

Com o intuito de diminuir os fatores aqui citados, será realizado um estudo de caso em um filtro existente com auxílio de simulações fluidodinâmicas (CFD), visto o grande potencial desta técnica para a solução de problemas de engenharia.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

No contexto atual de maiores cuidados com o meio ambiente, redução de agentes poluidores e controle severo em indústrias com relação à emissão de poluentes na atmosfera, os sistemas de controle ambiental têm se tornado cada vez mais indispensáveis, além da necessidade de sistemas de maior eficiência tanto de filtração quanto de disponibilidade sem, é claro, esquecer de um menor custo operacional.

Logo, torna-se necessária a aplicação de novos conceitos, novos métodos e tecnologias tanto na fabricação quanto na melhoria de equipamentos.

O objetivo deste trabalho é aplicar a técnica de análise por volumes finitos (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) para analisar e caracterizar o perfil de velocidade e pressão do escoamento dentro de um filtro de mangas instalado em 2007 e que apresenta problemas na uniformização do escoamento em seu interior.

### 2.2 Objetivos específicos

- Identificar os campos de pressão e velocidade na entrada da tremonha e na região imediatamente antes das mangas filtrantes;
- Verificar a causa da distribuição de gás não uniforme dentro da câmara filtrante;
- Propor uma solução para uniformizar o escoamento e reduzir os inconvenientes que esse efeito traz ao filtro de mangas.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Poluição do ar – alguns conceitos

##### 3.1.1 Poluentes atmosféricos

A resolução CONAMA 003/1990 (BRASIL, 1990, p. 1) define poluente atmosférico como:

Qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar: impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; inconveniente ao bem-estar público ou danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Ou seja, poluente atmosférico é toda e qualquer forma de matéria sólida, líquida ou gasosa e de energia que, presente na atmosfera, pode torná-la poluída. Os poluentes atmosféricos em forma de matéria podem ser classificados inicialmente em função do estado físico, em dois grupos: material particulado; gases e vapores.

De acordo com a sua origem, os poluentes em forma de matéria podem ser classificados em poluentes primários, emitidos já na forma de poluentes: Partículas em suspensão; Dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>); Sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S); Óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>); Amônia (NH<sub>3</sub>); Monóxido de carbono (CO); Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); Metano (CH<sub>4</sub>).

Podem também ser classificados em poluentes secundários, que são formados na atmosfera por reações químicas ou mesmo fotoquímicas como é o caso da formação de ozônio no smog fotoquímico: Peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>); Ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>); Ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>); Trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>); Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>); Sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>); Ozônio (O<sub>3</sub>); Nitrato de peroxiacetila - PAN - (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>5</sub>N).

Esses poluentes podem também ser classificados, segundo a classe química, em orgânicos e inorgânicos.

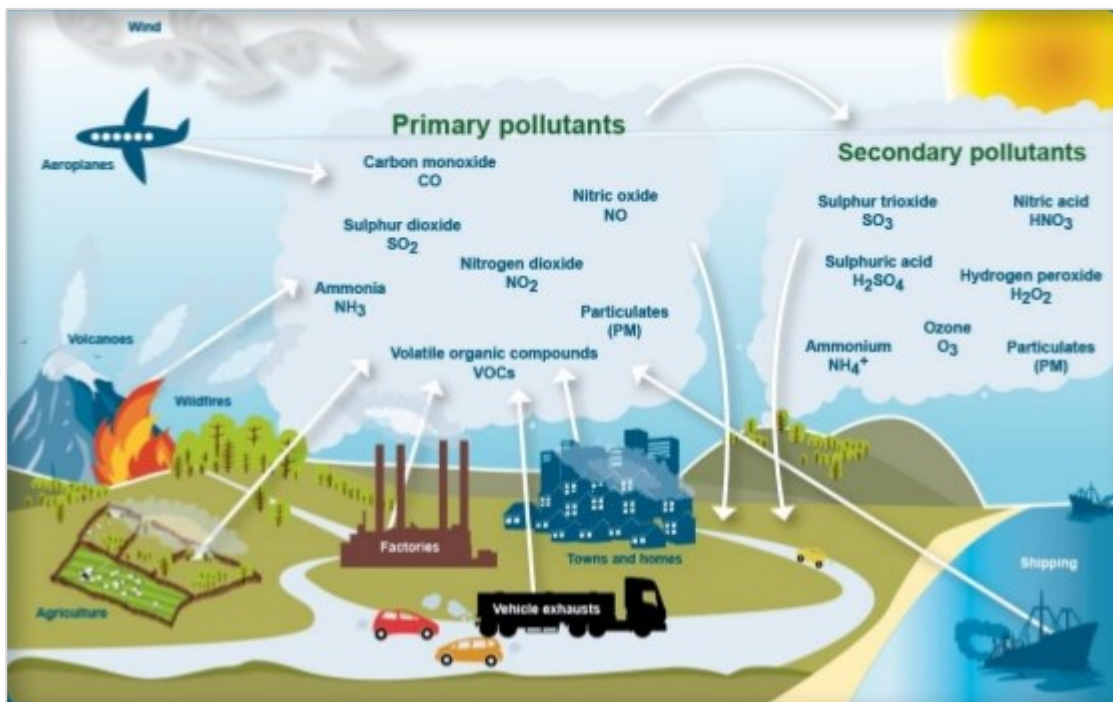


FIGURA 3.1 – Emissão de poluentes  
 FONTE: DEWAN et al. (2016).

Neste trabalho será detalhado somente o material particulado, por fazer parte do processo em que o equipamento estudado está inserido.

### 3.1.2 Material Particulado (MP)

As partículas sólidas ou líquidas emitidas por fontes de poluição do ar ou mesmo aquelas formadas na atmosfera, como as partículas de sulfatos, são denominadas de material particulado e, quando suspensas no ar, são denominadas de aerossóis.

O material particulado pode ser classificado segundo o seu tamanho, que é determinado pelo processo de formação da partícula e está diretamente associado a seus efeitos à saúde. Partículas menores que  $10\ \mu$  são denominadas inaláveis, enquanto aquelas com diâmetro aerodinâmico inferior a  $2,5\ \mu\text{m}$  são comumente chamadas de partículas respiráveis. Ambas são de grande interesse por seus efeitos à saúde humana (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – US-EPA, 2013). Segundo o método de formação, elas podem ser classificadas em **poeira** (poeira de cimento, poeira de amianto, poeira de algodão, poeira de rua), **fumo** (fumos de chumbo, fumos de alumínio, fumos de zinco, fumos de cloreto de amônia), **fumaça** (partículas da combustão de combustíveis fósseis, materiais asfálticos ou



madeira, que contêm fuligem, partículas líquidas e, no caso de madeira e carvão, uma fração mineral – cinzas) e **névoa** (partículas líquidas).

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2006), há evidência da associação do material particulado presente no ar com os efeitos no sistema respiratório e cardiovascular na população exposta. Isto se dá porque partículas inaláveis são capazes de penetrar no sistema respiratório, enquanto as mais finas, respiráveis, podem também afetar o coração e o pulmão, causando sérios impactos à saúde (US-EPA, 2013).

### 3.1.3 Padrões de qualidade do ar

A poluição do ar ocorre quando a alteração da composição da atmosfera resulta em danos reais ou potenciais. Dentro desse conceito, pressupõe-se a existência de níveis de referência para diferenciar a atmosfera poluída da atmosfera não poluída. O nível de referência sob o aspecto legal é denominado de Padrão de Qualidade do Ar.

Limites ou padrões de emissão se referem à quantidade máxima de poluentes que podem ser emitidos por uma determinada fonte. Em geral, os padrões de emissão são estabelecidos com o intuito de reduzir os níveis de poluição do ar a padrões ambientais (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004).

No Brasil, foi proposta a resolução CONAMA nº 3 de 28/06/1990 estabelecendo os padrões de qualidade do ar vigentes em todo o território nacional. Os poluentes considerados nessa resolução foram: partículas totais em suspensão (PTS); dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>); monóxido de carbono (CO); ozônio (O<sub>3</sub>); fumaça; partículas inaláveis; dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>). Foram estabelecidos Padrões Primários, destinados à proteção da saúde pública, e Padrões Secundários, para a proteção do meio ambiente em geral e do bem-estar da população.

A mais recente, é a Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) nº 187, de 19 de setembro de 2013.

### 3.1.4 Padrão de emissão de material particulado em fontes fixas

Padrão de Emissão é um limite estabelecido legalmente e que deve ser respeitado para a emissão na fonte. Pode estar expresso em concentração (ex.: mg/Nm<sup>3</sup> base seca a 12% de oxigênio), em taxa de emissão (ex.: kg/hora) ou em função de um parâmetro da fonte (ex.: kg/tonelada incinerada).

Os padrões de emissão, em geral, são fixados em nível estadual. Dentre os anexos da COPAM nº 187 que se referem a diversas atividades industriais, o ANEXO XIII estabelece limites de emissão para poluentes atmosféricos gerados nas indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas e usinas de pelotização de minério de ferro (BRASIL, 2007). A resolução dispõe limites referentes a todas as etapas do processo, ou seja, dos pátios de minérios às laminações.

Assim, não é esperado que as emissões de poluentes sejam nulas, mas que alcancem um nível aceitável representado pelo padrão legal. Segundo Vallero (2008), com a aplicação de uma tecnologia de controle da poluição atmosférica, assume-se que uma fonte pode ser reduzida a um nível tal que esteja abaixo desse limite.

### **3.2 Métodos de controle da poluição do ar**

Historicamente tem-se utilizado o termo “controle de poluição” para todas as ações que eliminam ou reduzem a geração de poluentes e para aquelas de tratamento das emissões. Dentro desse enfoque, as medidas de controle da poluição do ar envolvem desde o planejamento do assentamento de núcleos urbanos e industriais e do sistema viário até a ação direta sobre a fonte de emissão.

As medidas usualmente utilizadas para o controle do tipo de poluição estão listadas a seguir.

### **3.3 Medidas para impedir a geração de poluentes**

Em muitos casos, os poluentes podem ser eliminados totalmente através da substituição de combustíveis, matérias-primas e reagentes que entram no processo, mudança de equipamentos e de processos. A substituição de combustíveis com enxofre elimina a formação e a emissão dos SO<sub>x</sub> à atmosfera. O gás natural é praticamente isento de enxofre e pode substituir os óleos combustíveis, que contêm teores altos de enxofre.

### **3.4 Medidas para reduzir a geração de poluentes**

A diminuição da quantidade de poluentes gerada pode ser conseguida pelas seguintes medidas:

- uso de equipamentos dentro da sua capacidade nominal;

- boa operação e manutenção adequada de equipamentos produtivos;
- armazenamento adequado de materiais pulverulentos e/ou fragmentados, evitando a ação dos ventos sobre eles;
- adequada limpeza do ambiente, em especial daqueles onde há possibilidade de ação de microrganismos e conseqüente geração de odor, como é o caso de diversos tipos resíduos urbanos;
- utilização de processos, equipamentos e operações de menor potencial poluidor.
- utilização de combustíveis de menor potencial poluidor.
- ruas pavimentadas e limpas reduzem a emissão de poeira para a atmosfera, o que pode ser reduzido ainda mais pela umectação; evitar deixar áreas com solo sem vegetação, mantendo-as pelo menos gramadas, o que contribui inclusive para reduzir a erosão e o assoreamento;
- plantio de árvores no entorno das fontes;
- enclausuramento das fontes.

### **3.5 Tratamento das emissões**

Depois de esgotados todos os esforços com as medidas anteriormente mencionadas, sem que tenha sido conseguida a redução necessária na geração de poluentes, deve-se então utilizar os equipamentos para tratamento das emissões (equipamentos de controle de poluentes – “filtros”).

Pode se chegar à conclusão de que a escolha recaia na implantação de um equipamento para tratamento de emissões porque são mais econômicos, mais disponíveis ou mais viáveis para casos específicos.

Sempre em conjunto com o equipamento de controle de poluição industrial existe um sistema de exaustão (captadores, dutos, ventilador e chaminé), cuja função é captar, concentrar e conduzir os poluentes para serem “filtrados”, com posterior lançamento do gás como residual de material particulado no ar dentro dos limites pré-estabelecidos para cada processo

Os equipamentos de controle de poluição do ar são divididos em função do estado físico de poluente a ser considerado, ou seja, Equipamentos de Controle de Material Particulado e Equipamentos de Controle de Gases e Vapores.

Encontra-se disposta a seguir a classificação de acordo com o princípio físico ou mecânico segundo o qual a retenção de partícula é realizada. Assim, a separação dos poluentes da corrente de ar pode ser obtida por:

- ação da filtração através de meio poroso: filtros de mangas;
- ação de forças de inércia: coletores inerciais;
- ação das forças centrífugas: ciclones;
- ação de umedecimento e lavagem: lavadores de gases;
- ação de ionização e atração eletrostática: precipitadores eletrostáticos;

Outra forma frequentemente encontrada para classificar os equipamentos de controle de poluição consiste na classificação em sistemas secos ou molhados, conforme descrito a seguir:

- sistemas secos (coletores mecânicos inerciais e gravitacionais; coletores centrífugos, como os ciclones; precipitadores eletrostáticos secos e filtros de tecido, como, por exemplo, os filtros tipo mangas);
- sistemas úmidos (lavadores dos mais variados tipos e precipitadores eletrostáticos úmidos).

Os gases e vapores podem ser removidos do fluxo poluído através de absorvedores (lavadores de gases), de adsorvedores (carvão ativado), ou por incineração térmica ou catalítica, como os combustores catalíticos dos automóveis, por condensadores, biofiltros e por processos especiais.

Para cada fonte de poluição deve ser estudada a melhor solução, tanto do ponto de vista de custo quanto do ponto de vista ambiental. A tecnologia de controle de poluição do ar disponível permite que a poluição seja reduzida muitas vezes em mais de 99%.

Por fim, um dos métodos mais antigos, simples e eficientes de remoção de partículas sólidas de um fluxo de gás consiste na filtração com tecido (ROCHA, 2010). Essa técnica é utilizada, entre outras aplicações, no Filtro de Mangas, que é o objeto do presente estudo.

### 3.6 Filtro de mangas

Os Filtros de Mangas são equipamentos amplamente utilizados para o controle da emissão de material particulado em indústrias e apresentam a elevada eficiência, geralmente acima de 99%, para fumos e poeiras acima de 0,1 microm.

Trata-se de um equipamento de instalação e operação bastante complexas. Na sequência serão listados alguns itens que mostram a complexidade desses equipamentos:

- tratam gases abrasivos, em altas temperaturas e grandes velocidades;
- são intimamente relacionados com o processo a que estão ligados;
- eventuais falhas operacionais podem trazer significativas perdas materiais e situações críticas em termos de segurança;
- são projetados adaptando-se às condições de processo existente e, muitas vezes, preparados para o futuro;
- adaptam-se ao layout e aos espaços disponíveis;
- consomem uma quantidade significativa de água e/ou energia;
- são de difícil manutenção, pois nem sempre o processo produtivo pode ficar parado por tempo suficiente.

As mangas filtrantes têm a forma de um saco alongado, tubular e podem ser classificadas de acordo com o sistema de limpeza dessas mangas.

**Jato pulsante:** é empregado uma armação interna (gaiola) para sustentação da manga e para manter a forma cilíndrica. O ar penetra de fora para dentro e sai pela parte central, a boca da manga. Durante a filtração há o acúmulo de material na parte externa (torta), e para a remoção desse material é utilizado um jato de ar comprimido em contrafluxo.

**Fluxo reverso:** não há gaiola para sustentação das mangas, a manga é montada com a boca virada para baixo, o fluxo é da parte interna para a externa, ou seja, a torta de material particulado é formada na parte interna da manga. A pressão de limpeza é a atmosférica, realizada pela reversão do fluxo ou por um sistema de exaustão dedicado.

**Agitação ou vibração mecânica:** existe um sistema mecânico que realiza o sacudimento do quadro ou suporte onde as mangas são montadas. Esse sistema não é usado atualmente por apresentar baixa eficiência de limpeza.

Os filtros de mangas geralmente são dispostos em baterias ou conjuntos de compartimentos, de modo a conseguirem a área de filtração necessária.

No decorrer deste trabalho iremos detalhar o princípio de funcionamento do filtro de mangas tipo jato pulsante e suas partes, que é o tipo do filtro de mangas em estudo.

Atualmente no mercado não existe um padrão para fabricação do filtro, pois o projeto depende de uma série de fatores oriundas do processo gerador da emissão. Entretanto, a estrutura básica de um filtro pode ser dividida em três partes: Pleno superior, Corpo e Moega.

Apesar de não haver um padrão para dimensionamento, o projeto de um filtro sempre leva em consideração os mesmos parâmetros: taxa de fluxo a ser filtrada, a velocidade de filtração ou relação ar-pano (RAP) recomendada, velocidade de ascensão, tipo de tecido, fibras utilizadas para o tecido, mecanismo de limpeza, número total de compartimento, área filtrante total, concentração de material particulado presente no gás a ser filtrado, limite máximo de emissão determinado pela legislação vigente.

### **3.7 Princípio de funcionamento**

A passagem da mistura gasosa que contém as partículas através de um material filtrante poroso faz com que o gás atravesse os seus poros, e as partículas, na sua maioria, ficam retidas na sua superfície, que, de tempos em tempos, precisam ser retiradas para evitar uma camada muito espessa (torta) que dificulta a passagem do gás (aumento da perda da carga). No começo do processo de filtração, a coleta se inicia com a colisão das partículas contra as fibras do meio filtrante às quais se aderem. À medida que o processo continua, a camada de partículas coletadas (torta) aumenta, tornando-se então o meio de coleta e contribuindo para a eficiência do processo.

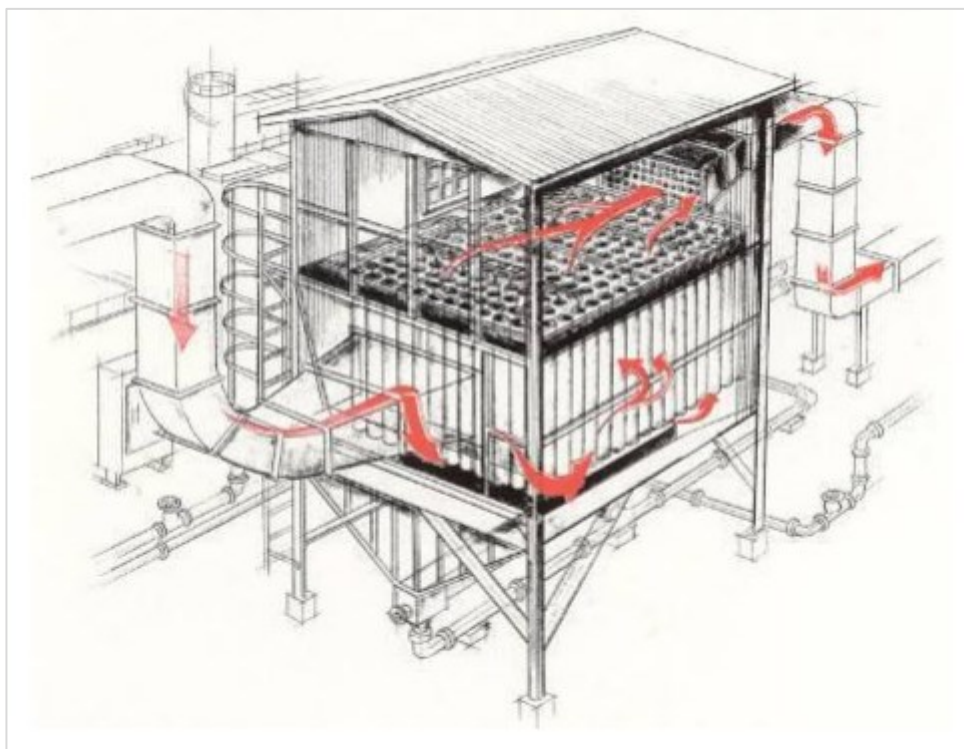


FIGURA 3.2 – Filtro jato pulsante - princípio de funcionamento  
FONTE: VENTEC AMBIENTAL (2010).

### 3.8 Descrição do processo de filtração

Uma compreensão dos princípios básicos de filtração de pó de uma corrente gasosa é útil para a operação e manutenção de um filtro de mangas do tipo jato pulsante. A função desse filtro de mangas é capturar o material particulado (pó) presente no fluxo de gás, e enquanto o filtro desempenha esta função, a resistência ao fluxo de gás deve ser controlada. Portanto, periodicamente é necessário reduzir a camada de pó que se forma sobre as mangas (torta), de forma que a resistência ao fluxo de gás (queda de pressão) não se torne excessiva.

O pó é captado nos diversos pontos pelas respectivas coifas. O fluxo de gás, com o pó coletado, é conduzido por uma rede de dutos até o filtro de mangas. O gás entra no filtro de mangas e é separado para tratamento nas câmaras. A distribuição do material particulado em cada uma dessas câmaras é auto regulável.

O fluxo de gás entra na câmara pouco acima da área da tremonha. Este é considerado o lado sujo da câmara. A câmara é separada em duas áreas por um espelho, o lado sujo e o lado limpo. O espelho suporta as mangas que são utilizadas para filtrar o particulado. Cada câmara contém um determinado número de mangas, arranjadas em fileiras. Enquanto o fluxo gasoso passa através das mangas para o lado limpo do espelho, uma camada de pó se forma no lado externo das mangas.

É necessário que se forme uma camada de pó sobre a superfície da manga. Essa camada de pó é mais densa que o feltro das mangas. Na realidade, as menores partículas de pó são retidas por esta camada de pó mais densa, pois caso ela não exista as partículas menores irão passar diretamente pelo tecido.

As mangas não são o meio primário de filtração, pois é a camada de pó que exerce essa função. Muitas vezes, durante a partida inicial, forma-se uma pluma na chaminé, decorrente do escape das partículas menores. Logo se forma uma camada de pó sobre a manga, e a pluma desaparece.

À medida que as partículas são coletadas, a queda de pressão (queda de pressão) através do meio filtrante aumenta até o momento que atinge um valor pré-estabelecido ou um tempo de filtração fixado, em que é necessário, do ponto de vista econômico e operacional, realizar a limpeza das mangas (VALLERO, 2008; THEODORE, 2008; RODRIGUES, 2006).

As mangas precisam ser periodicamente limpas para evitar uma queda de pressão (queda de pressão) excessiva no filtro de mangas. Quando as mangas são limpas, uma camada de pó residual permanece para atuar como filtro das partículas menores.

O fluxo de gás tem a tendência de ir para o caminho que oferece menos resistência, por isso, assim que uma câmara tiver uma queda de pressão maior, o fluxo e conseqüentemente mais pó serão conduzidos a outras câmaras, até que a condição seja corrigida. Durante a operação, a queda de pressão através de cada câmara permanece semelhante entre si.

Cooper e Alley (2011) indicam ainda algumas possíveis causas de variação da queda de pressão (queda de pressão) no filtro além da faixa prevista em projeto, e ressaltam a importância do monitoramento dessa variável durante a operação do equipamento. Algumas das possíveis razões para uma queda de pressão excessiva no filtro de mangas são:

- aumento na vazão do gás;
- incorporação de partículas nas mangas (*bag bliding*);
- tremonha cheia de material particulado, bloqueando as mangas;
- sistema de limpeza inoperante.

No caso de queda de pressão (queda de pressão) abaixo do previsto:

- problemas no ventilador ou no motor;
- mangas quebradas ou fixadas incorretamente;
- dutos de entrada obstruídos ou damper fechado;
- vazamento entre as seções do filtro de mangas.



### 3.9 Descrição dos componentes do filtro de mangas

Apresentam-se, na sequência, os principais componentes do filtro.

#### 3.9.1 Câmaras de ar sujo

O filtro pode ser composto de uma ou mais câmaras ou compartimentos. Essas câmaras permitem a necessária seccionalização para manutenção. Cada câmara contém um determinado número de mangas, de acordo com a área filtrante total necessária.

Os filtros não compartimentados geralmente são menores e ligados a operações que não são realizadas de forma contínua. Os filtros compartimentados são maiores e mais caros, e podem ser projetados para terem um compartimento em limpeza, sem prejuízo para o processo de filtração, ou seja, um sistema de limpeza off-line.

A câmara de ar sujo possui uma ou mais tremonhas, válvulas para dosar o material coletado, janelas de visita, válvulas para bloqueio da câmara, chapa espelho, plenum de saída (plenum de ar limpo), tampas para fechamento do plenum de ar limpo e sistema de distribuição de ar comprimido (sistema de limpeza).

#### 3.9.2 Tremonhas

A tremonha tem duas funções principais:

- Servir de entrada da corrente gasosa com pó na câmara;
- Coletar o pó que será removido pelo sistema de transporte de pó.

A turbulência dos gases na entrada da tremonha é minimizada com a instalação de aletas direcionadoras e defletores, que promovem uma distribuição homogênea dos gases na parte inferior das mangas. Para inspeção do interior de cada tremonha e da parte inferior das mangas, existe uma porta de inspeção. A tremonha é conectada ao sistema de remoção de pó através de um flange.

