



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA
MESTRADO EM ENERGIA

FELIPE BEZERRA MARQUES

**INVESTIGAÇÃO DE DESIGN DE FILTRO MANGA ATRAVÉS DA
TÉCNICA DE CFD.**

SÃO MATEUS – ES

2017

FELIPE BEZERRA MARQUES

**INVESTIGAÇÃO DE DESIGN DE FILTRO MANGA ATRAVÉS DA
TÉCNICA DE CFD.**

Exame de defesa de dissertação apresentado ao Programa de Pós-graduação em Energia do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Energia, área de concentração em Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Orientador: Prof. Dr. Fábio de Assis Ressel Pereira

SÃO MATEUS – ES

2017

FELIPE BEZERRA MARQUES

**INVESTIGAÇÃO DE DESIGN DE FILTRO MANGA ATRAVÉS DA
TÉCNICA DE CFD.**

Exame de defesa de dissertação apresentado ao Programa de Pós-graduação em Energia do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito para obtenção do Título de Mestre em Energia, área de concentração em Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Aprovado em _____ de _____ de 2017.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Fábio de Assis Ressel Pereira
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof^ª. Dr^a Sandra Mara Santana Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Rafael Sartim
Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

As técnicas de CFD foram aplicadas para o estudo de projeto de Filtro de Mangas. O intuito de utilizar essa ferramenta é devido ao seu baixo custo, em relação a testes experimentais, confiabilidade e tempo de respostas. Portanto, foi realizado um estudo para determinação da influência do *design* de entrada de ar, variação de velocidade de entrada e supressão de mangas para fazer uma análise de como essas variáveis influenciam na fluidodinâmica do filtro. Para avaliar o desempenho dos filtros de mangas foram simuladas três diferentes posições de alimentação, feita a variação da velocidade de entrada para avaliação do maior aproveitamento da área filtrante do meio e alteração na disposição das mangas do meio filtrante. Para tanto, utilizou-se o modelo de escoamento monofásico isotérmico e incompressível com a turbulência sendo tratada pelo modelo k- ϵ realizável. Pôde-se concluir que a alimentação Simples apresentou uma distribuição mais homogênea de velocidade, pressão e com um bom aproveitamento do meio filtrante, representando assim uma opção mais vantajosa de entrada quando comparada as demais propostas. No caso de supressão de mangas, a entrada Simples com configuração Alternada apresentou melhor desempenho, com uma redução de 43,9% da área originalmente proposta, proporcionando melhor aproveitamento do filtro, com menores velocidades de impactos e queda de pressão, e distribuição mais homogênea da velocidade no meio.

Palavras-Chave: Filtro Manga, Filtração de Gás, CFD, Supressão.

Abstract

The CFD techniques were applied to the design study of the Bag Filter. The goal of using this tool is due to its low cost, in relation to experimental tests, reliability and response time. Therefore, a study was carried out to determine the influence of the air inlet design, input velocity variation and bag suppression to make an analysis of how these variables influence the fluid dynamics of the filter. In order to evaluate the performance of the bag filters, three different feeding positions were simulated, with the variation of the inlet velocity to evaluate the greater utilization of the medium filter area and the change in the disposition of the filter media. In order to do so, we used the single-phase isothermal and incompressible flow model with the turbulence being treated by the realizable k- ϵ model. It could be concluded that the Single feed presented a more homogeneous distribution of velocity, pressure and with a good use of the filter media, thus representing a more advantageous option of entry when comparing the other proposals. In the case of sleeve suppression, the Simple Alternate configuration presented better performance, with a 43.9% reduction in the area originally proposed, providing better filter utilization, with lower impaction velocities and pressure drop, and distribution More homogeneous velocity in the middle.