**Nota:** a tremonha não deve ser utilizada para estocagem do pó coletado. O pó estocado pode ser carregado de volta para as mangas, provocando uma queda de pressão excessiva e desgaste prematuro das mangas. O sistema de remoção de pó deve ser continuamente operado para evitar acúmulo de pó na tremonha.

Recomenda-se que o alarme de nível alto de pó seja verificado imediatamente e que, como precaução, a câmara seja retirada de operação, evitando algum dano a ela e à tremonha. Uma vez que a camada de pó é removida das mangas, ela cai nas tremonhas e é conduzida através de um sistema de transporte que pode ser do tipo pneumático ou mecânico como por corrente tipo redler até o silo de estocagem ou caçamba para descarte.

### 3.9.3 Carcaça e plenum de saída

Cada câmara possui uma carcaça, que abriga as mangas filtrantes, e um plenum de ar limpo estanque, acima das mangas, denominado de plenum de saída. A carcaça e o plenum de saída são separados pela chapa espelho, onde estão instaladas as mangas. O gás limpo sai de cada plenum pelo damper de saída para o manifold de saída.

### 3.9.4 Chapa espelho

A chapa espelho tem algumas funções como:

- Suporta as mangas filtrantes;
- Separar o lado sujo do lado limpo do filtro de mangas;
- Ela também serve de plataforma para inspeção das mangas.
- Serve de selo entre as câmaras de ar limpo e ar sujo.

Em cada espelho o conjunto de mangas é distribuído em fileiras. O conjunto de mangas e gaiolas são inseridos através dos furos do espelho e mantidos em posição pelo aço mola das mangas, pelas gaiolas e Venturis, conforme mostrado na FIG. 3.3.

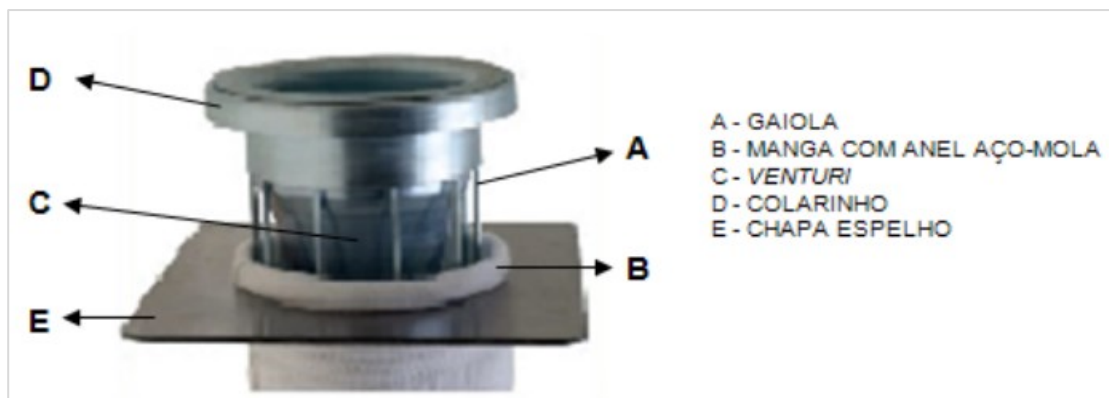


FIGURA 3.3 – Conjunto de montagem da manga na chapa espelho  
 FONTE: PDL SISTEMAS (s.d.).

Os venturis, que são instalados no topo de cada manga.

Sua função é acelerar o ar comprimido para o interior da manga aumentando a eficiência de limpeza. O resultado é uma maior vida útil ao elemento filtrante, reduzindo gastos com mangas e tempo de parada de máquina.

Também mantêm o pulso ordenado, direcionado para as mangas além de proteger o tecido na parte superior da manga do jato de ar.

Podem ser fabricados em diversos tamanhos e materiais como Aço Inox, Alumínio, Aço Carbono (acabamento galvanizado, bicromatizado ou com pintura epóxi a pó).

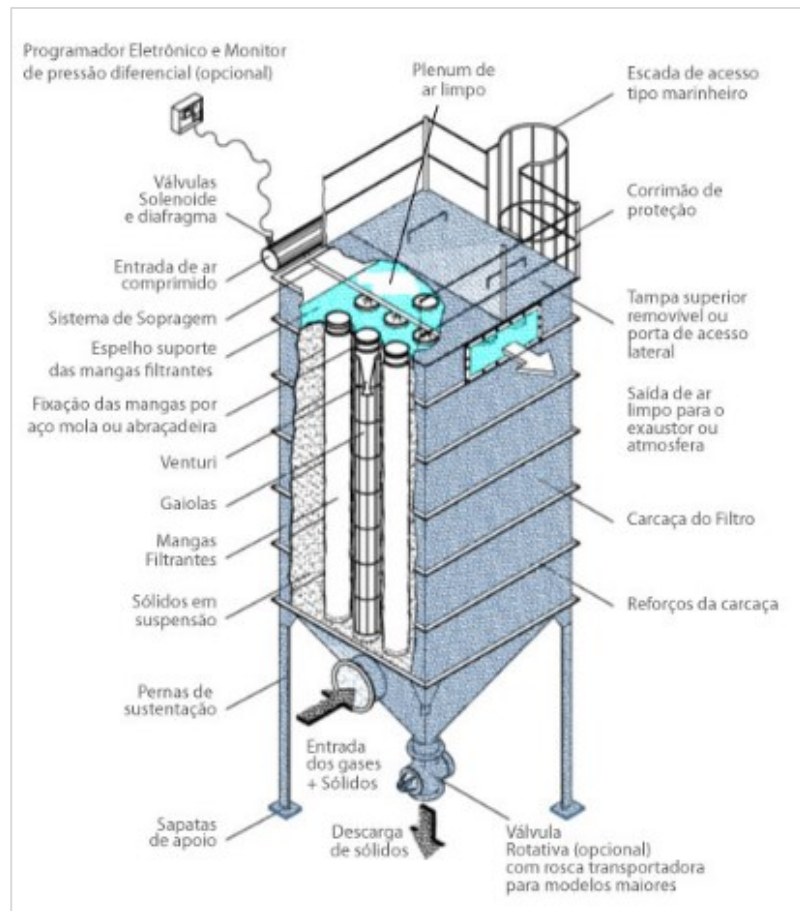


FIGURA 3.4 – Partes de um filtro de mangas  
 FONTE: HIDRONICS PROJETOS E EQUIPAMENTOS LTDA (s.d.).

### 3.9.5 Sistema de distribuição de ar de limpeza

Fazem parte deste sistema os reservatórios de ar, as válvulas de diafragma atuadas por solenoides, os tubos de sopragem e o painel temporizador.

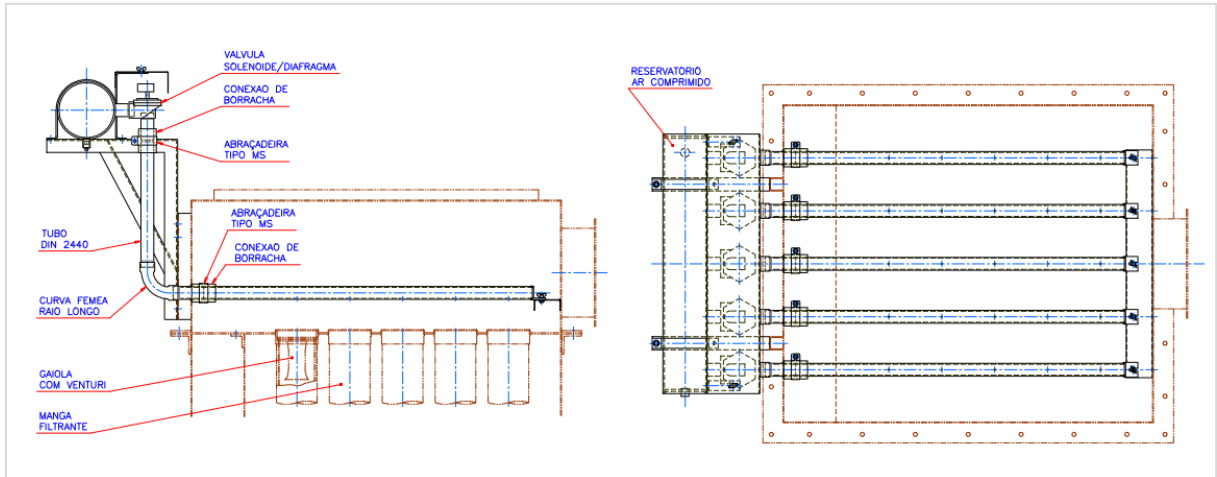


FIGURA 3.5 – Sistema de distribuição de ar  
 FONTE: VENTEC AMBIENTAL (2010).

### 3.9.6 Sistema de limpeza das mangas

Existem três tipos principais de sistemas de limpeza das mangas: limpeza por sacudimento (em desuso), limpeza por ar reverso e limpeza por jato pulsante.

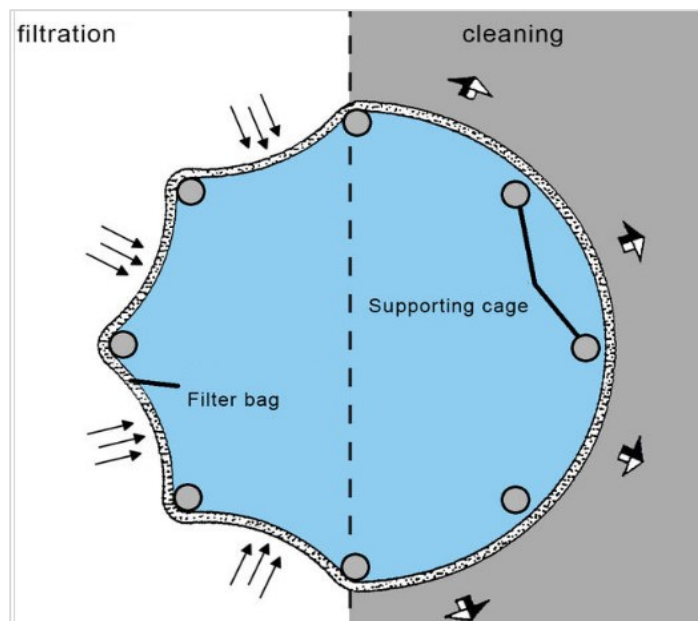


FIGURA 3.6 – Sistema de limpeza das mangas  
 FONTE: SCHROOTEN et al. (s.d.)

#### 3.9.6.1 Limpeza por sacudimento das mangas

Neste método, o pó é removido por agitação mecânica, horizontal ou vertical. O sacudimento mecânico não tem muito êxito quando o material particulado consiste em

partículas aderentes, pois exige agitação excessiva que pode fazer com que girem e se soltem dos ganchos de sustentação. O ar sujo entra pela parte interna da manga, deixando o particulado conforme mostrado na FIG. 3.7.

Este tipo de sistema está em desuso devido aos problemas citados no parágrafo anterior.

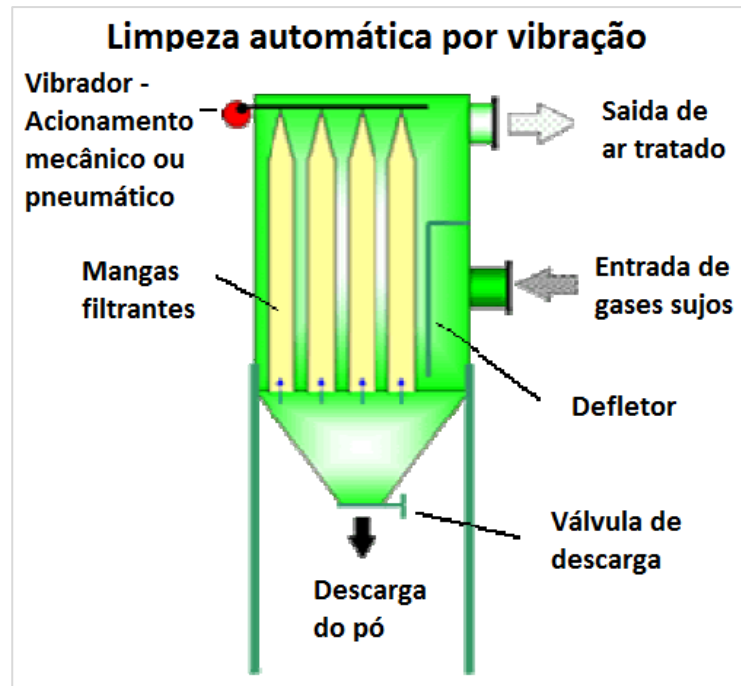


FIGURA 3.7 – Filtro de Mangas Tipo Limpeza por Vibração Mecânica  
 FONTE: APOIO PROJETOS ENG<sup>a</sup> (s.d.).

### 3.9.6.2 Limpeza por jato pulsante

A limpeza das mangas é feita através de sopros de ar comprimido pelas válvulas, tubos de sopragem, venturis e mangas em intervalos controlados por um timer no painel elétrico ou pelo diferencial de pressão entre o lado sujo e limpo de cada câmara conforme mostrado na FIG. 3.8.

A limpeza do filtro tem por objetivo restabelecer as condições normais de operação, o que não significa remover totalmente os pós filtrados, e sim uma quantidade que já permita que se mantenha a vazão projetada e, ao mesmo tempo, a emissão legalmente permitida.

O pó agregado na superfície da manga participa da filtração e deve ser mantido permanentemente, mesmo após a limpeza. O ciclo de limpeza pode variar em função da perda de pressão ou do tempo de operação ou de ambos.

Idealmente, a limpeza deveria ocorrer em cada compartimento, dependendo de sua perda de pressão individual. Outra forma seria medir a emissão do compartimento e programar a limpeza quando a emissão estiver muito abaixo de determinado padrão.

Cada tubo de sopro (flauta) é posicionado sobre cada fileira de mangas e conectado ao reservatório através da válvula de diafragma. A quantidade de ar comprimido transferida para as mangas é determinada em função da pressão do ar no reservatório e o período de tempo que as válvulas de diafragma permanecem abertas. Um regulador de pressão de ar é utilizado para indicar e controlar a pressão do ar de limpeza.

A pressão do ar suprido aos reservatórios deve estar regulada para 4,0 - 7,0 kgf/cm<sup>2</sup>. A operação das válvulas de diafragma é controlada pelo painel temporizador. A duração do pulso de ar é bastante curta.

A pressão do ar comprimido que é injetado nas mangas para limpeza irá depender do projeto de cada fabricante, do tamanho das válvulas de diafragma, do número de mangas que serão limpas por pulso, da instalação do venturi, do comprimento da manga, do tipo de material particulado, entre outros.

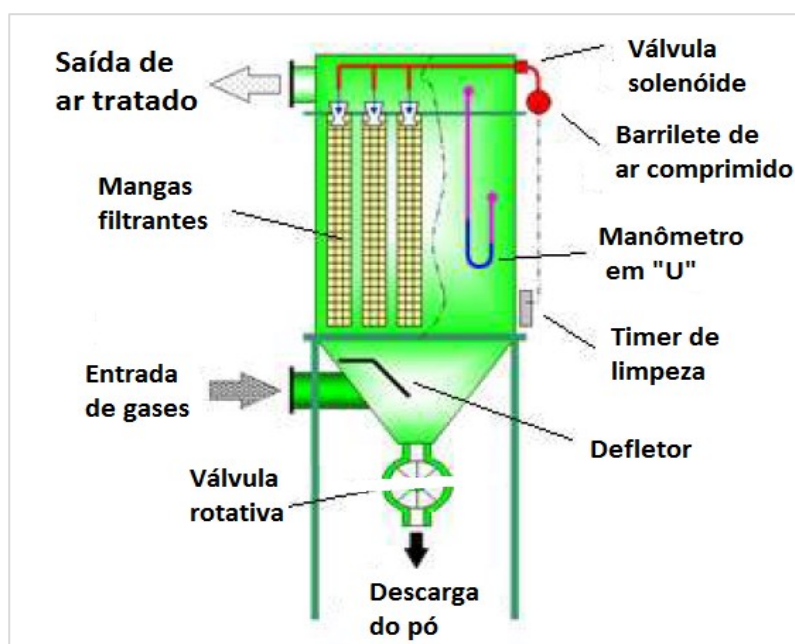


FIGURA 3.8 – Filtro de Mangas Tipo Limpeza por Jato Pulsante  
 FONTE: APOIO PROJETOS ENG<sup>a</sup> (s.d.).

Na FIG. 3.9 mostra-se a manga em duas fases distintas, primeiro na fase de filtração e na sequência a manga na fase de limpeza.

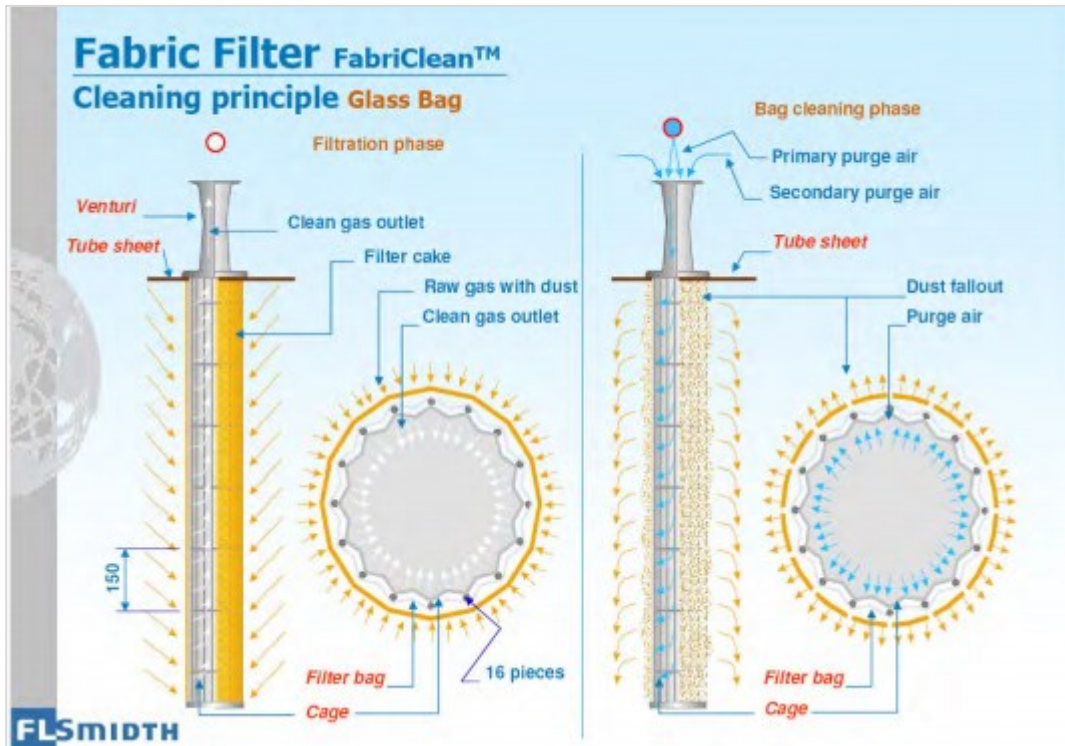


FIGURA 3.9 – Esquema de limpeza  
 FONTE: SOUTHERN ENVIRONMENTAL; FL SMIDTH (s.d.).

### 3.9.6.3 Limpeza por ar reverso

A limpeza tipo ar reverso envolve soprar suavemente (à pressão atmosférica) o gás limpo através da manga filtrante para remoção da “torta” de pó. Um esquema desse tipo de arranjo é mostrado na FIG. 3.10. O sistema requer que o filtro seja dividido em vários módulos paralelos que podem ser isolados, o que normalmente é realizado usando válvulas “poppet” ou discos grandes.

As mangas são montadas invertidas, e como a pressão de limpeza e de operação é mais baixa que a do jato pulsante não há a necessidade de utilização de gaiolas. Porém, deve-se atentar para o correto tensionamento da manga durante a montagem.

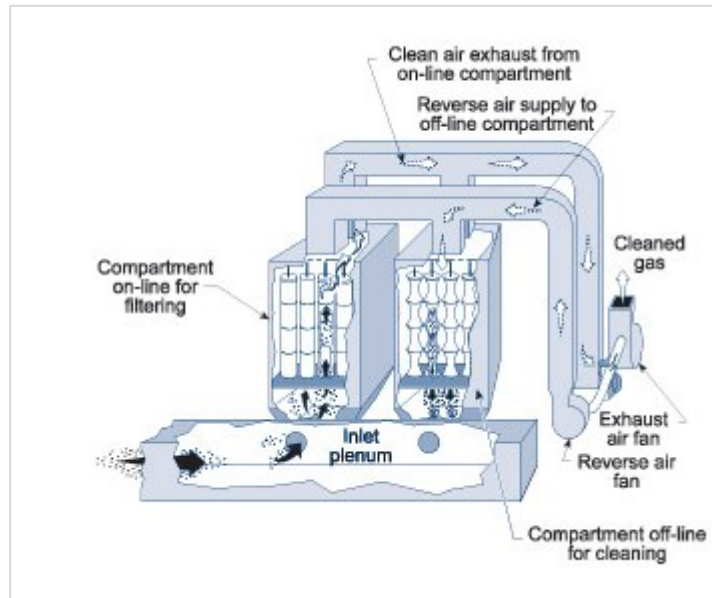


FIGURA 3.10 – Limpeza tipo ar reverso  
 FONTE: WHITEHEAD CONSTRUCTION, Inc. (s.d.).

### 3.9.7 Mangas filtrantes e gaiolas de sustentação

A escolha do meio filtrante, FIG. 3.11, a ser utilizado depende das características do gás (temperatura, umidade, alcalinidade, acidez, etc.), das características das partículas a serem filtradas (concentração distribuição de tamanhos, abrasividade etc.), do tipo de limpeza a ser utilizado, do custo e da disponibilidade do mercado.



FIGURA 3.11 – Mangas Filtrantes  
 FONTE: SOLAFT (s.d.).

O suporte para cada manga é suprido pelas gaiolas, FIG. 3.12, que são inseridas dentro de cada manga. Os arames verticais das gaiolas são separados de forma adequada, para garantirem um bom suporte das mangas e boa rigidez.



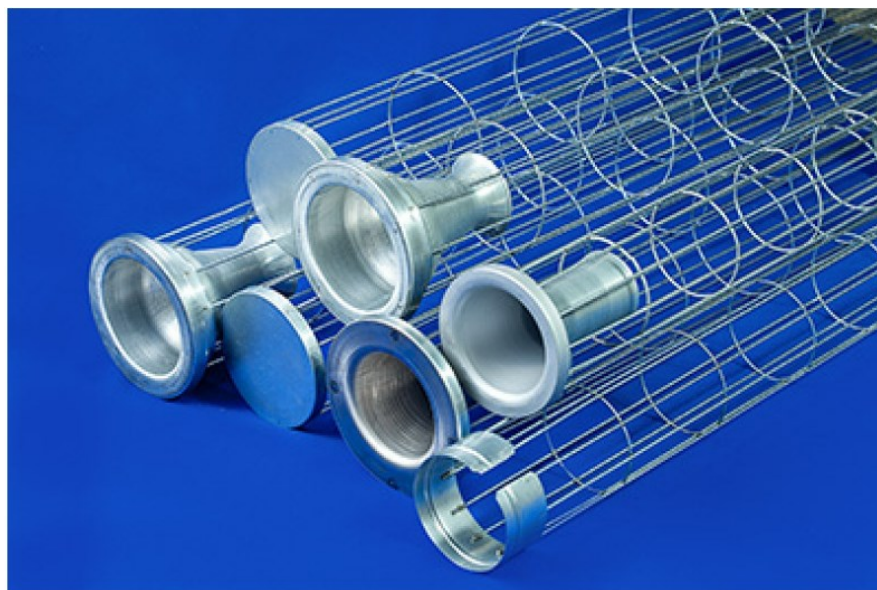


FIGURA 3.12 – Gaiolas de sustentação das mangas  
 FONTE: SOLAFT (s.d.).

Em certos casos, o meio filtrante recebe tratamento especial como a aplicação de silicone, grafite e membrana de teflon, por exemplo.

O QUADRO (3.1) apresenta as características dos meios filtrantes mais usuais.

QUADRO 3.1  
 Comparação entre os principais tecidos filtrantes

VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO	PROPRIEDADES DE FIBRAS TÊXTEIS PARA FILTRAÇÃO **							
	POLIPROPILENO	POLIÉSTER	ACRÍLICO	ARAMIDA	POLIFENILSULFETO PPS	POLLAMIDA P-84	PTFE	VIDRO
TEMPERATURA MÁXIMA CONTÍNUA *	90 °C	140 °C	120 °C	200 °C	180 °C	240 °C	250 °C	260 °C
TEMPERATURA MÁXIMA PICO	100 °C	150 °C	125 °C	204 °C	190 °C	240 °C	280 °C	288 °C
ABRASÃO	Excelente	Excelente	Boa	Boa	Muito Boa	Boa	Média	Ruim
PROPRIEDADES DE FILTRAGEM	Boa	Muito Boa	Boa	Muito Boa	Boa	Excelente	Ruim	Ruim
HIDRÓLISE DE CALOR ÚMIDO	Excelente	Ruim	Excelente	Ruim	Excelente	Média	Excelente	Excelente
ALCALINOS ***	Excelente	Ruim	Média	Boa	Excelente	Média	Excelente	Ruim
ÁCIDOS MINERAIS	Excelente	Ruim	Muito Boa	Ruim	Excelente	Média	Excelente	Muito Boa
ÁCIDOS ORGÂNICOS	Excelente	Ruim	Muito Boa	Ruim	Excelente	Média	Excelente	Muito Boa
AGENTES OXIDANTES	Excelente	Excelente	Excelente	Média	Ruim	Muito Boa	Excelente	Excelente
SOLVENTES ORGÂNICOS	Excelente	Boa	Muito Boa	Muito Boa	Excelente	Excelente	Excelente	Muito Boa

OBS \* A temperatura máxima admissível pode ser menor dependendo das condições de operação (condições químicas da corrente gasosa).

\*\* Especialmente se a temperatura passa com frequência pelo ponto de orvalho e em presença de aerossóis.

FONTE: OBER (s.d.).

QUADRO 3.2  
Características dos principais meios filtrantes

Material da Manga	Resistência à					Temper. Máxima de Operação °C	
	Tração	Abrasão	Ácidos	Alcalis	Combustão	Contínuo	Picos
Algodão	Bom	Bom	Pobre	Bom	Sim	80	90
Polipropileno	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Sim	90	90
Nylon	Excelente	Excelente	Pobre	Excelente	Sim	90	120
Homopolímero Acrílico	Bom	Bom	Muito Bom	Fraco	Sim	130	140
Copolímero Acrílico	Médio	Fraco	Bom	Fraco	Sim	110	120
Poliéster	Excelente	Excelente	Fraco	Fraco	Sim	135	150
Nomex	Muito Bom	Excelente	Fraco	Bom	Não	190	220
Teflon	Médio	Fraco	Excelente	Excelente	Não	230	260
Fibra de Vidro	Excelente	Fraco	Bom	Fraco	Não	260	290
Ryton	Muito Bom	Excelente	Excelente	Muito Bom	Não	190	220
P-84	Muito Bom	Excelente	Muito Bom	Fraco	Não	260	290

FONTE: OBER (s.d.).

### 3.9.8 Manifolds de entrada e saída

Os manifolds de entrada e saída distribuem o fluxo de gás para dentro e para fora de cada câmara.

Tem como principal objetivo balancear o fluxo e a distribuição de pó entre câmaras e entre as mangas filtrantes de uma câmara; minimizar o potencial de deposição de pó na entrada e a queda de pressão do sistema.

### 3.9.9 Damper

No plenum de entrada e no de saída de cada câmara podem ser instalados os dampers ou válvulas de isolamento. Na entrada dos gases pode ser utilizada uma válvula tipo borboleta e na saída um damper tipo poppet.

Essas válvulas são de extrema importância principalmente para manutenção em filtros compartimentados, pois permitem que a manutenção seja realizada com um compartimento parado e os demais em operação.

## 3.10 Principais vantagens do filtro de mangas

Serão listadas, na sequência, algumas das vantagens de um filtro de mangas.

- apresenta alta eficiência de coleta para processos com altas concentrações de poluentes sólidos;

- coleta material a seco e em forma reutilizável;
- a queda de pressão e o custo operacional são moderados;
- é recomendado para todas as faixas de vazão;
- não apresenta sensibilidade a variações bruscas de variáveis de processo.

### **3.11 Principais desvantagens do filtro de mangas**

Seguem algumas das desvantagens de um filtro de mangas:

- alto custo de manutenção;
- exige controle de temperatura;
- exige material filtrante ou controles especiais nos casos de possibilidade de condensação de umidade no filtro ou altas temperaturas;
- exige espaço médio para sua instalação.

Vale observar que as vantagens e desvantagens de cada tipo de sistema de proteção ambiental podem alterar dependendo do processo e das respectivas variáveis em que este equipamento será instalado.

### **3.12 Eficiência de um filtro de tecido**

O filtro de mangas é um equipamento enquadrado na categoria de “alta eficiência de coleta”, podendo chegar a valores de eficiência maiores que 99,9

Em geral, não existe modelo matemático prático para a determinação da eficiência de coleta em filtros de tecido. Existem, no entanto, algumas equações teóricas que fazem uso de coeficientes determinados experimentalmente, de modo a fornecer uma estimativa do valor da eficiência (US-EPA, 1998). Theodore (2008), por exemplo, sugere uma fórmula baseada nas características do tecido, da torta, do tempo de operação para o desenvolvimento da espessura da torta e da espessura do tecido. No entanto, em geral, valores de eficiência de coleta são fornecidos por fabricantes com base em valores conhecidos pela experiência (US-EPA, 1998).

### 3.13 Projeto do filtro de mangas

Geralmente o projeto dos filtros de mangas é realizado com base na experiência (*Know how*) do fabricante com processos e aplicações similares (US-EPA, 1998). Adota-se uma configuração de dutos de entrada e geometria do filtro e assume-se, para fins de cálculo, que o escoamento na entrada é uniforme e que todas as mangas estão sujeitas aos mesmos valores de velocidade e pressão, o que na prática não é verdade.

O projeto do filtro influencia diretamente na distribuição das velocidades nas mangas, de modo que um filtro com uma distribuição não homogênea proporciona áreas com velocidade de filtração superiores ou inferiores à velocidade de filtração especificada no projeto. A existência de regiões com velocidades demasiadamente altas pode provocar o desgaste prematuro das mangas (DAMIAN et al., 2004).

A má distribuição do escoamento pode promover uma não uniformidade na torta, uma vez que velocidades de filtração mais elevadas são responsáveis pela formação de tortas mais compactas e mais difíceis de remover (TOGNETTI, 2007), ao contrário de velocidades de filtração mais baixas. Como consequência, a limpeza da manga pode ser deficiente, uma vez que o conjunto de mangas e a própria superfície de cada manga estão sujeitos a tortas de filtração de características diferentes.

Entretanto, existem alguns fatores que devem ser levados em consideração durante o projeto de um filtro de mangas. Assim, de forma sucinta, será feita uma breve descrição das variáveis mais importantes.

#### 3.13.1 Velocidade

As velocidades internas de um filtro de mangas são de extrema importância para a determinação de sua eficiência, para a correta distribuição dos gases, adequada formação da torta e alta eficiência de limpeza das mangas.

A velocidade pode ser subdividida em quatro diferentes parâmetros.

##### **a) Velocidade de entrada [m/s]**

É a velocidade medida na saída do manifold de entrada e entrada da tremonha.

$$V_{ent} = \frac{Qt}{A_{m.entrada}} \quad (3.1)$$

Em que:

$V_{ent}$  denota a velocidade de entrada dos gases na tremonha;

$Q_t$  denota a vazão total do gás naquela câmara;

$A_{m.entrada}$  denota a área da boca de entrada de da tremonha.

### **b) Velocidade ascendente [m/s]**

É a velocidade medida na região imediatamente antes do fundo das mangas, pode ser entendida também como a velocidade com que o gás passa entre os fundos das mangas. É determinada de acordo com as características do material particulado, tais como peso e abrasividade.

Quando essa velocidade tem valores acima do determinado para a aplicação, no momento da limpeza das mangas grande parte do material particulado retorna novamente para as mangas, tendo como consequência o aumento da queda de pressão do filtro. Quanto menor for a velocidade ascendente, maior será a facilidade de o particulado ser deslocado das mangas e conduzido para o fundo da moega.

A velocidade ascendente para aplicações típicas é de 0,8 m/s a 1,0 m/s (EMISSÃO ZERO, 2012). Ela tem o importante papel na definição do tipo de limpeza e depende do material particulado. É definida pela equação a seguir:

$$V_{asc} = \frac{Q_t}{A_l} \quad (3.2)$$

Em que:

$V_{asc}$  denota a velocidade ascendente;

$Q_t$  denota a vazão total do gás naquela câmara;

$A_l$  denota a área livre para passagem do gás entre as paredes da câmara e as mangas e entre as mangas. É dada pela EQ. (3.3).

$$A_l = A_{ch. esp.} - (A_{furo. mangas} * N_{m. comp}) \quad (3.3)$$

Em que:

$A_{ch. esp.}$  denota a área da chapa espelho;

$A_{furo. mangas}$  denota a área do furo da chapa espelho, ou seja, o local ocupado pelas mangas;

*Nm.comp* denota o número de mangas por compartimento.

**d) Velocidade de filtração [ $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ ]**

A relação ar-pano, também chamada de velocidade de filtração, é definida como a razão da vazão volumétrica pela área de tecido filtrante (US-EPA, 1998). Seu valor numérico é dado por:

$$RAP = \frac{Qt}{Aft} \quad (3.4)$$

Assim, a razão ar-pano é dada em unidade de velocidade, geralmente  $\text{m}/\text{min}$  [ $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ ], e pode ser interpretada como a velocidade que atravessa a manga na direção normal à sua superfície, dada a própria definição de vazão. Recomenda-se para a aplicação com materiais abrasivos o valor de  $1,2 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{min}$  (EMISSÃO ZERO, 2012).

Portanto, a velocidade de filtração está relacionada ao tempo necessário para filtração, ao desgaste do tecido, profundidade de penetração do material particulado e na queda de pressão residual após a limpeza do filtro, imediatamente antes do início de uma nova etapa de filtração (TOGNETTI, 2007).

o que reduz consideravelmente os custos de fabricação, instalação e manutenção.

A literatura descreve que são encontrados na indústria valores de razão Ar-Pano, em geral, entre 1 e 10  $\text{m}/\text{min}$  (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004).

Uma boa distribuição do fluxo nas mangas também possibilita operações com valores da razão ar-pano mais elevadas, ou seja, em uma mesma aplicação o filtro poderia operar com um número inferior de mangas, esse fato permite projetos de filtros mais compactos.

### 3.13.2 Queda de pressão

Considere um filtro de mangas com todas as mangas novas. Quando este filtro é colocado em operação, a eficiência de filtração é baixa porque uma grande parcela do material particulado irá passar pela malha do tecido. Durante a operação as partículas menores irão se aglomerar e preencher esses espaços vazios. Quando estiverem preenchidos, a eficiência de limpeza irá aumentar substancialmente. A camada de material particulado que se forma na manga atua na filtração de maneira bastante eficiente. Com o aumento da espessura dessa camada há o conseqüente aumento da queda de pressão, redução da vazão, até que seja alcançado o limite para se iniciar a limpeza, conforme mostrado na FIG. 3.13.

Segundo Wilder e Billings (1970) *apud* Rodrigues (2006), quando se inicia um novo ciclo de filtração, a queda de pressão (queda de pressão) através do filtro se encontra em um valor bem abaixo daquele imediatamente anterior à limpeza, mas ligeiramente superior ao valor inicial, correspondente ao filtro limpo. Isso se deve ao fato de que, por mais eficiente que seja a limpeza, algumas partículas não são removidas, permanecendo nos interstícios do tecido. Outro motivo é a existência de pedaços da torta que não foram removidos (*patchy cleaning* ou remoção por blocos), de modo que a regeneração do filtro é incompleta (TOGNETTI, 2007). A queda de pressão residual tende a aumentar após cada ciclo de filtração, pelo acúmulo de partículas no interior do tecido, até que este valor tende a estabilizar, indicando uma saturação do tecido, que depende do material do filtro, do tamanho das partículas, do tempo e do tipo de sistema de remoção da torta (CALLÉ *et al.*, 2002 *apud* ROCHA, 2010).

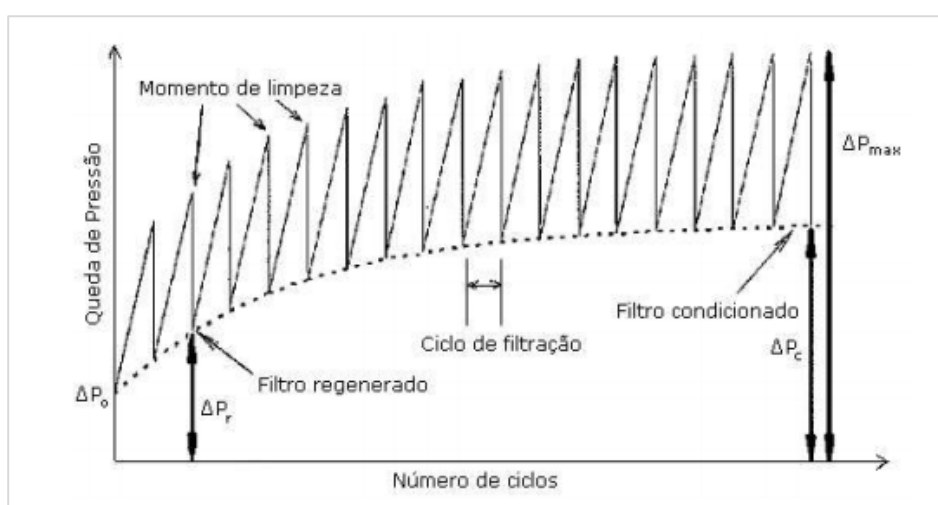


FIGURA 3.13 – Queda de pressão durante ciclo de limpeza filtro de mangas  
 FONTE: WINSTON GOMES (s.d.).

Segundo Cooper e Alley (2011), a queda de pressão através de um filtro de mangas em uma determinada vazão é dada pela EQ. (3.5).

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_p + \Delta P_s \quad (3.5)$$

Em que:

$\Delta P_f$  denota a queda de pressão associada ao tecido filtrante;

$\Delta P_p$  denota a queda de pressão associada à torta;

$\Delta P_s$  denota a queda de pressão devido à estrutura do filtro.

A queda de pressão (queda de pressão) devida à estrutura do filtro é geralmente baixa, ao passo que a associada à torta e ao tecido são significativamente maiores, sendo associadas à velocidade de filtração, viscosidade do gás, espessura de cada camada e permeabilidade do filtro e da camada de particulado.

### 3.13.3 Tecido Filtrante

Este item é dependente das propriedades químicas e físicas do gás e também do material particulado. Dentre estes, pode-se citar: concentração de material particulado presente no gás, granulometria, peso específico, abrasividade, explosividade, temperatura e umidade tanto no gás exaurido quanto no ar comprimido de limpeza.

### 3.13.4 Área filtrante total

É a quantidade de material filtrante necessário para determinado filtro de acordo com os dados de entrada, já citados no item 1.13.3. É obtida pela seguinte equação:

$$AFt = AFm * N. mangas \quad (3.6)$$

Em que:

$AFt$  denota a área filtrante total;

$AFm$  denota a área filtrante de cada manga;

$N. mangas$  denota o número total de mangas;



A área de cada manga é dada pela seguinte equação:

$$AF_m = \pi * D * L * 0,97 \quad (3.7)$$

Em que:

$AF_m$  denota a área filtrante de cada manga;

$D$  denota o diâmetro da manga;

$L$  denota o comprimento da manga.

### 3.13.5 Espaçamento entre mangas

Outro parâmetro extremamente importante para o projeto de um filtro é a distância entre cada manga, pois afeta a velocidade do ar entre as mangas e carcaça, a velocidade ascendente.

Hoje, com a otimização dos projetos, já são encontradas no mercado mangas de 8, 10 e até 12 metros. Nesse caso, se a distância entre as mangas não for adequada, pode haver o toque entre elas, gerando desgaste na parte inferior da manga. Isso afeta também as dimensões do filtro, pois quanto maior a proximidade das mangas, menor será o filtro, e quanto mais afastado, maior será o filtro. Pode-se concluir que a escolha correta da distância entre mangas deverá levar em consideração não só os parâmetros geométricos, mas também a variável custo.

## 3.14 Fluidodinâmica computacional

A simulação numérica em mecânica dos fluidos e transferência de calor, bastante conhecida como CFD (*Computational Fluid Dynamics*), teve um desenvolvimento impressionante nos últimos 20 anos. Inicialmente utilizada como uma ferramenta para análise de problemas físicos em nível de investigação científica, é reconhecida atualmente como uma ferramenta poderosa para a solução de importantes problemas aplicados à engenharia (MALISKA, 2010)

A melhoria do comportamento do escoamento do fluido no interior de um filtro de mangas é um problema de engenharia. Segundo Maliska (2010), há três ferramentas para desenvolver seu projeto ou analisar seu problema: métodos analíticos, métodos numéricos (experimentação numérica) e experimentação em laboratório. Destes, a simulação numérica vem

se destacando por sua capacidade de resolver problemas complexos, com geometrias complexas e condições de contorno gerais, apresentando resultados com rapidez.

A fluidodinâmica computacional é uma ferramenta computacional capaz de analisar sistemas envolvendo escoamento de fluido, transferência de calor e outros processos físicos e químicos correlacionados. Assim, o CFD é uma técnica poderosa e pode ser utilizada para diversas aplicações industriais e não industriais (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

O uso do CFD cresceu drasticamente nas últimas décadas, principalmente desde a década de 1990. Esse desenvolvimento se deve a várias causas, sendo a principal o aumento exponencial da velocidade computacional associado à redução de seu custo, e essa tendência parece continuar. Além disso, deve-se ao desenvolvimento dos softwares de simulação e a melhoria de rotinas fundamentais, como a geração de malha e de métodos numéricos (NIELSEN, 2015).

A estrutura de um código do CFD contém três elementos principais: pré-processamento, solução do escoamento e pós-processamento.

O pré-processamento consiste na criação dos dados necessários do problema físico, de modo a resolver as equações de transporte. Deve-se definir a geometria e, então, gerar a malha. A geração da malha consiste na subdivisão do domínio em subdomínios de menor tamanho que não se sobrepõem, sendo uma malha de volumes de controle, também chamados de células e/ou elementos (VERTEEG; MALALASEKERA, 2007). Nesses volumes de controle, as equações da conservação serão discretizadas e resolvidas. Segundo Rocha (2010), a geração da malha deve considerar o fenômeno físico envolvido, de modo a refiná-la em regiões de gradientes elevados para obter a convergência e um resultado satisfatório. Ainda na etapa de pré-processamento devem-se definir as propriedades físicas e químicas a serem modeladas e as condições de contorno.

A solução do escoamento é realizada baseada nas leis da física que regem o escoamento dos fluidos. Neste trabalho, as equações de Navier-Stokes serão reduzidas, pois apenas as conservações de massa e quantidade de movimento serão aplicadas, uma vez que o filtro objeto deste estudo foi considerado isotérmico e com escoamento de um fluido incompressível.

No pós-processamento avaliam-se os resultados obtidos. Segundo o Instituto ESSH de Educação, Pesquisa e Desenvolvimento (IESSH, 2010), nesta etapa está uma das maiores vantagens da utilização do CFD: a facilidade de explorar os resultados em qualquer parte do domínio, o que seria muito difícil usando técnicas experimentais.

Neste contexto, a aplicação da análise CFD para desenvolvimento de melhorias em filtros de mangas já instalados e em novos projetos se tornou indispensável, visto o resultado alcançado e sua acurácia.

Na FIG. 3.14, é mostrado o CFD sendo utilizado para a análise do escoamento num compartimento de um filtro de mangas.

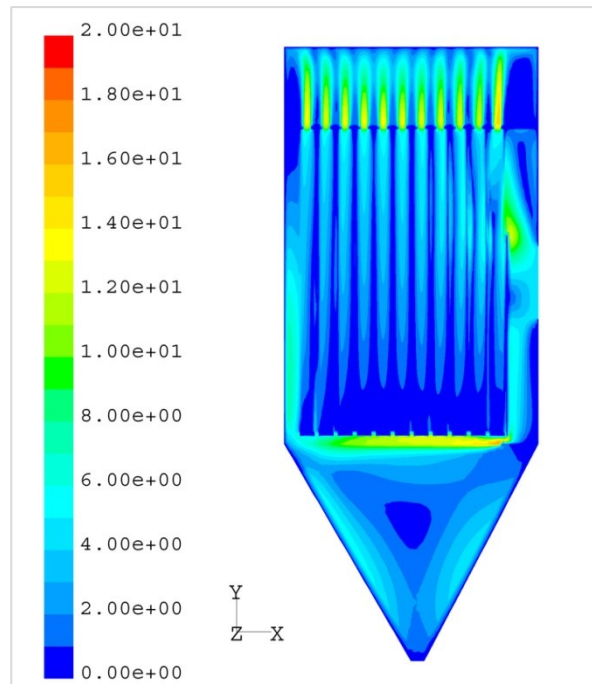


FIGURA 3.14 – CFD aplicado ao sistema de limpeza das mangas  
FONTE: FLOWENG (s.d.).

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as etapas de desenvolvimento deste trabalho, assim como a descrição detalhada de cada uma.

O filtro de mangas, objeto de estudo deste trabalho, está instalado e operando desde 2007, e apresenta uma série de problemas que serão descritos na seção 4.1.

Foi realizado um levantamento completo dos dados, desenhos, manuais etc. Logo após, foi realizado um levantamento de campo minucioso, dividido em várias etapas, acompanhando o cronograma de parada do equipamento duramente 12 meses. Foram realizadas medições de campo para levantamento dos valores de vazão e pressão do filtro.

As medições foram realizadas por uma empresa contratada e o relatório encontra-se na seção Anexos deste trabalho.

### 4.1 Caracterização do Problema

O sistema entrou em operação em 2007, e desde então apresenta um desgaste acentuado das unidades (mangas) filtrantes. O custo de manutenção, aquisição de sobressalente e efetivo para execução das atividades está alto, devido à necessidade de constantes intervenções para a troca das mangas danificadas.

Em condições normais de trabalho, a vida útil média de uma manga é de 2 anos, e considera-se uma porcentagem de troca de 10% do total de mangas nesse período como aceitável. Neste sistema há intervenções mensais para verificação e troca das mangas, e sempre é trocado um número considerável de mangas. Em média são trocadas 70 mangas por intervenção.

Além das consequências diretas, ocorre o problema de passagem de material particulado pelo filtro e chaminé, o que ocasiona um desgaste acentuado do rotor.

Na FIG. 4.1 apresentam-se fotos de mangas danificadas. Nelas podem ser vistos furos, além do desgaste por abrasão que pode ocorrer pela alta velocidade dos escoamentos com alta concentração de material particulado e/ou devido ao toque entre as mangas.

Na FIG. 4.2 pode-se ver um conjunto de mangas aglomeradas, o que pode causar o tipo de desgaste mostrado na FIG. 4.1. Esse toque pode acontecer por alguns fatores, entre eles instalação incorreta das mangas ou instalação com gaiolas empenadas, além da alta velocidade, que pode ocasionar esse aglomerado e esse toque.



FIGURA 4.1 – Mangas desgastada na parte inferior  
FONTE: acervo do autor (2018).



FIGURA 4.2 – Aglomerado de mangas  
FONTE: acervo do autor (2018).

A FIG. 4.3 mostra o plenum de entrada das tremonhas, onde se inserem as condições de contorno deste estudo.



FIGURA 4.3 – Plenum de entrada do filtro  
FONTE: acervo do autor (2018).

Na FIG. 4.4 observa-se o quadro de defletores, que também é parte deste estudo.

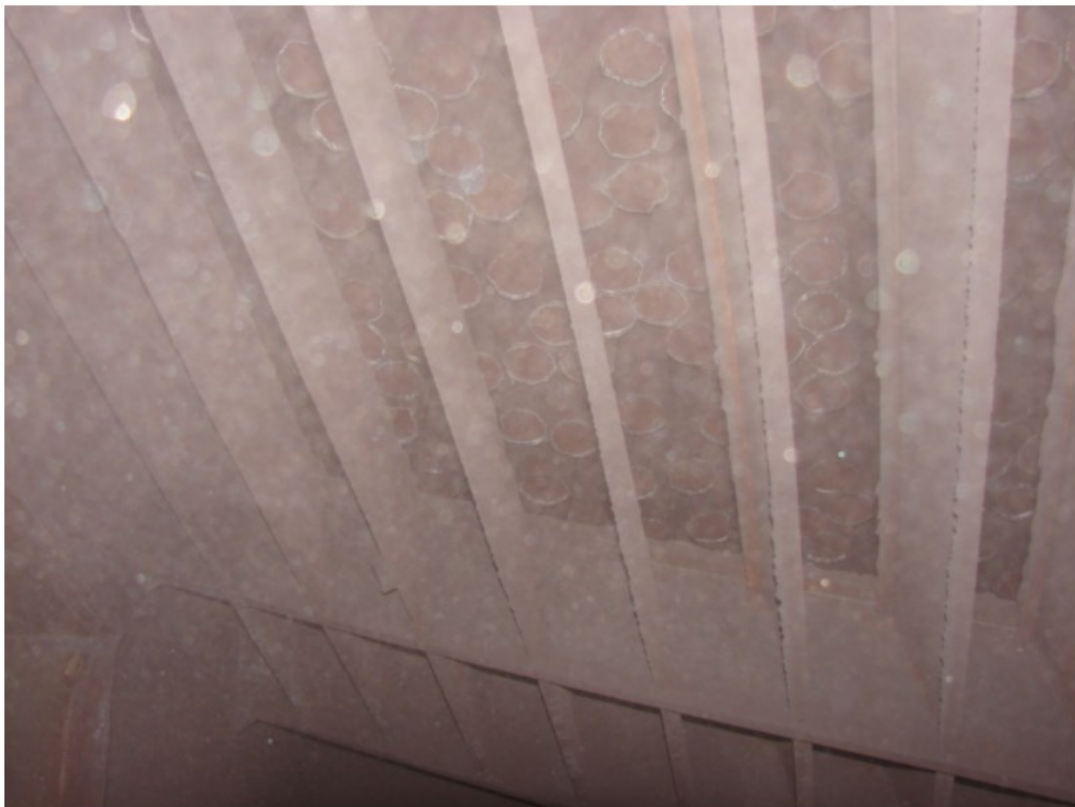


FIGURA 4.4 – Quadro de defletores original  
FONTE: acervo do autor (2018).

A análise foi baseada nos dados do sistema retirado dos desenhos citados acima, além de fotos e inspeções físicas na área. Foram encontrados os seguintes problemas:

1. altas velocidades de filtração;
2. alta velocidade ascendente;
3. entradas dos gases próxima das extremidades inferiores das mangas. A distância entre o fundo das mangas e a entrada dos gases na tremonha é de apenas 600 mm.
4. desgaste por abrasão na parte inferior da manga (conforme FIG. 4.1);
5. altas pressões diferenciais, prejudicando a tiragem e diminuindo em muito a eficiência do filtro de mangas;
6. baixa durabilidade das mangas;
7. várias paradas para trocas das mangas.

Vários desses itens listados não serão tratados neste trabalho. Conforme apresentam os itens subsequentes, a uniformização do escoamento, a uniformização do perfil de velocidade e pressão serão objeto de estudo deste trabalho.

## 4.2 Levantamento de campo

A etapa de aquisição de dados foi realizada nas dependências da usina onde o filtro de mangas encontra-se instalado e operando. Os dados obtidos foram utilizados como parâmetros de entrada no modelo numérico, para sua calibração. As etapas de modelamento e simulação numérica foram realizadas utilizando-se os softwares ANSYS SpaceClaim e CFX, respectivamente, disponíveis e licenciados também nesta usina.

O filtro a ser estudado é do tipo jato pulsante, e seus dados estão listados a seguir:

TABELA 4.1  
Dados do filtro de mangas estudado

<b>Dados Filtro de mangas</b>	
Vazão volumétrica (m <sup>3</sup> /h)	600.000
Número de mangas [un]	3072
Diâmetro das mangas [mm]	130
Comprimento mangas [mm]	6.000
Nº compartimentos	8
Relação ar-pano [m <sup>3</sup> /min/m <sup>2</sup> ]	1,3
Relação ar-pano em limpeza [m <sup>3</sup> /min/m <sup>2</sup> ]	1,5
velocidade ascendente [m/s]	2,4
velocidade ascendente em limpeza [m/s]	2,9

FONTE: dados da pesquisa.

Foram realizadas diversas visitas a campo para levantamento de dados: vazão, queda de pressão do filtro temperatura de trabalho e condições físicas do equipamento

A cada parada do equipamento para revisão, ou seja, realização de troca das mangas danificadas realizou-se um mapeamento dos pontos onde havia mangas com maior desgaste e/ou rasgos. Foi constatado que a maioria das mangas trocadas está nas fileiras opostas à entrada da tremonha e em menor quantidade nas laterais. No meio do compartimento a incidência de mangas danificadas é bem menor.

#### 4.2.1 Aquisição dos dados experimentais

Primeiramente foram levantados todos os desenhos, o histórico disponível do equipamento e foram feitos registros fotográficos. Seguem fotos do equipamento a ser estudado.



FIGURA 4.5 – Filtro de mangas  
FONTE: acervo do autor (2018).

Os dados foram levantados visando obter informações suficientes para validação do modelo, das condições de contorno adotadas e das simulações a serem realizadas.

Escolheu-se uma câmara para coleta dos dados, cuja escolha levou em consideração a facilidade de acesso e de posicionamento do medidor.

A vazão foi medida no duto de entrada, enquanto a queda de pressão foi obtida pela diferença entre a câmara de ar limpo e a câmara de ar sujo do filtro de mangas, conforme mostram os desenhos, através de medidores instalados. Utilizou-se os medidores já instalados devido à dificuldade encontrada para instalação de pontos de medição, e também para aquisição dos dados através deles.



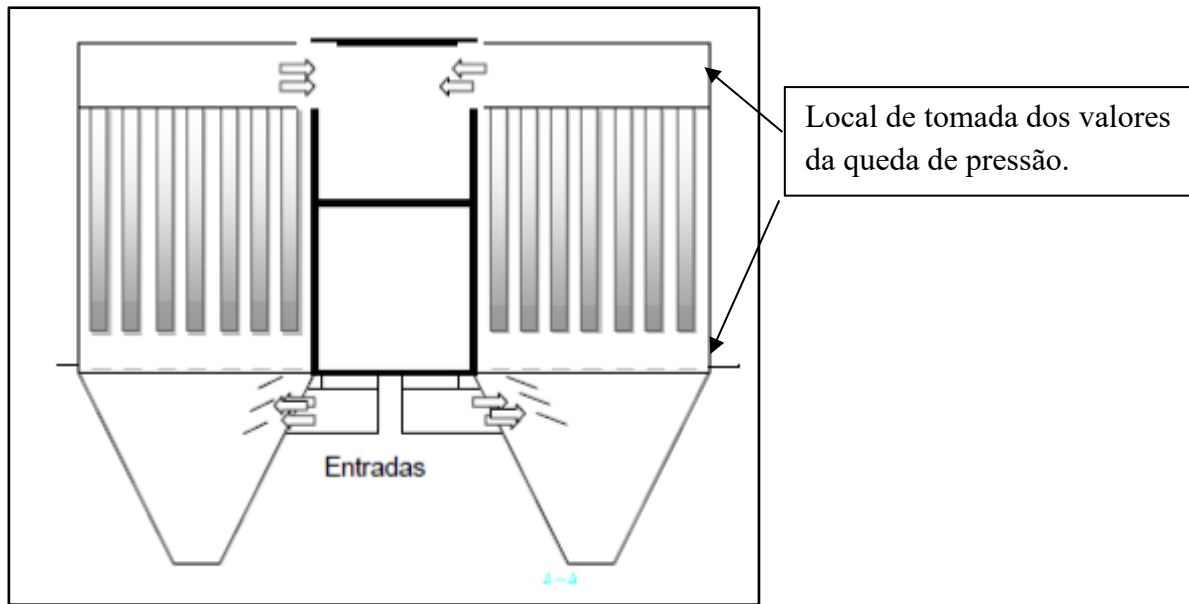


FIGURA 4.6 – Pontos de medição da diferença de pressão da câmara  
 FONTE: dados da pesquisa.

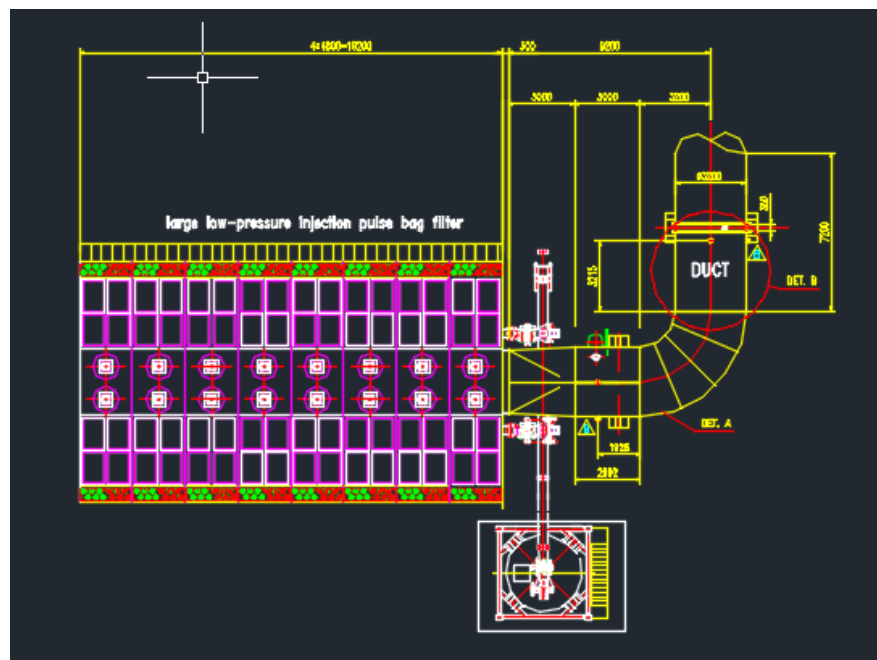


FIGURA 4.7 – Layout do ponto de medição e vazão  
 FONTE: dados da pesquisa.

Para fins de estabelecimento das condições de entrada do modelo, velocidade média, vazão média e pressão média, foi considerada uma média ponderada dos resultados dos pontos levantados.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k X_i \cdot n_i}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (4.1)$$

Para a realização de cada medição, as seguintes premissas foram adotadas:

- sistema de exaustão a 100% de capacidade;
- processo estável, ou seja, todos os dampers dos pontos de sucção 100% abertos e as correias transportadoras em operação.

### 4.3 Modelagem matemática

No presente tópico será desenvolvida uma descrição de como foram realizadas a modelagem e a simulação numérica utilizando o método de volumes finitos para obtenção das variáveis resposta de interesse: velocidade interna do filtro; melhor uniformização do escoamento no interior da tremonha.

#### 4.3.1 Domínio computacional e malha

Para a etapa de modelamento utilizou-se o software Ansys SpaceClaim 19.2 (2018).

Inicialmente a geometria da carcaça do filtro de mangas (FIG. 4.8), juntamente com os defletores, foi modelada de acordo com seu projeto atual, ou seja, o projeto original.

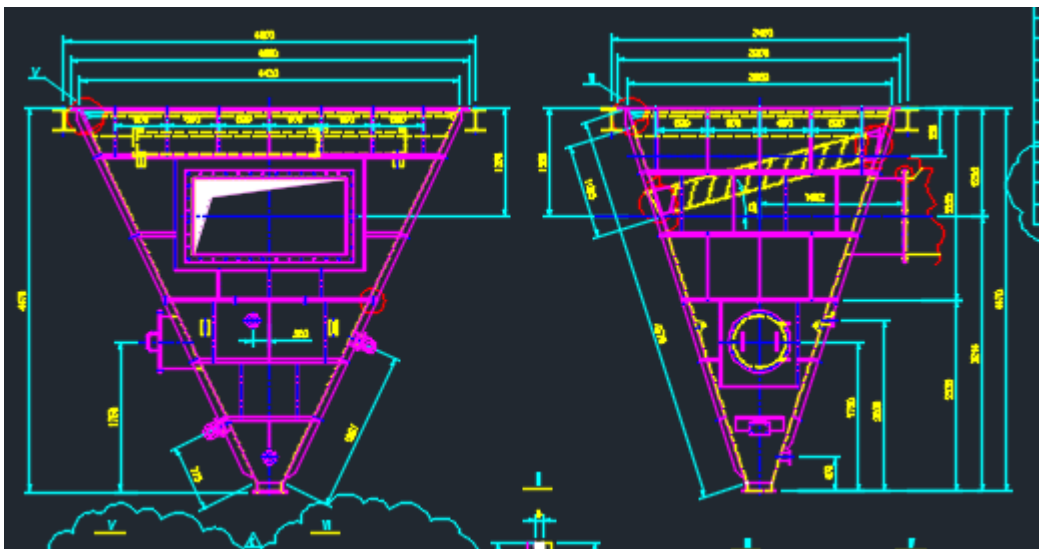


FIGURA 4.8 – Quadro defletores – projeto original  
FONTE: dados da pesquisa.

Nas FIG. 4.9 e 4.10 apresenta-se a geometria da câmara utilizada neste estudo.

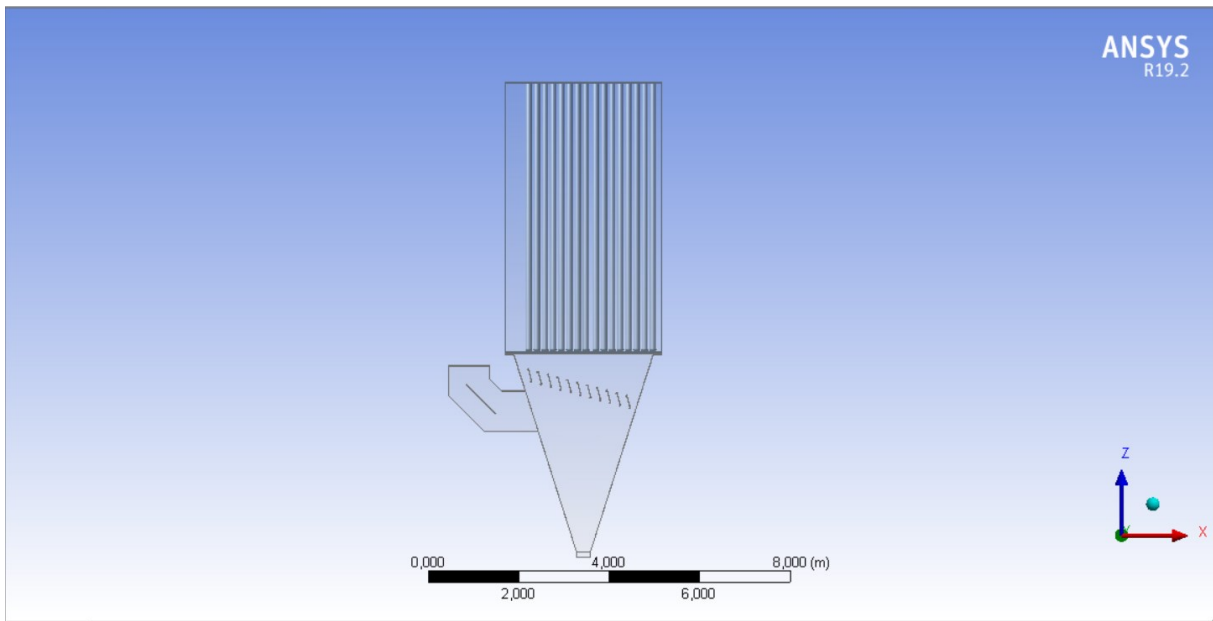


FIGURA 4.9 – Vista frontal da câmara de uma câmara do filtro de mangas  
FONTE: dados da pesquisa.

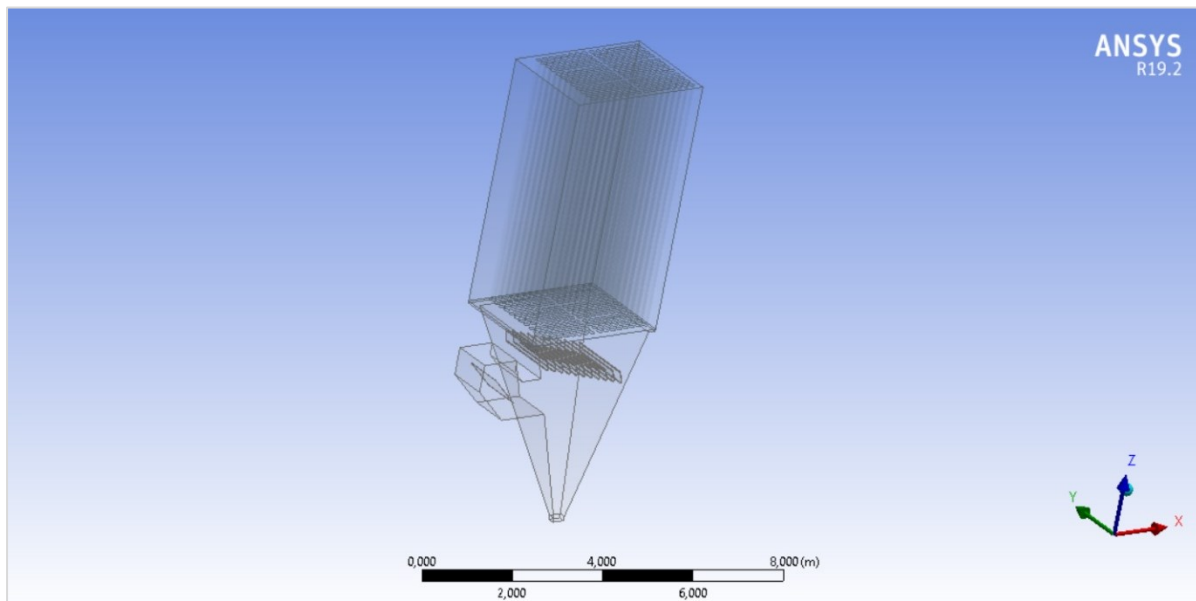


FIGURA 4.10 – Vista da câmara de uma câmara do filtro de mangas  
FONTE: dados da pesquisa.

Para a geração da malha utilizou-se o software ANSYS Meshing. A malha gerada pode ser observada nas FIG. 4.11 e 4.12.

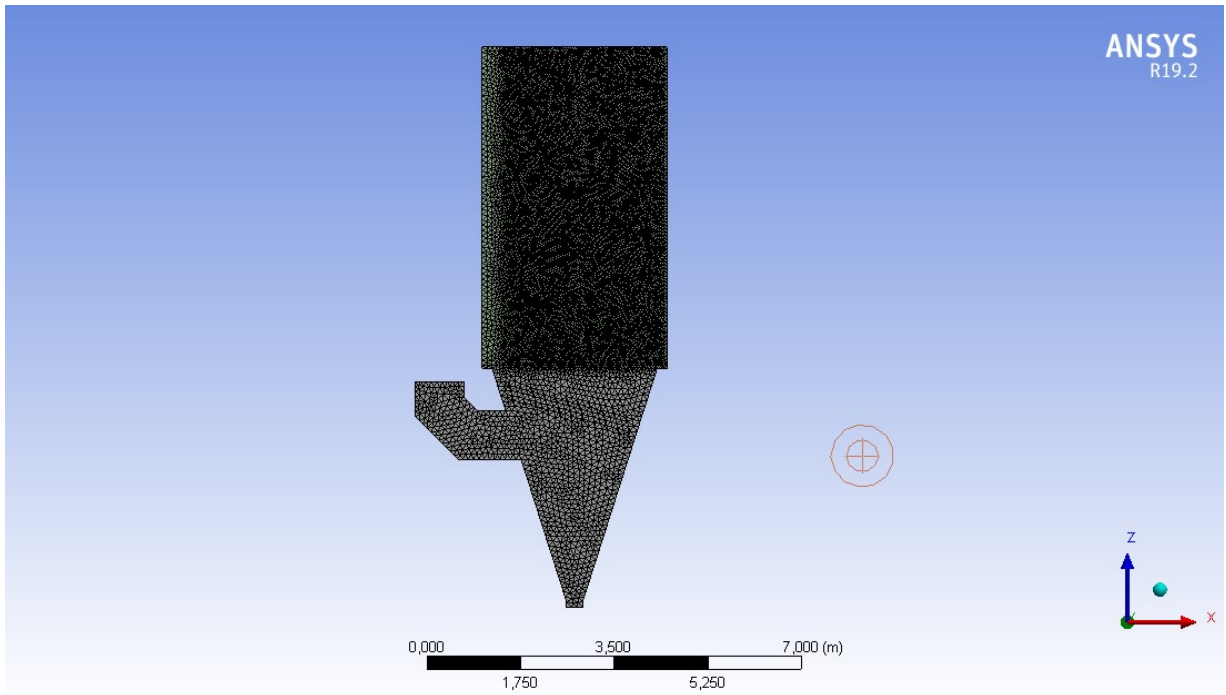


FIGURA 4.11 – Malha gerada no compartimento  
FONTE: dados da pesquisa.

Corte realizado para mostrar a caracterização dos elementos, pode ser observado na FIG. 4.12.

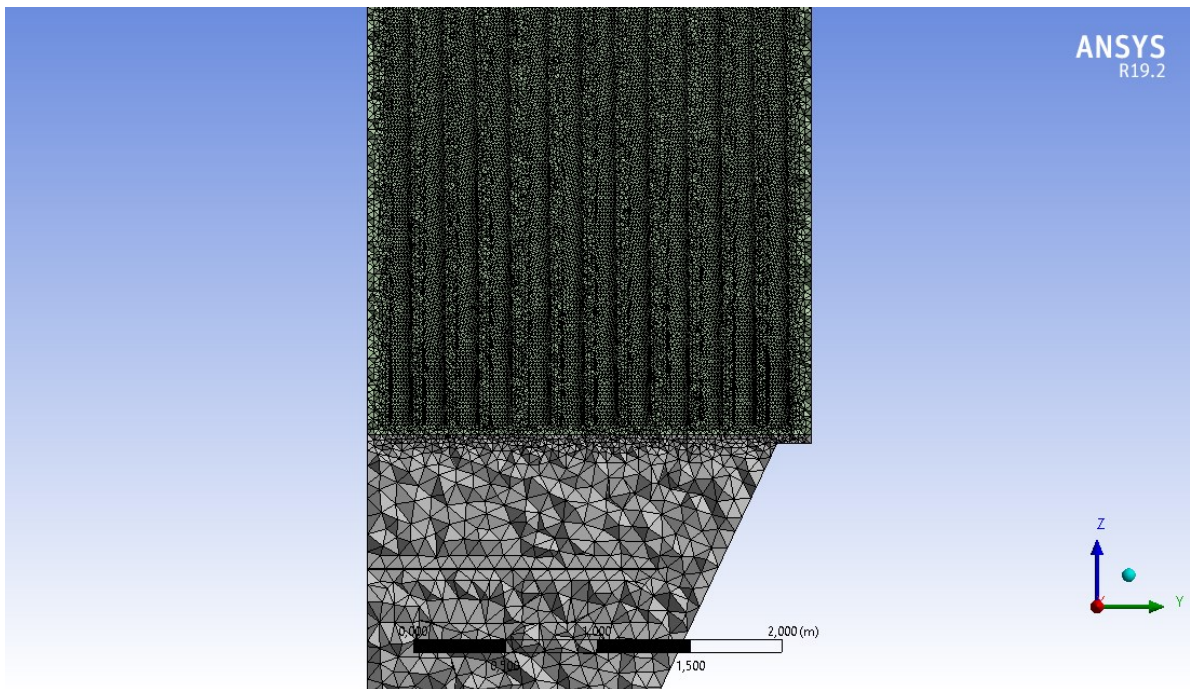


FIGURA 4.12 – Corte mostrando o interior da câmara de ar sujo  
FONTE: dados da pesquisa.

Na FIG. 4.13 observa-se os dados da malha gerada.

Details of "Mesh" <span style="float: right;">🔍</span>	
[-] <b>Display</b>	
Display Style	Use Geometry Setting
[-] <b>Defaults</b>	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	0,58396 m
[+] <b>Sizing</b>	
[+] <b>Quality</b>	
[+] <b>Inflation</b>	
[+] <b>Advanced</b>	
[-] <b>Statistics</b>	
<input type="checkbox"/> Nodes	3695636
<input type="checkbox"/> Elements	18526331

Smoothing	Medium
<b>Mesh Metric</b>	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	2,572e-006
<input type="checkbox"/> Max	0,98856
<input type="checkbox"/> Average	0,22464
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,12129

[-] <b>Quality</b>	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
<b>Mesh Metric</b>	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	1,1445e-002
<input type="checkbox"/> Max	0,99751
<input type="checkbox"/> Average	0,77324

FIGURA 4.13 – Dados da malha  
FONTE: dados da pesquisa.

Para uma melhor acurácia do resultado o ideal é utilizar a malha mais refinada e tratamentos diferenciados para as faces. Além disso, deve-se realizar testes com várias malhas e comparar os resultados de uma variável resposta, para verificar qual será a melhor para esse caso. Lembrando que quanto mais refinada é a malha, quanto mais complexo é o fenômeno físico e/ou a geometria, mais recurso computacional será necessário.

Para este caso foi determinado que o domínio é fluido com o Ar a 25 °C e sem particulado. As hipóteses simplificadoras referentes às condições do escoamento foram definidas e estão listadas abaixo com as respectivas justificativas:

- 1- Escoamento permanente: as propriedades do fluido podem ser consideradas constantes no tempo.

- 2- Fluido incompressível: o fluido pode ser considerado incompressível uma vez que o número de Mach é inferior a 0,3, o escoamento é permanente e isotérmico.
- 3- Condições isotérmicas: o filtro de mangas estudado faz a exaustão de correias transportadoras e silos em local aberto, o ar foi considerado a 25 °C e por isso pode-se negligenciar os efeitos da troca térmica.
- 4- O filtro é dividido em 8 câmaras com entrada pelo meio. Para este trabalho considerou-se o ar uniformemente dividido entre as 8 câmaras. Uma hipótese de simetria foi utilizada para facilitar os trabalhos.
- 5- Hipótese do fluido como contínuo: um fluido pode ser tratado como uma distribuição contínua da matéria.
- 6- As mangas não foram simuladas devido à complexidade de geometria, malhas e recurso computacional.

#### 4.3.2 Equações básicas

O objetivo deste trabalho é encontrar uma melhor distribuição do perfil de velocidade dentro da câmara de ar sujo do filtro de mangas, logo, as variáveis a serem avaliadas serão a velocidade nas três direções  $ui = (u1, u2, u3)$  e a pressão  $p$ , pois no problema a ser estudado não há transferência de calor ou reações químicas. Para tanto, as seguintes leis serão consideradas:

- Princípio da Conservação da Massa: a massa de um fluido no sistema se conserva.
- Segunda lei de Newton: a taxa de variação do momento é igual à soma das forças em uma partícula fluida.

Não serão apresentadas neste trabalho as deduções das equações de transporte e conservação da massa, pois não fazem parte do escopo deste trabalho. As deduções detalhadas das equações podem ser encontradas em Fox e McDonald (1998), Versteeg e Malalasekera (2007) e Frank M. White (2011).

O princípio da conservação da massa para uma partícula fluida pode ser escrito como a soma da taxa de variação de massa dentro do volume de controle com a taxa líquida de fluxo de massa para fora da superfície de controle igualadas a zero. Representado matematicamente pela Equação (2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4.2)$$

A equação acima é a equação da conservação da massa ou da continuidade, transiente e tridimensional, em um ponto em um fluido compressível. No presente modelo, o fluido é considerado incompressível e o escoamento permanente, de modo que a equação da continuidade pode ser simplificada para:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.3)$$

A Segunda Lei de Newton afirma que a taxa de variação do momento em uma partícula de fluido é igual à soma das forças aplicadas nessa partícula. A equação nasce do equilíbrio de forças, sejam elas de superfície ou de campo (ou corpo). Tem-se a Equação Diferencial da Conservação Quantidade de Movimento apresentada na Equação (4).

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial(p \delta_{ij})}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g \delta_{3i} \quad (4.4)$$

Sabe-se que em um fluido Newtoniano, a tensão viscosa é proporcional à taxa de deformação por cisalhamento, relação exibida na Equação (5).

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left( \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (4.5)$$

Quando essa relação é introduzida nas equações diferenciais do movimento obtêm-se as equações de Navier-Stokes, que podem ser muito simplificadas com as hipóteses de escoamento permanente e fluido incompressível (FOX; MCDONALD, 1998). Como o presente estudo considera estas hipóteses, as equações são simplificadas para a Equação (6).

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial(p \delta_{ij})}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g \delta_{3i} \quad (4.6)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.7)$$

Raramente tais equações podem ser resolvidas analiticamente, de modo que é preciso recorrer a métodos de solução numérica. Ressalta-se que, a partir desse ponto, as explicações consideram sempre as hipóteses de escoamento permanente e incompressível.

#### 4.3.3 Calibração do modelo

Diante da necessidade de assertividade nas análises a serem realizadas, anteriormente à execução das simulações de todas as condições experimentais propostas realizou-se a validação/calibração do modelo numérico. Para tanto, a velocidade média, a pressão média e a vazão média foram obtidas experimentalmente, conforme tratado no item 4.2.1.

Com os dados experimentais em mãos, realizou-se as etapas descritas acima, utilizando, como condições de contorno para a calibração do modelo, a velocidade média na entrada e a pressão média obtida na saída.

A partir daí realizou-se a simulação, e os dados obtidos numericamente foram comparados aos dados obtidos experimentalmente, num plano coincidente com os pontos das tomadas para realização das medições.

### 4.4 Análise

Nesta etapa será realizada a comparação entre o cálculo algébrico dos principais parâmetros de projeto do filtro de mangas e os parâmetros recomendados.

Devido às restrições para alteração no filtro, serão analisados somente os dados de velocidade de entrada na tremonha e a uniformização dos perfis de velocidade e pressão no interior do filtro.

#### 4.4.1 Análise analítica

Após o levantamento dos dados do filtro, foi realizado um cálculo algébrico para verificar os dados de projeto do filtro. Verificou-se os principais fatores:

- Velocidade de filtração (RAP);



- Velocidade ascendente [m/min];
- Velocidade de entrada na tremonha [m/s];
- Dimensões físicas [mm].

Todas as variáveis citadas acima foram calculadas analiticamente e chegou-se à conclusão de que todas estão fora dos limites recomendados pelos fabricantes e nas bibliografias sobre o tema levantadas para este estudo.

#### 4.4.2 Análise computacional

O processo de análise computacional por volumes finitos (MVF) pode ser resumido em três etapas: pré-processamento, processamento (ou solução) e pós-processamento.

A etapa de pré-processamento da simulação inicia-se com a criação da geometria, já levando em consideração as hipóteses simplificadoras assumidas neste trabalho.

Após criar e verificar todo o modelo, é importante a preparação antes de ser importado, ou de se iniciar a etapa de processamento, que é a segunda fase deste trabalho.

Nas FIG. 4.14 e 4.15 são mostradas as condições de contorno escolhidas para este estudo.

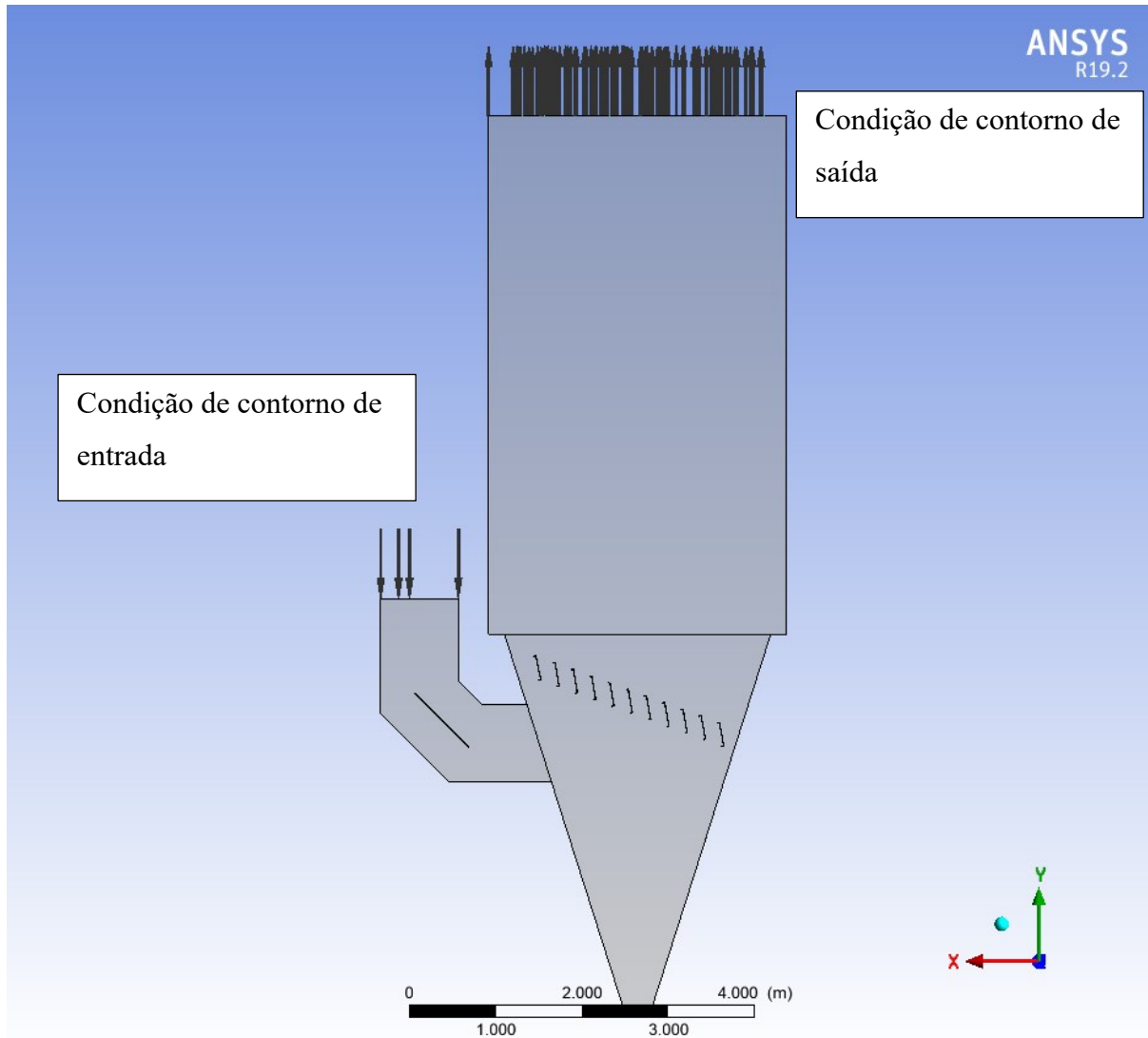


FIGURA 4.14 – Condição de contorno de entrada e saída do fluido na tremonha.  
FONTE: dados da pesquisa.

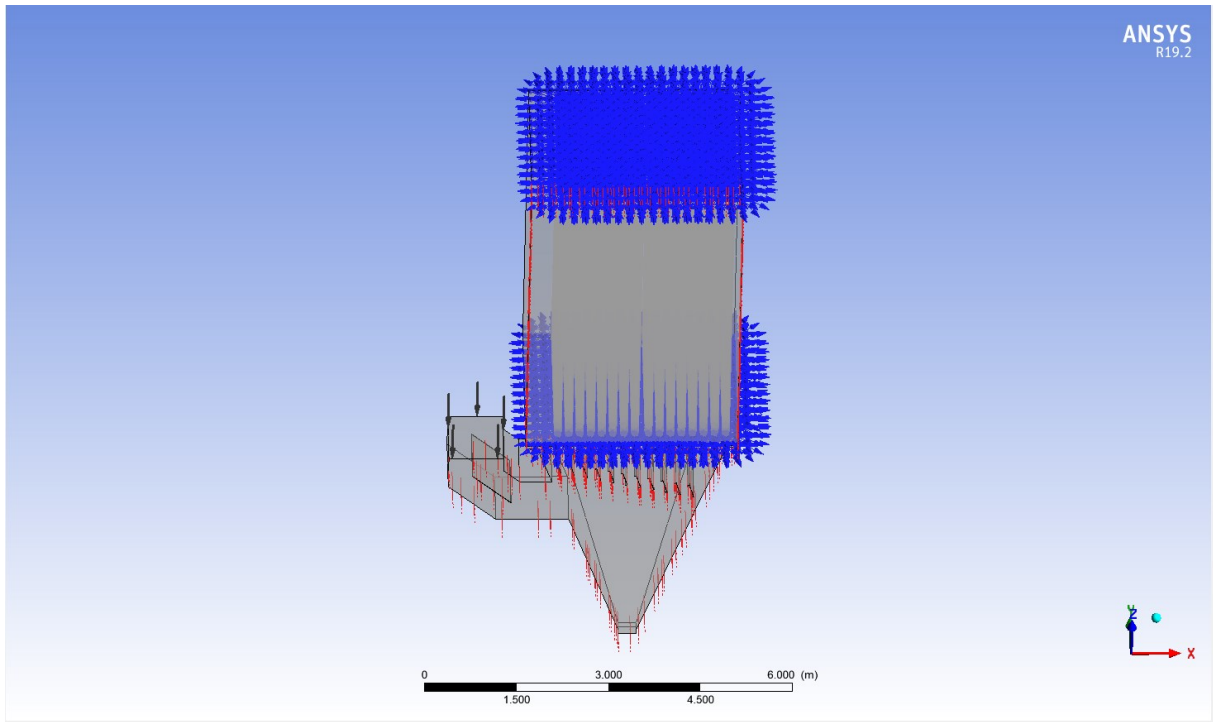


FIGURA 4.15 – Condição de contorno das mangas  
FONTE: dados da pesquisa.

Escolheu-se o módulo de análise que, para o caso em questão, foi o *Fluid Flow (CFX)*. Como fluido, considerou-se ar seco (sem material particulado) à temperatura de 25 °C. Na entrada, aplicou-se uma velocidade média de 12,86 [m/s] (pois foi utilizada a condição de simetria) normal à superfície de entrada, e na saída aplicou-se a pressão manométrica de 0 mmCA. A aplicação desses parâmetros foi escolhida devido às recomendações do ANSYS USERS GUIDE (2018). Foi considerado o regime de escoamento subsônico e desconsiderada qualquer troca de calor com o meio externo. As mangas foram modeladas e a condição de contorno usada foi openig, ou seja, permite a entrada e saída do escoamento através das mangas, pois não foi considerada a queda de pressão imposta pela manga.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos por meio de simulações computacionais realizadas, conforme descrito na metodologia.

Primeiro foi analisado o caso-base, ou seja, o filtro conforme projeto original, que pode ser visto na FIG. 5.1. A análise será realizada somente comparando os valores de velocidade de entrada na tremonha e a uniformidade na distribuição do fluxo, que por sua vez será comparada por meio dos campos de pressão e velocidade, numa seção imediatamente antes do início e no meio das mangas.

Após a análise do resultado, percebeu-se que somente a alteração no quadro de defletores não seria o suficiente para equalizar os valores de pressão e velocidade dentro do filtro. Foram sugeridas alterações no ângulo da face interior do plenum de entrada, e a instalação de defletora na curva imediatamente antes da entrada da tremonha, visto que este foi o local que apresentou maiores valores de velocidade.

### 5.1 Teste da malha

Como pode ser visto no Anexo B deste estudo, após o terceiro refinamento já não houve grandes alterações no valor da velocidade máxima calculada no plano traçado na entrada da tremonha. Levando em consideração o teste realizado e a limitação de recurso para desenvolvimento de malhas mais complexas, escolheu-se uma malha com 3694359 nós e 18470677 elementos.

### 5.2 Filtro com defletores originais

Conforme descrito anteriormente, este modelo segue o projeto original do filtro, de acordo com a FIG. 5.1.

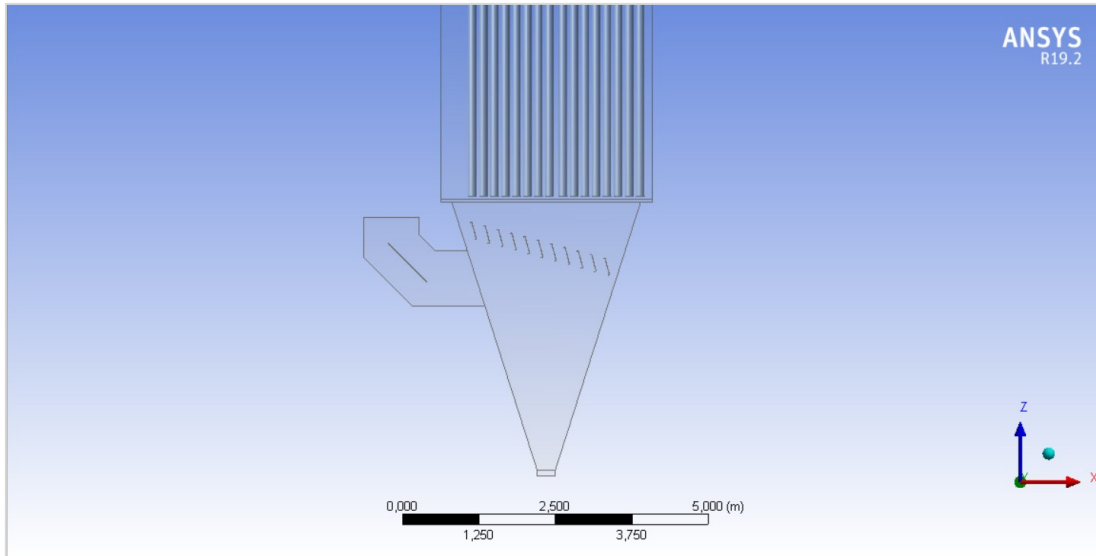


FIGURA 5.1 – Geometria conforme projeto original  
 FONTE: dados da pesquisa.

### 5.3 Linhas de corrente

Nas FIG. 5.2 e 5.3 são mostradas as linhas de corrente atingindo a face oposta à entrada da tremonha. Observa-se que o escoamento colide com a face oposta à entrada com valores de velocidade próximos de 20 m/s, o que para uma aplicação típica está cerca de 10 vezes maior que o recomendado. Observa-se também a forte recirculação no fundo da tremonha, o que causa efeitos indesejáveis para a eficiência do filtro, conforme já citado anteriormente.

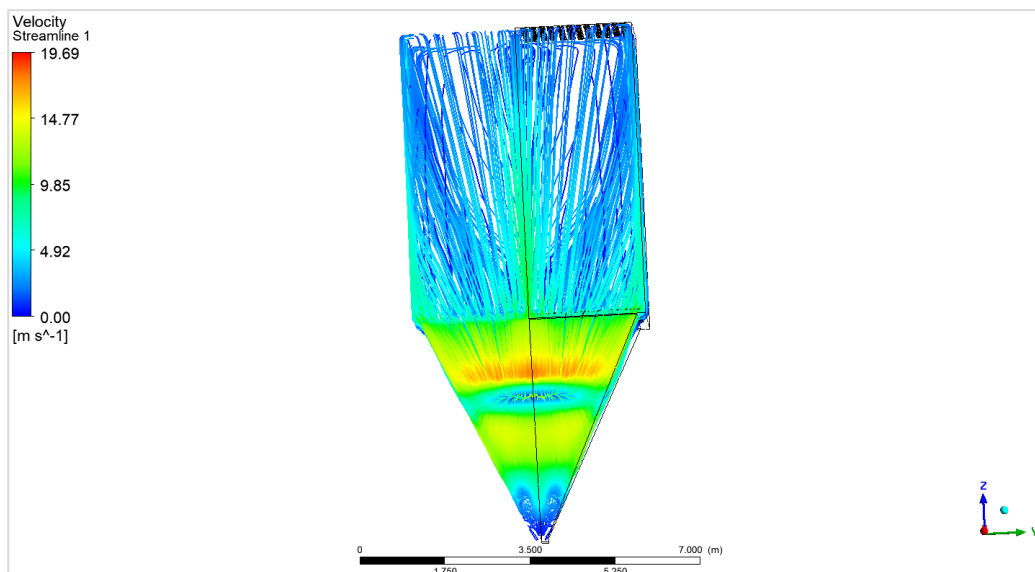


FIGURA 5.2 – Linhas de corrente na face oposta a entrada da tremonha  
 FONTE: dados da pesquisa.

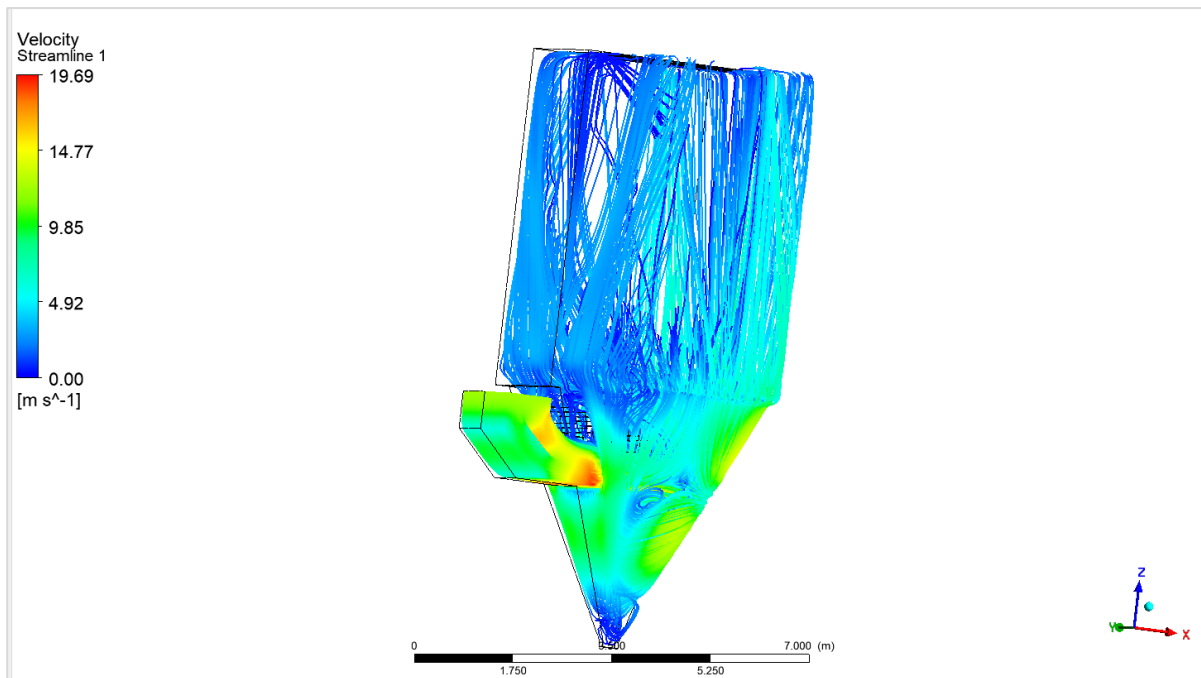


FIGURA 5.3 – Vista lateral das linhas de corrente dentro da câmara  
FONTE: dados da pesquisa.

Nas FIG. 5.4 e 5.5 é mostrada a velocidade dentro da tremonha e da câmara de ar sujo do filtro. Percebe-se que a velocidade do escoamento na entrada da tremonha é bastante alto e que há o direcionamento para o face da tremonha que está oposta à entrada e o sobrecarga nas mangas que estão na região acima desta face.

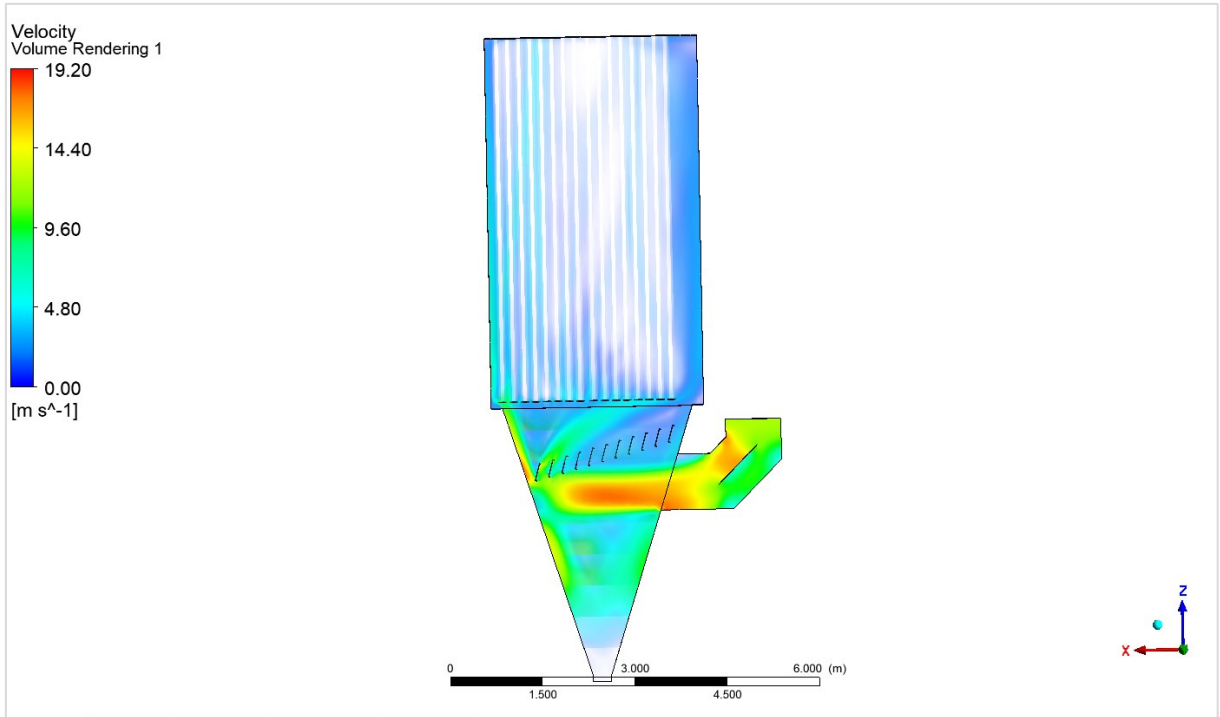


FIGURA 5.4 – Velocidade do escoamento dentro da tremonha e câmara de ar sujo  
 FONTE: dados da pesquisa.

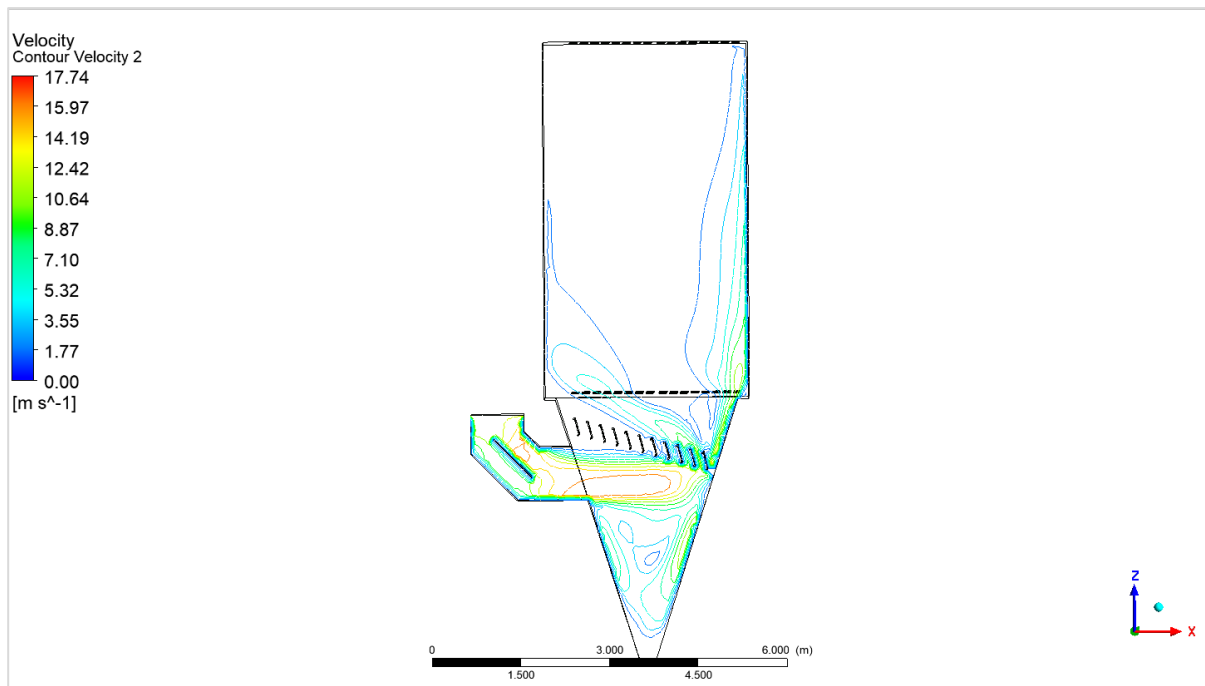


FIGURA 5.5 – Contornos da velocidade dentro da câmara de ar sujo e tremonha do filtro  
 FONTE: dados da pesquisa.

## 5.4 Velocidades

Neste trabalho foram avaliadas as seguintes velocidades no interior do filtro: a velocidade de entrada na tremonha, a velocidade ascendente na região imediatamente antes das mangas e a velocidade entre as mangas.

Normalmente, em aplicações típicas de filtros de mangas, os valores de velocidade na entrada da tremonha são da ordem de 6 a 7 m/s, porém, como se pode ver na FIG. 5.6, os valores estão chegando próximos de 20 m/s. Esta alta velocidade faz com que o escoamento encontre as mangas e as paredes internas (FIG. 5.7) do filtro com uma velocidade muito acima do recomendado, trazendo uma série de problemas já citados anteriormente.

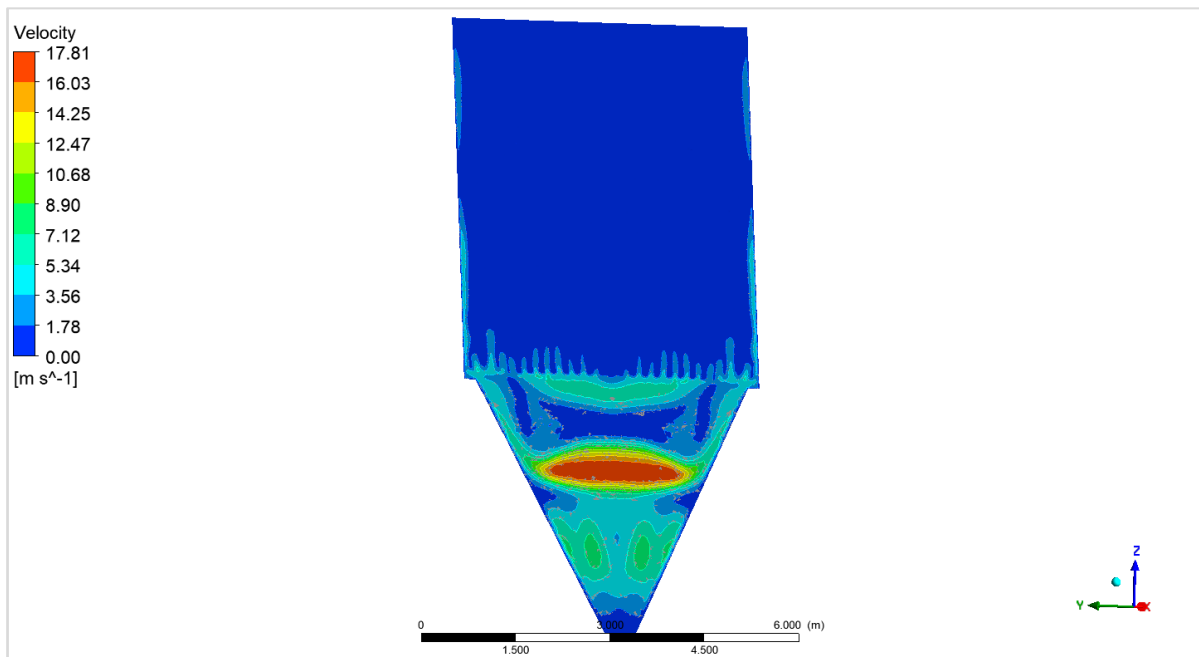


FIGURA 5.6 – Plano de referência mostrando a velocidade na entrada da tremonha  
FONTE: dados da pesquisa.

Na FIG. 5.7 mostra-se o perfil de velocidade na parede oposta à entrada do escoamento na tremonha, e observa-se que a velocidade é alta ao chocar-se com a parede. Além dos problemas já citados, a alta velocidade somada à concentração de material particulado no escoamento pode ocasionar um acentuado desgaste por abrasão e a redução da vida útil do equipamento.



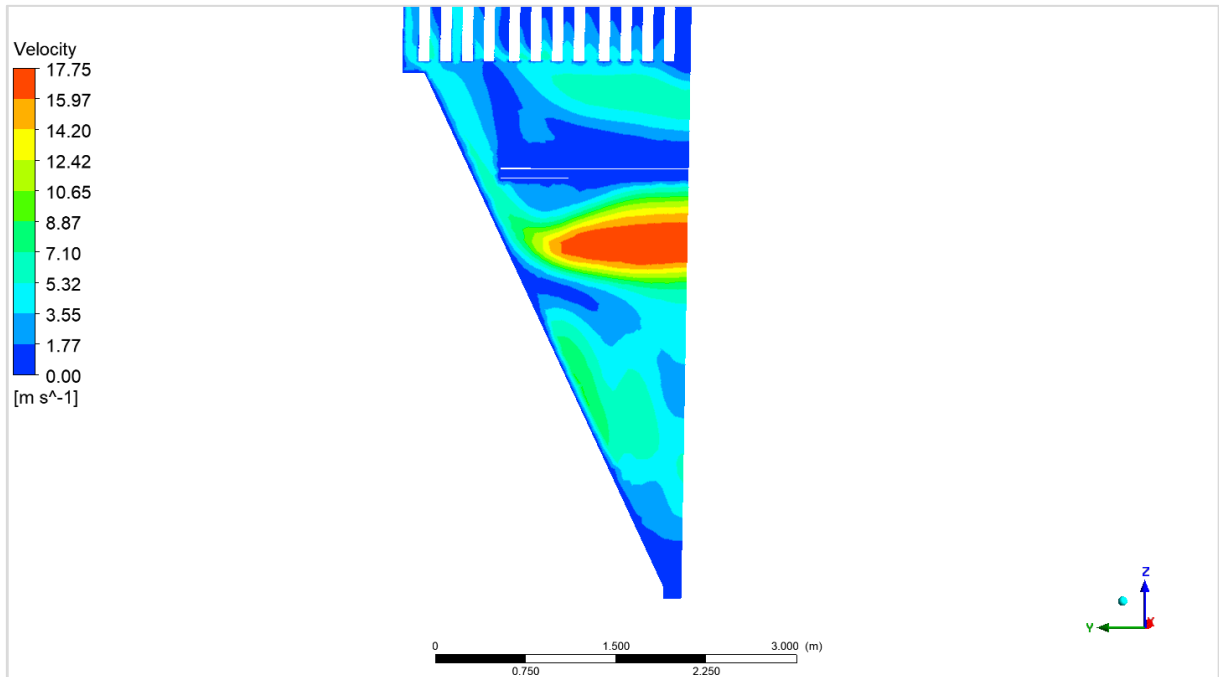


FIGURA 5.7 – Perfil de velocidade na face oposta à entrada da tremonha  
 FONTE: dados da pesquisa.

A eficiência do filtro de mangas depende de uma boa correlação entre os parâmetros de projeto como, por exemplo, velocidade de entrada na tremonha, velocidade ascendente, velocidade de filtração (RAP) e também a correta distribuição do escoamento nas mangas. Neste caso em estudo, todos esses valores estão fora da faixa recomendada.

Nas FIG. 5.8 e 5.9 é mostrado o perfil de velocidades num plano imediatamente antes das mangas. Observa-se que os maiores valores de velocidade estão na face oposta à entrada da tremonha, pois é onde encontra-se maior desgaste e conseqüente uma maior frequência de troca de mangas, o que está de acordo com os dados levantados em campo. Observa-se também que o escoamento não é distribuído de forma igual.

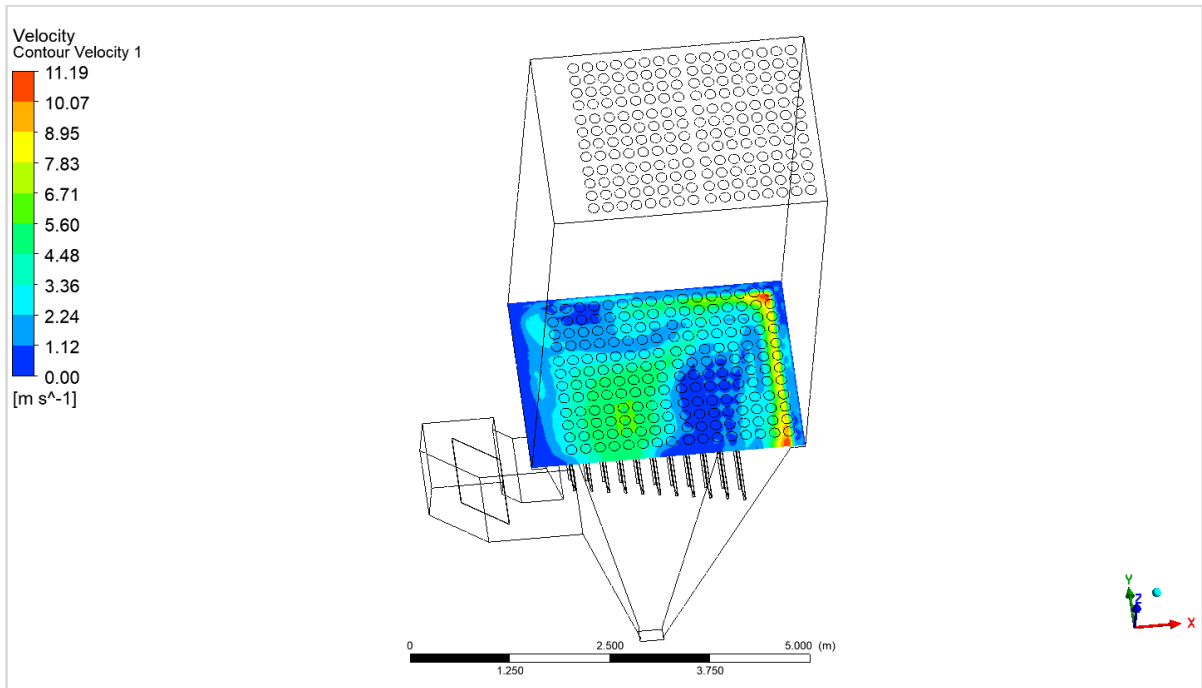


FIGURA 5.8 – Perfil de velocidades no plano imediatamente antes das mangas  
FONTE: dados da pesquisa.

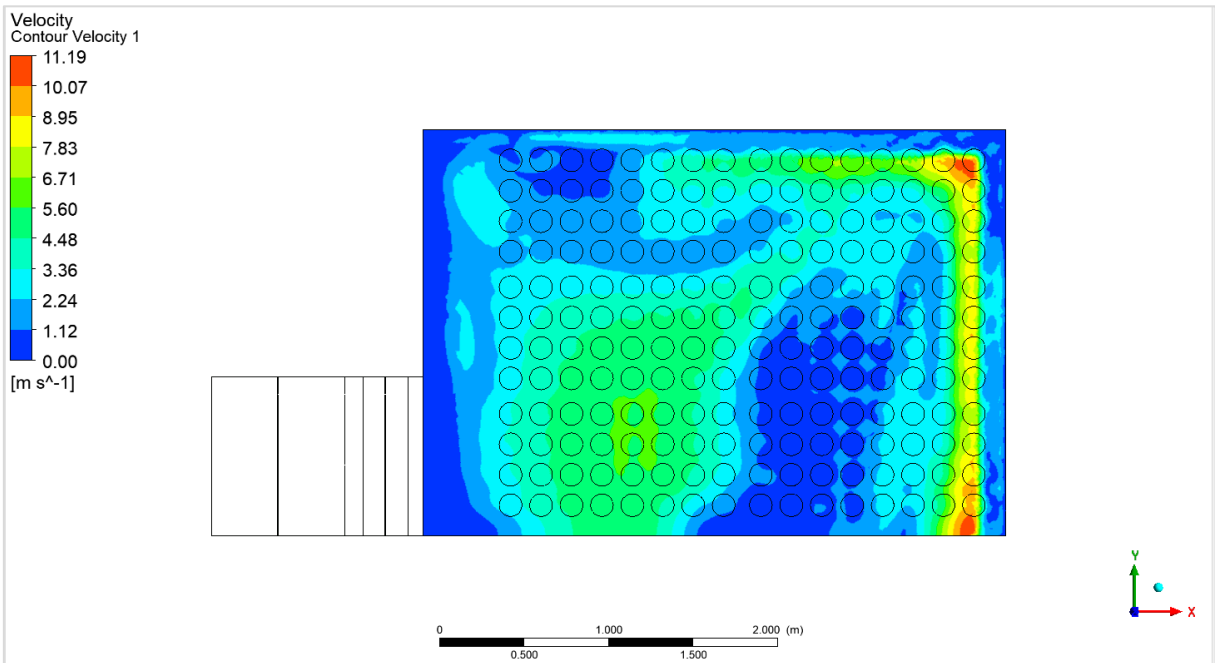


FIGURA 5.9 – Perfil de velocidade no plano antes das mangas  
FONTE: dados da pesquisa.

Na região mostrada nas FIG. 5.8 e 5.9 tem-se a recomendação de valores de no máximo 1,2 m/s para filtros de limpeza on-line. No caso do filtro em estudo que possui sistema de limpeza off-line, estes valores entre 1.8 e 2.0 m/s.

Na FIG. 5.10 é mostrado o perfil de velocidade no plano de simetria.

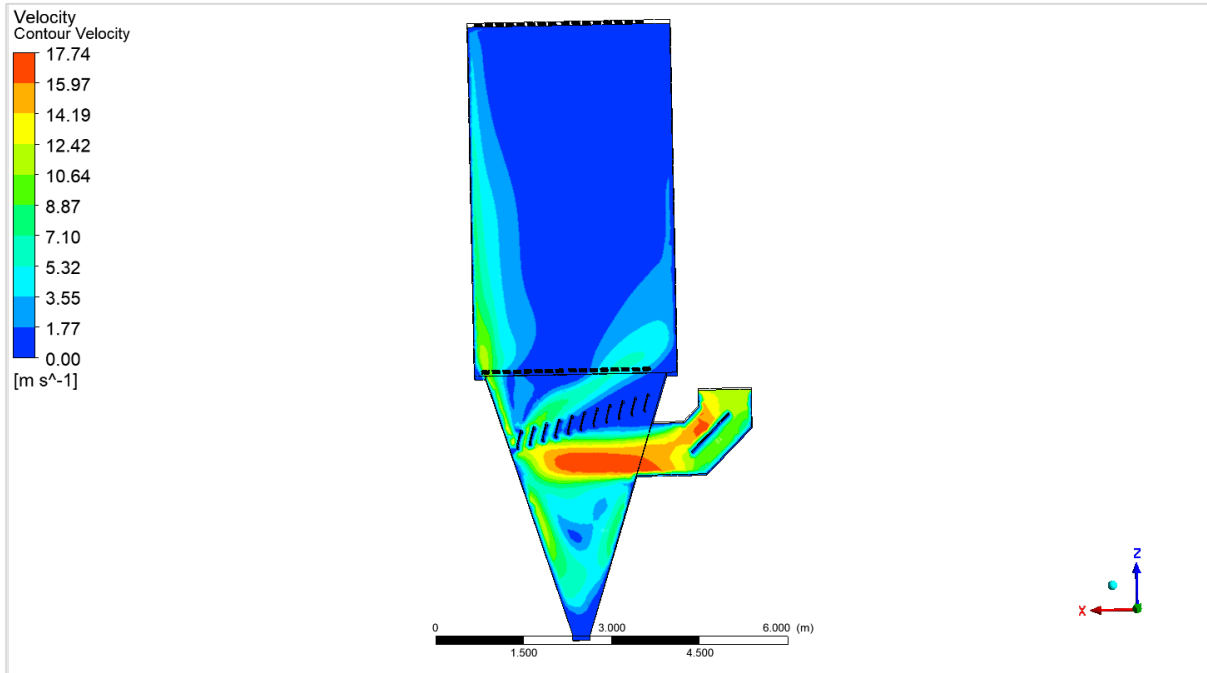


FIGURA 5.10 – Perfil de velocidades no plano de simetria  
FONTE: dados da pesquisa.

Na FIG. 5.11 é mostrado o perfil de velocidade nos planos inferior, central e superior na câmara de ar sujo

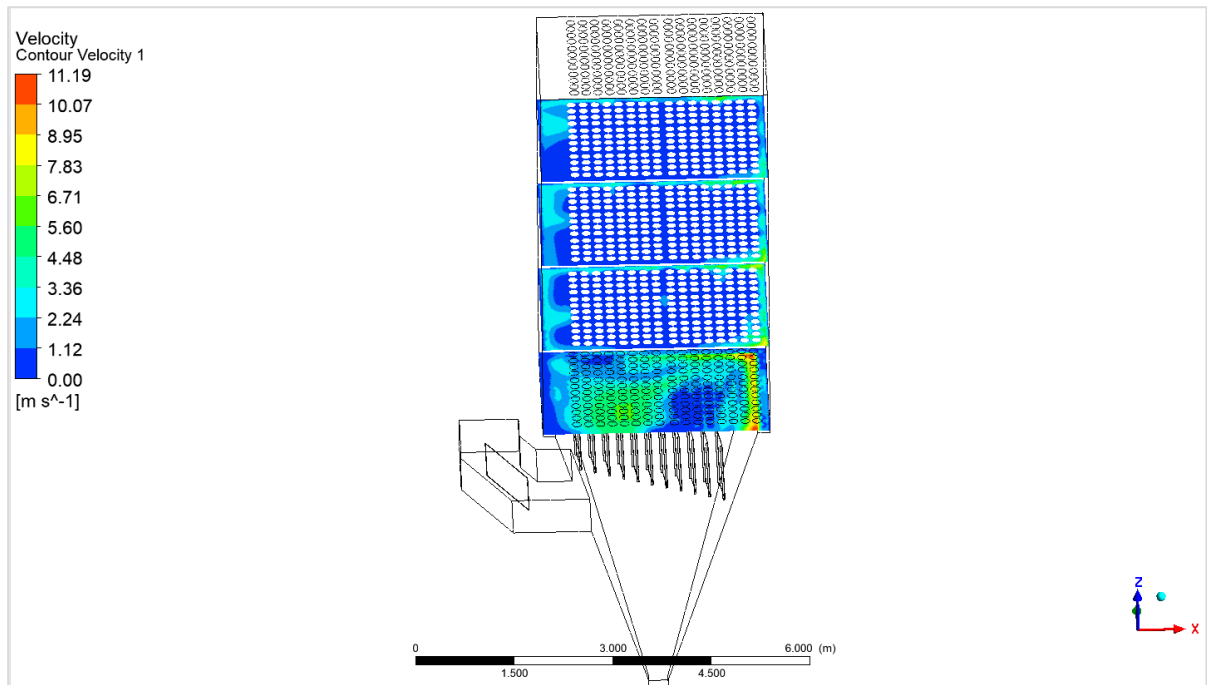


FIGURA 5.11 – Perfil de velocidade nos planos inferior, central e superior na câmara de ar sujo  
FONTE: dados da pesquisa.

Quando se observa os cálculos analíticos mostrados na TAB. 5.1, a velocidade de ascensão chega a valores médios próximos de 2,4 m/s, podendo chegar a 2,9 m/s quando se tem uma câmara em limpeza.

TABELA 5.1  
Dados do filtro obtidos via cálculo analítico

<b>Dados do Filtro de mangas</b>		
Vazão Efetiva de Gases	600.000	am <sup>3</sup> /h
Diâmetro da Manga	130,00	mm
Comprimento	6.000	mm
Área filtrante por manga	2,45	m <sup>2</sup>
Nº de Fileiras	12,00	un
Nº de mangas por fileira	32,00	un
Nº de Compartimentos	8,00	un
Nº de Mangas	3.072	un
Área Filtrante Total	7.527,76	m <sup>2</sup>
<b>Velocidade de filtração (Relação Ar-Pano) em regime</b>		
	<b>1,33</b>	<b>m/min</b>
<b>Velocidade de filtração (Relação Ar-Pano) em limpeza</b>		
	<b>1,52</b>	<b>m/min</b>
<b>Velocidade Ascendente máxima</b>		
	<b>Mangas + Gaiolas</b>	
Distância entre centros - Direção das Flautas	180,00	mm
Dimensão Interna da Região de Filtração – Direção das Flautas	5,94	m
Distância entre centros - Direção dos Barriletes	180,00	mm
Dimensão Interna da Região de Filtração - Direção dos Barriletes	2,34	m
Área Transversal da Região de Filtração	111,20	m <sup>2</sup>
Soma das áreas dos fundos das mangas	40,78	m <sup>2</sup>
Área Transversal da Região de Filtração disponível para a subida do gás	70,42	m <sup>2</sup>
<b>Velocidade ascendente máxima em regime</b>		
	<b>2,40</b>	<b>m/s</b>
<b>Velocidade ascendente máxima em limpeza</b>		
	<b>2,90</b>	<b>m/s</b>

FONTE: dados da pesquisa.

Pela simulação encontrou-se valores na ordem de 11,19 m/s na face oposta à entrada na tremonha e valores próximos de zero nas regiões afastadas da entrada. Como para os cálculos analíticos são considerados valores médios, pode-se dizer que os valores encontrados estão coerentes.

Percebe-se também a existência de recirculação na região inferior da tremonha. Essa recirculação é bastante danosa ao sistema, pois além de recircular o pó que já está caído na tremonha, causa também perda de energia pela dissipação turbulenta.

Estudos mostram que a formação da torta nas mangas não é uniforme, assim como a queda de pressão também não. O alto valor de velocidade no interior do filtro, além de

provocar uma sobrecarga de uma parte do filtro, causam também a entrada de material particulado no interstício da manga. Esse material não é retirado pelo sistema de limpeza e causa o aumento da queda de pressão, o que leva ao desgaste prematuro das mangas filtrantes.

Nesse contexto, é importante salientar que a presença de material particulado no fluxo causa uma formação irregular da torta de filtração e conseqüentemente um perfil de queda de pressão associada a essa camada também irregular, o que pode causar um resultado diferente do encontrado na simulação.

No caso deste estudo, em que a análise é em torno da distribuição uniforme do escoamento assim como das velocidades e perdas de cargas associadas, os valores encontrados são bastante coerentes.

### 5.5 Distribuição da pressão

Pela FIG. 5.12 observa-se um valor de pressão máximo de 205,81 PA (20,9 mmCA), pois não está sendo considerada a queda de pressão imposta pelo elemento filtrante, nem da torta formada na camada externa deste elemento filtrante.

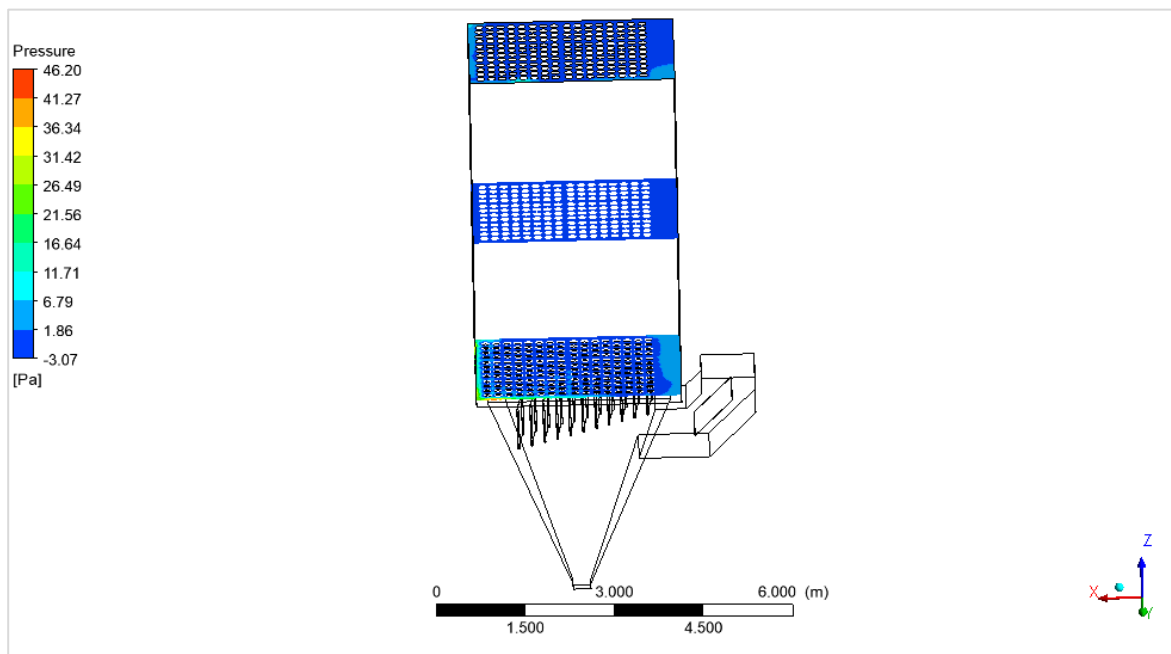


FIGURA 5.12 – Perfil de pressão na câmara de ar sujo  
 FONTE: dados da pesquisa.

Devido às condições de contorno e hipóteses simplificadoras referentes às mangas

assumidas para este trabalho torna-se desnecessária a análise do perfil de perda de pressão no filtro.

As mangas estão representadas somente para efeitos didáticos

## 5.6 Conclusão após a primeira análise

Após a avaliação dos dados analíticos e daqueles obtidos via simulação numérica, percebeu-se que somente a alteração do quadro de defletores não traria o efeito desejado, visto que com os altos valores de velocidades internas, conforme encontrado, o escoamento está sendo quase 100% direcionado para a parte posterior à entrada da tremonha e distribuindo somente para as mangas que se encontram nesta região, com altas velocidades e causando o desgaste prematuro dos elementos filtrantes.

Foi realizado um estudo com o auxílio de otimização variando alguns parâmetros do quadro de defletores, ângulos, comprimento da aba e número de defletores no quadro. Porém, não foi possível uniformizar o campo de pressão e vazão.

Para reduzir a velocidade, foram listadas algumas possibilidades.

- Aumentar a área da tremonha: neste caso, não há espaço disponível.
- Reduzir o número de mangas (neste caso, não reduziria a velocidade na tremonha e sim entre as mangas, fazendo com que desgaste seja minimizado). Porém, após uma análise prévia, esta também não se mostrou uma boa alternativa, visto que o valor da velocidade de filtração já está bastante alto e qualquer redução de área filtrante traria mais problemas do que benefícios.
- Outra oportunidade possível é a redução da vazão do sistema. Este equipamento é instalado com um hidrováriador que permite variar a rotação do exaustor de 45 a 97% da rotação fornecida pelo motor, e assim reduzir a vazão de entrada no filtro de mangas. Essa alternativa deverá ser bem analisada, pois qualquer alteração na rotação irá causar a redução da vazão do sistema de forma linear e da pressão ao quadrado, o que pode trazer algumas complicações como redução da velocidade nos dutos e acúmulo de material particulado e principalmente emissão de material particulado nas fontes geradoras.
- Aumentar o número de câmaras filtrantes: esta é a melhor alternativa, visto que, de acordo com cálculos analíticos, o acréscimo de mais quatro câmaras, ou seja, aumentar a área de filtração em 50% é o suficiente para levar todos os parâmetros do filtro a valores aceitáveis, e assim obter a maior eficiência na captação e

filtragem, porém também é a alternativa mais dispendiosa.

Com restrições físicas de layout e dimensionais por parte do filtro para grandes intervenções no mesmo, decidiu-se por analisar as seguintes alternativas:

- alterações dimensionais no quadro de defletores, aumento da área de entrada na tremonha e instalação de uma defletora antes da entrada da tremonha;
- redução da vazão em torno de 15%, junto com os melhores resultados encontrados na primeira alternativa.

Estas alternativas serão detalhadas no próximo item.

## 5.7 Alternativas

### 5.7.1 Alternativa 1

Nesta alternativa serão realizadas as alterações no plenum de entrada da tremonha no quadro de defletores, conforme pode ser visto na FIG. 5.13.

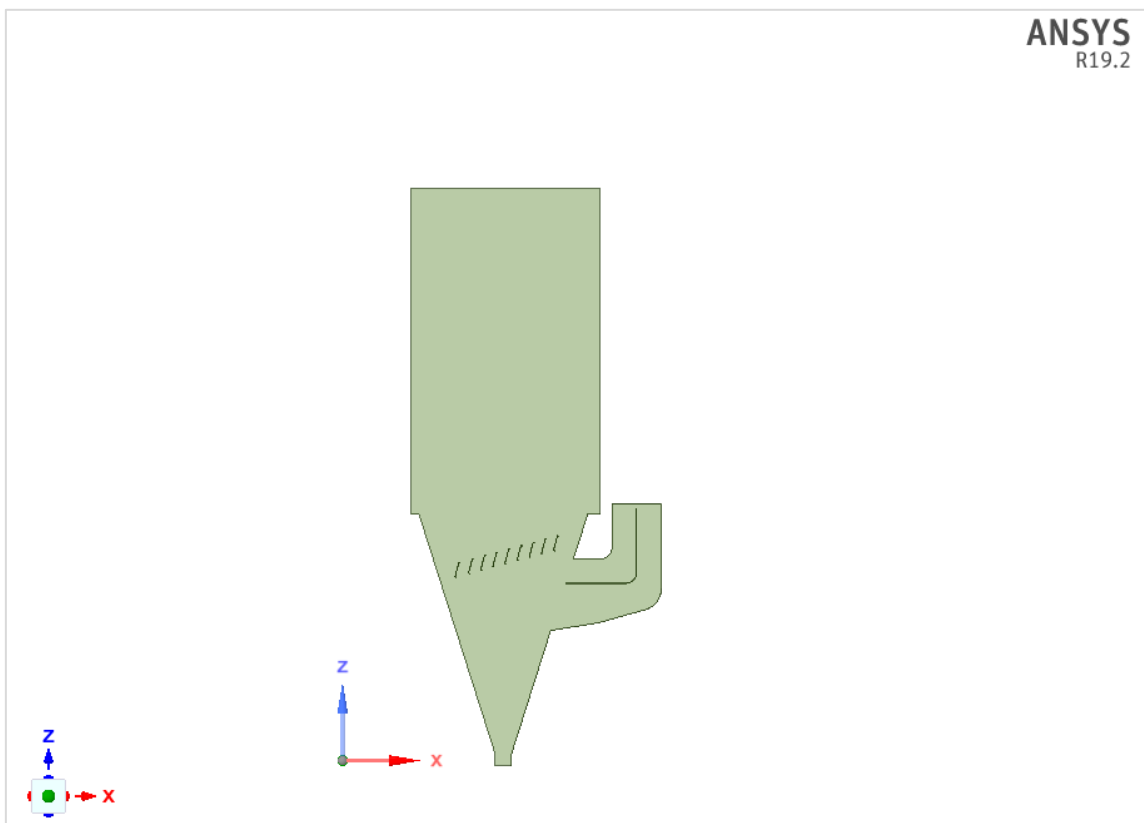


FIGURA 5.13 – Geometria alterada  
FONTE: dados da pesquisa.

Alterou-se o ângulo de entrada da parte inferior do plenum e acrescentou-se uma defletora na curva do plenum. O número de defletores foi diminuído e o ângulo passou de 15° para 20°, conforme mostra a FIG. 5.14. Isso se fez necessário devido aos altos valores de velocidade na curva do plenum antes de entrar na tremonha.

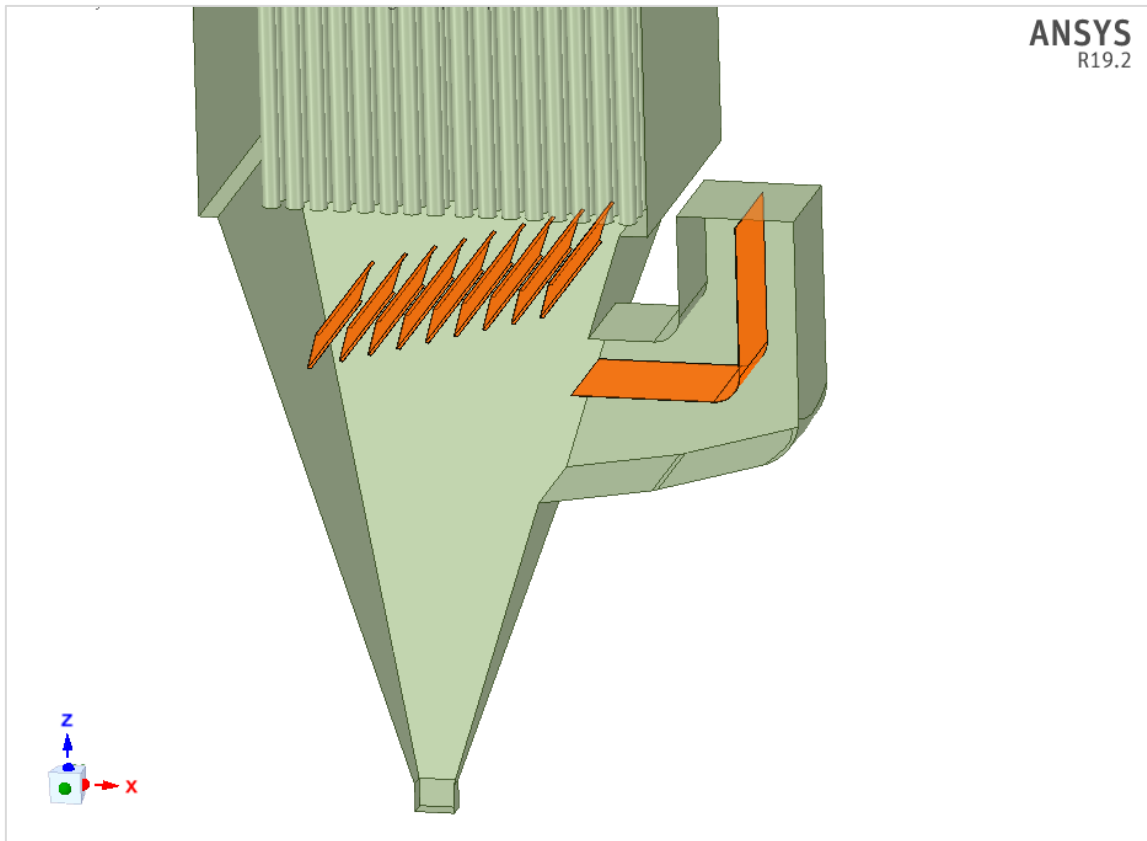


FIGURA 5.14 – Defletores da tremonha e defletor da entrada  
FONTE: dados da pesquisa.

Com essa alteração percebeu-se uma melhor distribuição dos campos de velocidade e pressão em toda a região do filtro.

A melhor distribuição do escoamento, tanto dentro da tremonha como na câmara de ar sujo, faz com que cada manga receba uma parcela igual ou próxima de vazão, o que evita a saturação de determinadas mangas, enquanto as outras continuam em estado próximo ao estado de novo, aumentando consideravelmente a vida útil.

Na FIG. 5.15 e 5.16 observa-se que houve uma melhora significativa na uniformização do fluxo na entrada da tremonha.



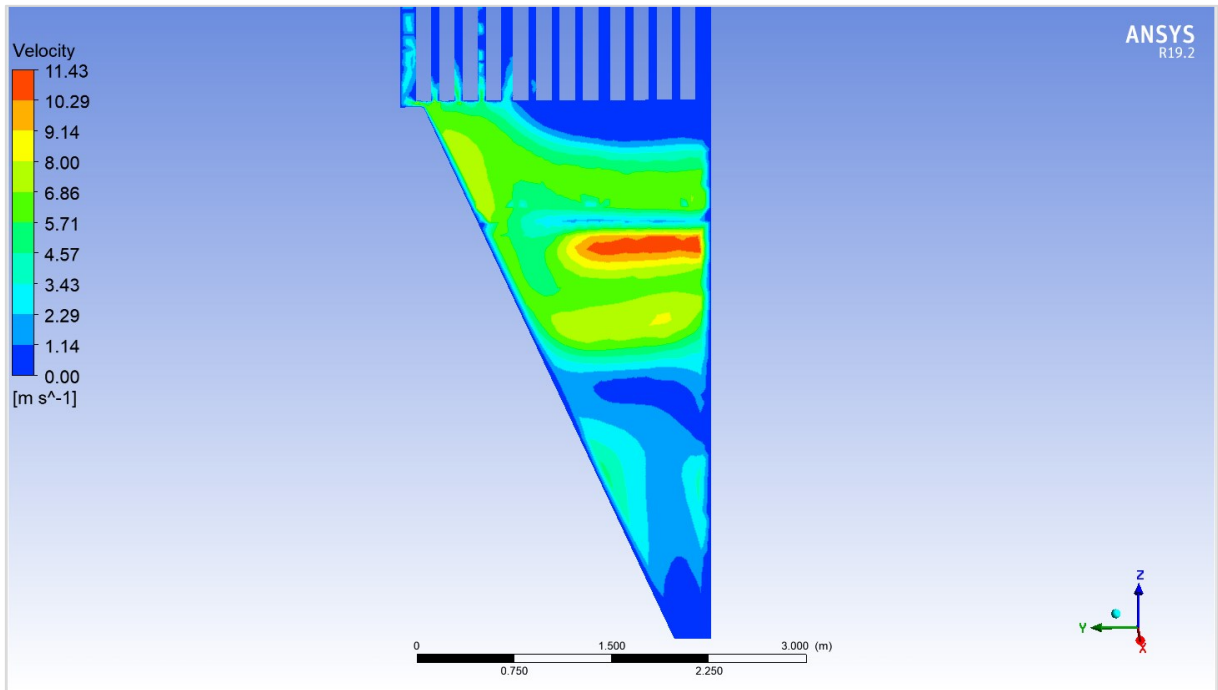


FIGURA 5.15 – Perfil de velocidade no plano de simetria  
 FONTE: dados da pesquisa.

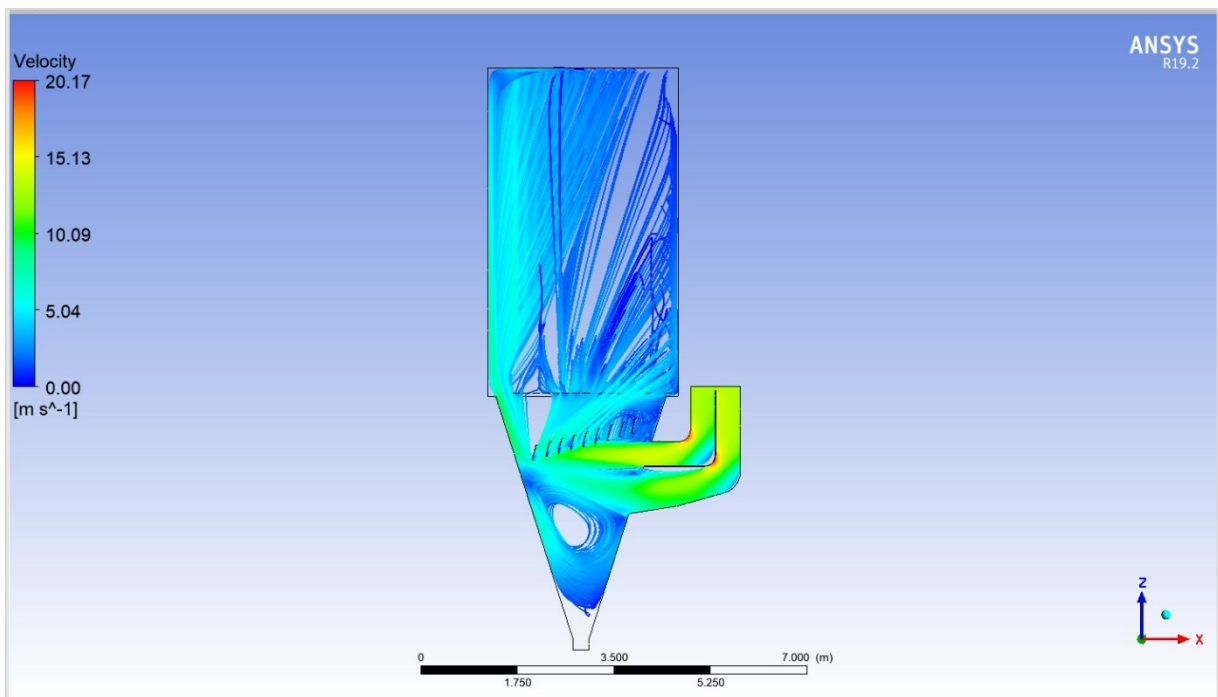


FIGURA 5.16 – Linhas de corrente mostrando o escoamento  
 FONTE: dados da pesquisa.

Pela análise das linhas de corrente, na FIG. 5.16, percebe-se que houve uniformização do escoamento e conseqüente redução da velocidade na face oposta à entrada, chegando a valores bem abaixo dos anteriores e próximos aos valores recomendados em

literatura. Esta redução da velocidade de choque na tremonha fará com que se reduza também o desgaste por atrito nessa área.

Na FIG. 5.16 observa-se uma redução significativa da velocidade na face oposta à entrada da tremonha. A redução foi de aproximadamente 100%.

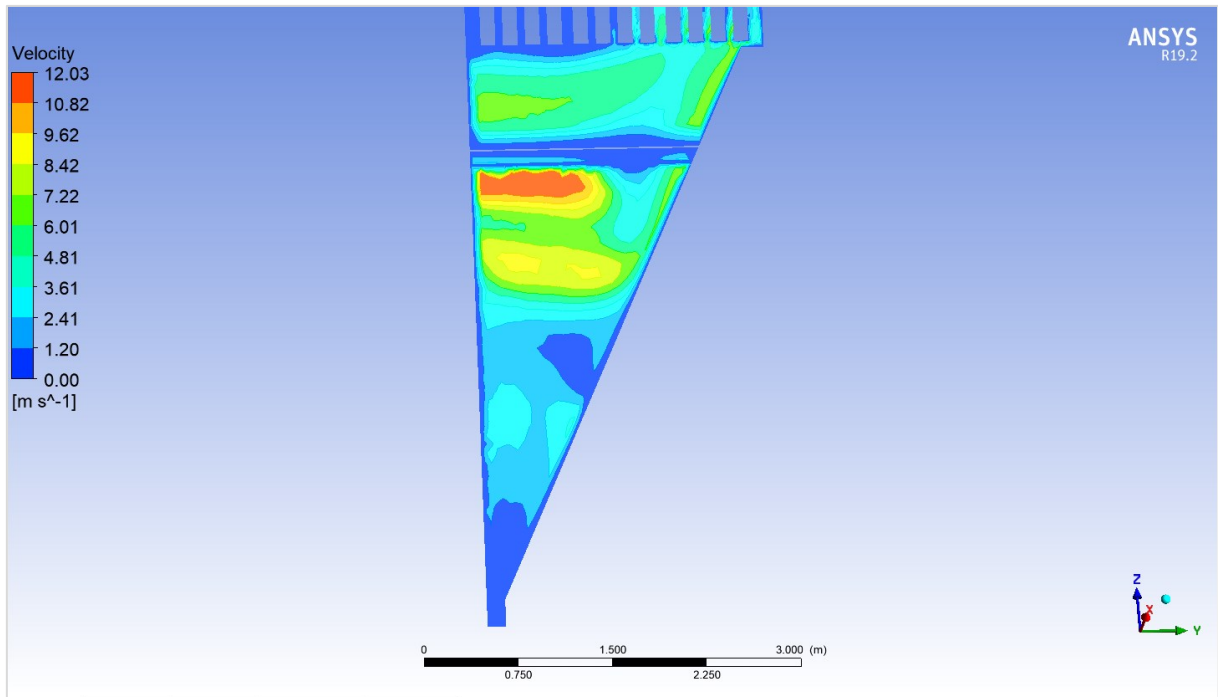


FIGURA 5.17 – Perfil de velocidade no plano oposto à entrada  
FONTE: dados da pesquisa.

Pode-se observar ainda que se manteve a recirculação no interior da tremonha, porém, em menor escala.

No caso das velocidades entre as mangas também houve uma redução significativa dos valores da velocidade ascendente, o que significa menos choque entre as mangas, uma formação da torna mais uniforme, um perfil de perda de pressão mais uniforme, além do aumento da vida útil das mangas. Nas FIG. 5.18 são mostrados os valores de velocidade em três planos distintos.

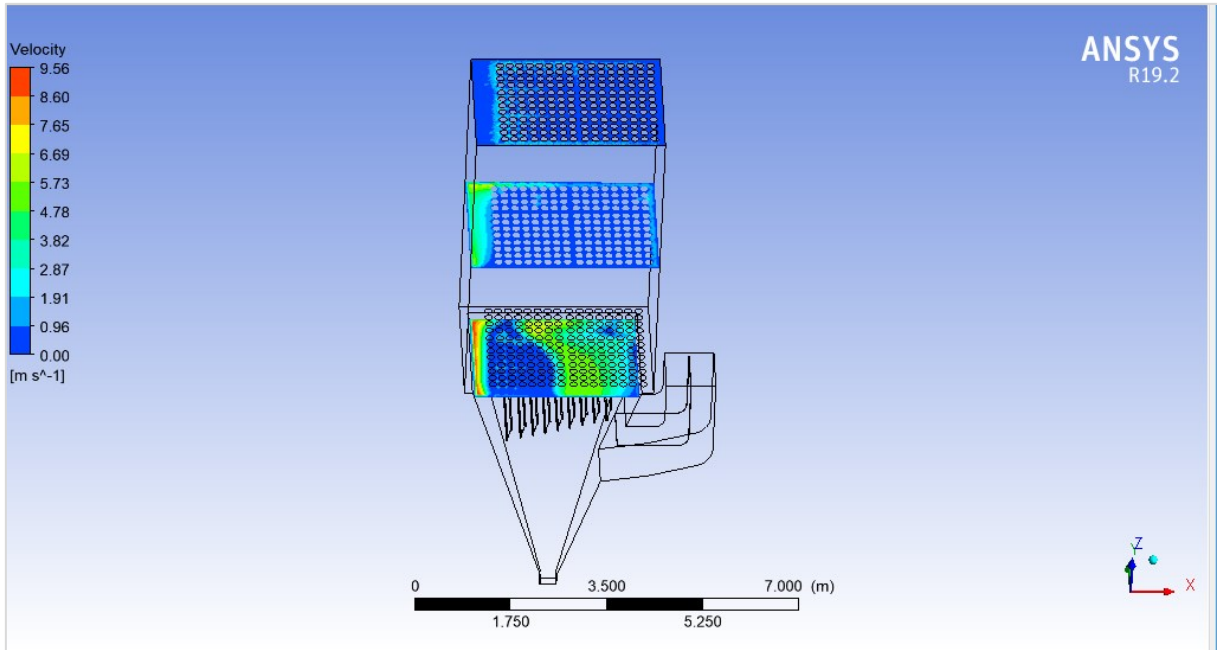


FIGURA 5.18 – Perfil de velocidade nos planos inserido dentro da câmara de ar sujo  
 FONTE: dados da pesquisa.

### 5.7.2 Alternativa 2

Nesta segunda análise, além das alterações já realizadas na alternativa 1, será realizada uma análise do impacto da redução em 15% da vazão do sistema.

A velocidade inserida como condição de contorno na entrada foi de 10.9 [m/s]. As demais condições de contorno foram mantidas.

Analisando a FIG. 5.19, observa-se que houve uma redução significativa nas velocidades no interior do filtro de mangas. A velocidade de entrada, que estava próxima de 20 m/s, está próxima dos valores recomendados.

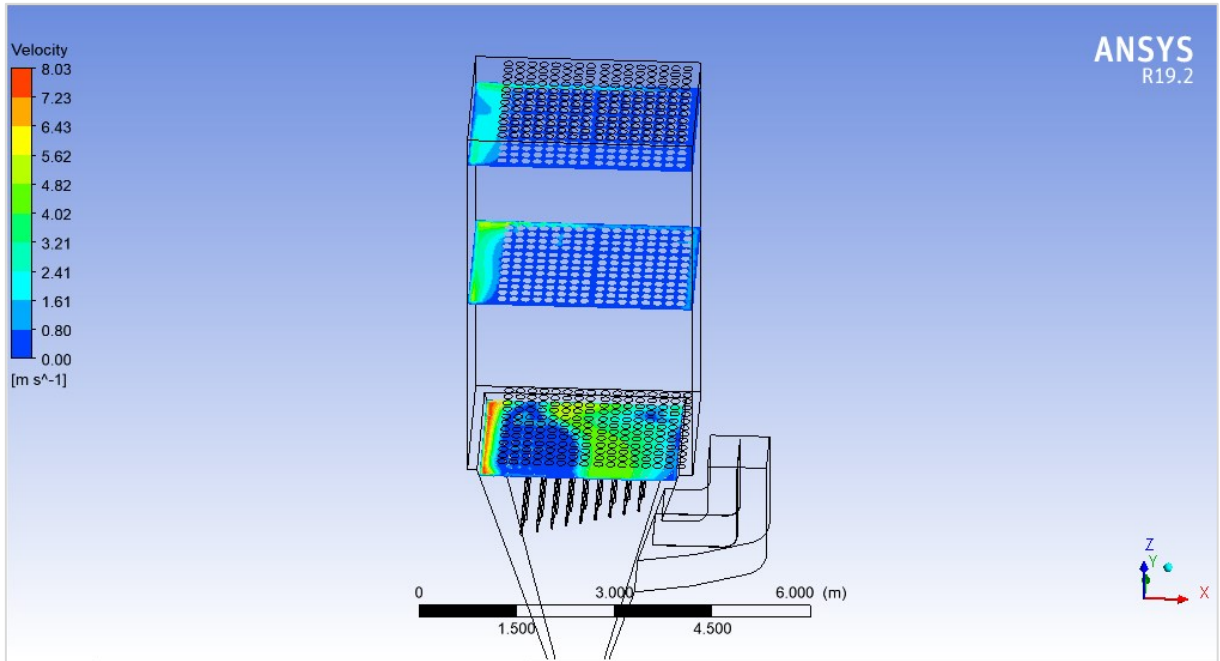


FIGURA 5.19 – Perfil de velocidade com a vazão reduzida  
 FONTE: dados da pesquisa.

Na FIG: 5.20 observa-se a velocidade na entrada da tremonha. Os valores ficaram próximos do recomendado, que é de aproximadamente 7 m/s.

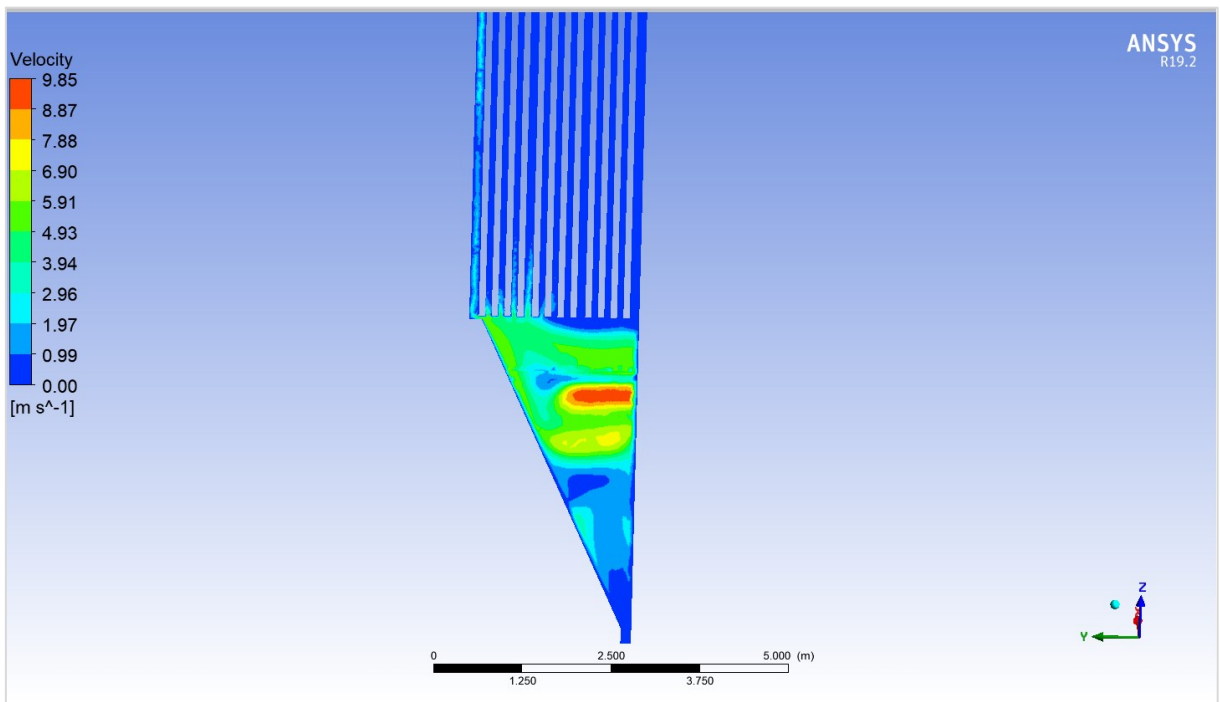


FIGURA 5.20 – Perfil de velocidade face de entrada da tremonha  
 FONTE: dados da pesquisa.

Nas FIGS. 5.21 pode-se observar a redução da velocidade na face oposta à entrada.

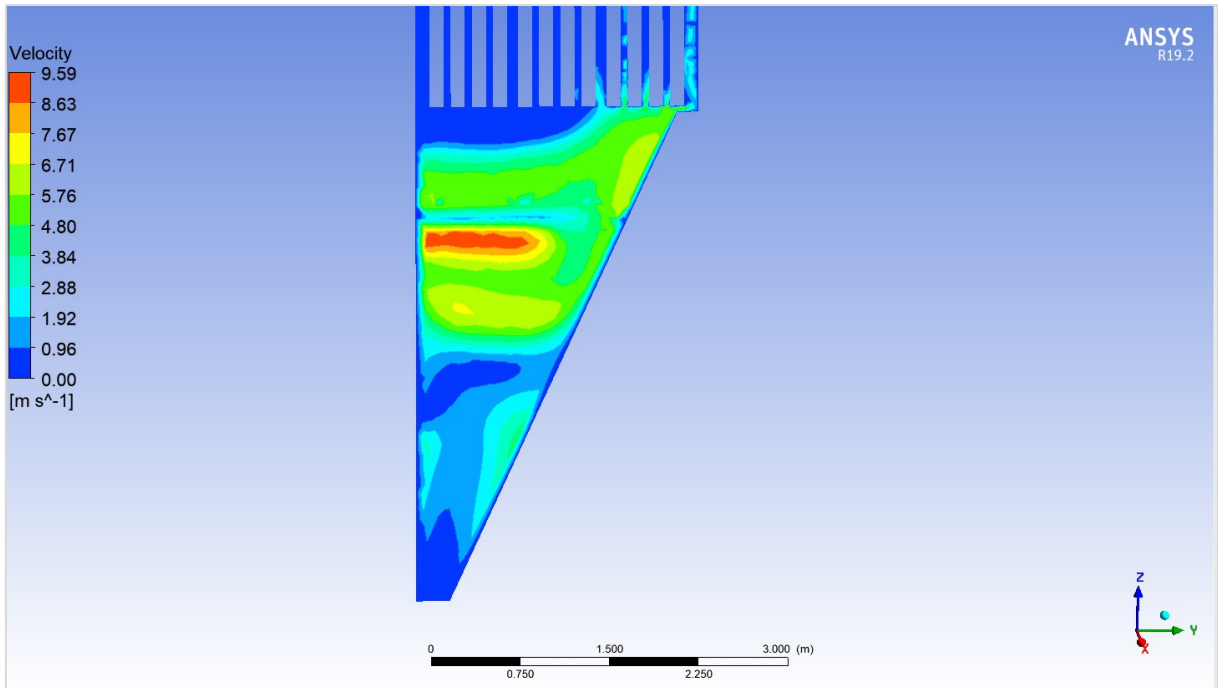


FIGURA 5.21 – Perfil de velocidade na face oposta à entrada do escoamento  
FONTE: dados da pesquisa.

Percebe-se que houve uma melhora significativa na distribuição do perfil de velocidade e também na redução dos valores.

## 6 CONCLUSÃO

Utilizou-se a técnica de CFD para investigar como reduzir as consequências geradas pela distribuição não uniforme do escoamento dentro do filtro de mangas, e assim achar a melhor solução com menor tempo e custo.

Realizou-se uma simulação do modelo do filtro de mangas conforme projeto original e as suspeitas foram confirmadas: alta velocidade de entrada dos gases na tremonha, velocidade de ascensão muito alta e distribuição do escoamento não uniforme, causando sobrecarga no lado posterior à entrada na tremonha e perfil de velocidade e pressão não uniforme.

Foram realizados vários testes alterando as dimensões do quadro de defletores existentes com o intuito de melhorar o escoamento no interior do filtro, ou seja, com uma menor queda de pressão, buscar o melhor campo de velocidade, principalmente na região imediatamente antes do início das mangas.

Percebeu-se que neste caso, devido à alta velocidade de entrada do escoamento na tremonha, as alterações no quadro de defletores não estavam causando efeitos significativos. Havia, sim, uma melhora na distribuição dos gases, porém não o suficiente para solucionar o problema. Então, através da análise CFD foram realizadas algumas simulações e chegou-se à conclusão de que é necessário aumentar o ângulo, assim como a área com que o escoamento entra na tremonha, além de também alterar o ângulo do quadro de defletores.

Após uma análise das alternativas, chegou-se à conclusão de que a alternativa que representa um ganho significativo no campo de velocidade está representada na FIG. 5.13.

Houve uma redução de aproximadamente 45% nos principais parâmetros que foram monitorados, e nos demais encontrou-se uma redução média de 30%.

Esta alteração não provocou uma alteração significativa na recirculação do escoamento na região de deposição de material particulado na tremonha, o que pode gerar a ressuspensão do pó.

Esta se apresentou como a melhor alternativa devido aos ganhos na uniformização dos campos de pressão e velocidade na entrada da tremonha e na região imediatamente abaixo das mangas, região onde é caracterizada a velocidade de ascensão dos gases.

Durante o projeto de um filtro de mangas, assume-se as médias das variáveis calculadas e que estas são constantes nas seções, porém, na prática, não é o que se observa. Essa foi uma importante conclusão após análise de dados coletados e obtidos via CFD.

## 6.1 Sugestão para os próximos trabalhos

- Realizar novas medições após implantação da melhoria e comparar com os resultados obtidos via simulação.
- Modelar e simular o filtro completo com as oito câmaras para confirmar a hipótese de distribuição uniforme nas tremonhas.
- Incluir no modelo as mangas como domínio poroso para análise da velocidade de filtração, e queda de pressão em todas mangas e no filtro
- Incluir no escoamento o material particulado e analisar seu efeito no escoamento
- Realizar um estudo CFD do sistema de limpeza das mangas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APOIO PROJETOS ENG<sup>a</sup>. **Filtro de mangas**. (s.d.). Disponível em: <http://www.apoioprojetos.com.br/filtro-de-mangas.html>. Acesso em: 27 jan. 2019.
2. BRASIL. Resolução nº 3, de 28 de junho de 1990. **Resolução**. Brasília: DOU, 22 ago. 1990. Seção 1, p. 15937-15939.
3. BRASIL. Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006. **Resolução**. Brasília: DOU, 2 jan. 2007. Seção 1, p. 131-137.
4. BRASIL. Resolução nº 436, de 22 de dezembro de 2011. **Resolução**. Brasília: DOU, 26 dez. 2011. Seção 1, p. 304-311.
5. COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. **Air Pollution Control: A PROJETO Approach**. 4. ed. Waveland Press: 2011.
6. DAMIAN, R. B. et al. Desenvolvimento de um sistema de filtragem compacto para usinas de asfalto. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING – ENCIT 2004, 10., 2004, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Braz. Soc. Of Mechanical Sciences And Engineering -- Abcm, 2004.
7. DEWAN, M. et al. MARPOL Annex VI CHAPTER 1-3: Air pollution and GHG emissions from International Shipping. **Marine Study**, August 2016. Disponível em: <http://marinestudy.net/marpol-annex-vi-chapter-1-3-air-pollution-and-ghg-emissions-from-international-shipping/>
8. EMISSÃO ZERO. **Relatório técnico** [código: 11072012/2012]. 2012.
9. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US-EPA). **Lesson 1 - Electrostatic Precipitator Operation**. 1998.
10. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US-EPA). **Particulate Matter (PM)**. 2013. Disponível em: <http://www.epa.gov/airquality/particlepollution/index.html>. Acesso em: 13 setembro. 2018.
11. FLOWENG. **Equipamentos**. S.d. Disponível em: <https://www.floweng.com.br/>. Acesso em: 27 jan. 2019.
12. FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998. 5. ed. 504 p.
13. HIDRONICS PROJETOS E EQUIPAMENTOS LTDA. **Filtro de mangas automático tipo “Pulsetron”**. S.d. Disponível em: <http://www.hydrionics.com.br/funcionamento-filtro-mangas-pulsetron.html>. Acesso em: 27 jan. 2019.



14. INSTITUTO ESSS DE EDUCAÇÃO, PESQUISA E DESENVOLVIMENTO (IESSS). **Introdução à dinâmica dos fluidos computacional: dos fundamentos às aplicações industriais**. S.l.: iESSS, 2018. 52 p. [Apostila].
15. MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
16. NIELSEN, N. F.; SKRIVER, K. G.; CASTAÑO, L. J. Fabric Filter Optimization using Computational Fluid Dynamics. In: ICESP, 2011, Nuernberg. **Proceedings...** Nuernberg: Icesp, 2011.
17. NIELSEN, P. V. Fifty years of CFD for room air distribution. **Building And Environment**, v. 91, p. 78-90, set. 2015.
18. OBER. **Mangas filtrantes**. S.d. Disponível em: [http://www.ober.com.br/elementos\\_filtrantes/mangas-filtrantes.html](http://www.ober.com.br/elementos_filtrantes/mangas-filtrantes.html). Acesso em: 27 jan. 2019.
19. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: Global update 2005**. OMS, 2006. (Summary of risk assessment).
20. PDL SISTEMAS. **Filtro de Mangas Pulse Jet: Princípios gerais, aparatos e cuidados de operação**. S.d. Disponível em: [http://pdl.com.br/clientes/PDLSD/4-TR-EQ-0002-0-%20Apresentacao%20Filtro%20Manga%20\(FM\)%20-%20Padrao%20PDL.pdf](http://pdl.com.br/clientes/PDLSD/4-TR-EQ-0002-0-%20Apresentacao%20Filtro%20Manga%20(FM)%20-%20Padrao%20PDL.pdf). Acesso em: 27 jan. 2019.
21. QUÍMICA.COM.BR. **Filtros de manga: como obter o rendimento máximo dos filtros de manga**. 14 ago. 2002. Disponível em: <https://www.quimica.com.br/filtros-de-manga-como-obter-o-rendimento-maximo-dos-filtros-de-manga/>. Acesso em: 27 jan. 2019.
22. ROCHA, S. M. S. **Estudo da influência da velocidade e dos ciclos de filtração na formação da torta na limpeza de gases em filtros de mangas**. 2010. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.
23. RODRIGUES, K. B. **Filtração de Gases: Estudo da deposição de diferentes tortas de filtração em diferentes meios filtrantes**. 2006. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.
24. SCHROOTEN, T. et al. **Industrial dedusting with bag filters**. CHEM EUROPE.COM. s.d. Disponível em: <http://www.chemeurope.com/en/whitepapers/126300/industrial-dedusting-with-bag-filters.html>. Acesso em: 27 jan. 2019.
25. SOLAFT. **Marketing Leading Filtration Solutions**. S.d. Disponível em: <http://www.solafit.com.br/>. Acesso em: 27 jan. 2019.

26. SOUTHERN ENVIRONMENTAL; FL SMIDTH. **Fabric Filter Systems for the North American utility industry**. (s.d.). Disponível em: <https://www.southernenvironmental.com/assets/sei-and-fls-fabric-filter-booklet.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2019.
27. THEODORE, L. **Air pollution equipment control calculations**. Wiley, 2008.
28. TOGNETTI, E. R. **Influência das condições operacionais na formação e remoção de tortas de filtração de gases**. 2007. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.
29. VALLERO, D. **Fundamentals of Air Pollution Control**. 4. ed. S.l: Elsevier, 2008.
30. VERTEEG, H. K; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. 2. ed. Essex: Pearson Prentice Hall, 2007.
31. WANG, L. K.; PEREIRA, N. C.; HUNG, Y.-T. (Eds.). **Air Pollution Control Engineering**. New Jersey: Human Press, 2004. 504 p. (Handbook of Environmental Engineering, v. 1).
32. WINSTON GOMES. Disponível em: <http://www.winstongomes.com.br/wp-content/uploads/29.jpg>. Acesso em: 27 jan. 2019.
33. WHITE, Frank M. **Fluid mechanics**. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1998.
34. WHITEHEAD CONSTRUCTION, Inc. **An Overview of Baghouse Fabric Filters**. S.d. Disponível em: <https://www.precip.com/baghouses.html>. Acesso em: 27 jan. 2019.

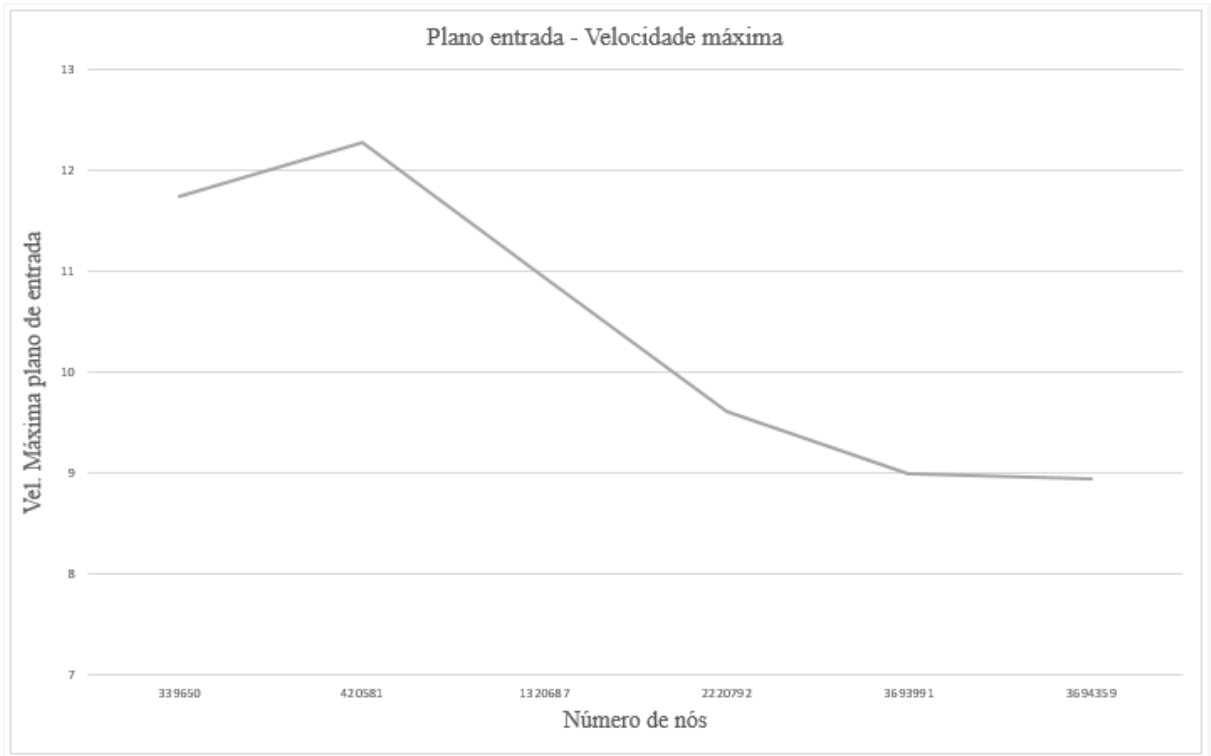
## ANEXO A

Relatório de medição do filtro de mangas.

PLANILHA DE CAMPO- DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADE E VAZÃO CHAMINÉ CIRCULAR							Nº OS	1	
CLIENTE									
PROCESSO:	Filtro de Mangas					MEDIÇÃO Nº	02		
SITUAÇÃO:	100% rotação do exaustor								
DATA:	03/10/2018	HORÁRIO:	13:05	Ø Chaminé (m):	3,5	Flange (cm)	10		
Nº de Pontos:	24	Cód. Pitot	AQTU 002	Fc Pitot's:	0,8458	P Atm (mmHg)	670		
Umidade do Gás (Aproximada):									
PONTO	DIST. om	$\Delta P$	$\sqrt{\Delta P}$	PE	TC	$\Delta P$	$\sqrt{\Delta P}$	PE	TC
		mmH <sub>2</sub> O	(mmH <sub>2</sub> O) <sup>0,5</sup>	mmH <sub>2</sub> O	°C	mmH <sub>2</sub> O	(mmH <sub>2</sub> O) <sup>0,5</sup>	mmH <sub>2</sub> O	°C
1º EIXO				2º EIXO					
1	7,4	13,5	3,67	-104,0	36,0	12,0	3,46	-108,0	37,0
2	23,5	15,0	3,87	-106,0	36,0	12,5	3,54	-108,0	37,0
3	41,3	15,5	3,94	-106,0	35,0	15,0	3,87	-108,0	38,0
4	62,0	15,5	3,94	-104,0	35,0	16,5	4,06	-118,0	38,0
5	87,5	15,5	3,94	-102,0	35,0	16,0	4,00	-120,0	36,0
6	124,6	15,0	3,87	-104,0	35,0	18,0	4,24	-120,0	35,0
7	225,4	16,5	4,06	-116,0	36,0	17,5	4,18	-122,0	36,0
8	262,5	17,0	4,12	-114,0	38,0	17,0	4,12	-118,0	36,0
9	288,1	16,5	4,06	-114,0	38,0	19,0	4,36	-116,0	36,0
10	308,7	16,0	4,00	-112,0	37,0	17,0	4,12	-114,0	36,0
11	326,6	16,5	4,06	-116,0	38,0	16,0	4,00	-114,0	36,0
12	342,7	16,5	4,06	-114,0	39,0	16,5	4,06	-110,0	36,0
MÉDIAS		$\Delta P$	15,92	$\sqrt{\Delta P}$	4,0	PE	-112,0	TC	36,5
MASSA MOLECULAR SECA									
COMPONENTE	% BASE SECA		Mx		Mx (% BASE SECA)				
CO <sub>2</sub>	0,0		0,44		0,00				
O <sub>2</sub>	20,4		0,32		6,53				
CO	0,0		0,28		0,00				
H <sub>2</sub>	0,0		0,02		0,00				
N <sub>2</sub>	79,6		0,28		22,29				
MMx (g/mol)				28,82					
MEMORIAL DE CÁLCULO - RESULTADOS									
PARÂMETRO			SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR				
Pressão absoluta do gás na chaminé/duto			P	mmHg	661,76				
Umidade do gás			Bag	adimens.	0,00				
Massa molecular úmida			Mmu	g/mol	28,82				
Temperatura absoluta do gás na chaminé/duto			T	K	309,46				
Velocidade do gás nas condições da chaminé/duto			V	m/s	15,0134				
Área da chaminé/duto			Ac	m <sup>2</sup>	9,62				
VAZÃO NAS CONDIÇÕES DA CHAMINÉ - DUTO			Q	m <sup>3</sup>	520.005,11				
VAZÃO NAS CONDIÇÕES NORMAIS - BASE SECA			Qnbs	Nm <sup>3</sup>	399.434,30				

## ANEXO B

Testes da malha.



Realizou-se o teste da malha com base numa malha inicial e 5 refinamentos, e monitorando como variável resposta a velocidade máxima no plano traçado na entrada da tremonha.

Observa-se que após o terceiro refinamento já não houve variação significativa na velocidade, logo, foi escolhida a sexta malha.