Keywords: Fabric Filter, Gas Filtration, CFD, Suppression.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Estrutura de um Filtro Manga.	6
Figura 2.2 – Formação da torta de filtração.	7
Figura 2.3 - Queda de pressão e ciclos de limpeza de um filtro de manga.	10
Figura 2.4 - a) Comportamento do modelo RANS. b) Comportamento do modelo URANS.	21
Figura 3.1 – Filtro manga industrial utilizado como base.	24
Figura 3.2 – Domínio e subdomínio utilizados.	25
Figura 3.3 - Teste de malha para a velocidade.	25
Figura 3.4 – Domínio com diferentes entradas.	26
Figura 3.5 – Diferentes <i>designs</i>	27
Figura 4.1 – Entradas a) Convencional e b) Tripla Concêntrica c) Simples.	31
Figura 4.2 – escoamento no equipamento. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s.	33
Figura 4.3 – Perfil velocidade de um plano no centro do equipamento, perpendicular à entrada. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s.	34
Figura 4.4 – Curvas contorno da velocidade local nas mangas. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s.	35
Figura 4.5 – escoamento no equipamento. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s.	38
Figura 4.6 – Perfil velocidade de um plano no centro do equipamento, perpendicular as entradas. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s.	39

Figura 4.7 – Curvas contorno da velocidade local nas mangas. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s.....	40
Figura 4.8 – Escoamento no equipamento. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s.	42
Figura 4.9 – Perfil velocidade de um plano no centro do equipamento, perpendicular à entrada. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s..	43
Figura 4.10 – Curvas contorno da velocidade local nas mangas. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s.	44
Figura 4.11 – Diferentes configurações de distribuição das mangas, onde a letra E significa o local da entrada do escoamento. A) Original B) Central C) Frontal D) Alternada E) Mista. ..	48
Figura 4.12 – Fluidodinâmica no equipamento para a entrada Convencional. A) Entrada Original B) Entrada Mista C) Entrada Frontal D) Entrada Central E) Entrada Alternada.....	50
Figura 4.13 – Distribuição da velocidade nas mangas para as diferentes configurações na Entrada Convencional. A) Original B) Mistra C) Frontal D) Central E) Alternada.	51
Figura 4.14 – Fluidodinâmica no equipamento para a entrada Tripla. A) Entrada Original B) Entrada Mista C) Entrada Frontal D) Entrada Central E) Entrada Alternada	53
Figura 4.15 – Distribuição da velocidade nas mangas para as diferentes configurações na Entrada Tripla Concêntrica. A) Original B) Mistra C) Frontal D) Central E) Alternada.....	54
Figura 4.16 – Fluidodinâmica no equipamento da entrada Simples. A) Entrada Original B) Entrada Mista C) Entrada Frontal D) Entrada Central E) Entrada Alternada	56
Figura 4.17 – Distribuição da velocidade nas mangas para as diferentes configurações na Entrada Simples. A) Original B) Mistra C) Frontal D) Central E) Alternada.....	57

Lista de Quadros

Quadro 3.1 – Configurações de modelagem utilizada para obtenção dos resultados:	28
---	----

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Razões Ar-Pano para diferentes origens de partículas.....	8
Tabela 4.1 – Razões ar-pano para os diferentes casos.....	32
Tabela 4.2 – Valores das variáveis para os diferentes caso de velocidade na Entrada Convencional.....	36
Tabela 4.3 – Valores das variáveis para os diferentes casos de velocidade na Entrada Tripla Concêntrica.....	41
Tabela 4.4 – Valores das variáveis para os diferentes caso de velocidade na Entrada Simples.	45
Tabela 4.5 – Área não utilizado do meio filtrante.	46
Tabela 4.6 – Velocidade máxima no meio filtrante para as diferentes entradas.	46
Tabela 4.7 – Queda de pressão para as diferentes entradas.....	47
Tabela 4.8 – Razões ar-pano para as diferentes configurações.	49
Tabela 4.9 – Valores das variáveis para as diferentes configurações na Entrada Convencional.	52
Tabela 4.10 – Valores das variáveis para os diferentes caso de supressão de vendas na Entrada Tripla.	55
Tabela 4.11 – Valores das variáveis para os diferentes caso de supressão de vendas na Entrada Simples.	58
Tabela 4.12 – Área não utilizado do meio filtrante paras as diferentes configurações	59
Tabela 4.13 – Velocidade máxima no meio filtrante para as diferentes configurações.	59
Tabela 4.14 – Queda de pressão para as diferentes configurações.....	60

Lista de Siglas e Símbolos

g	Aceleração da gravidade, [m/s ²]
$\bar{\tau}$	Tensor de stress, [-]
I	Unidade do tenso, [-]
\vec{F}	Força externas ao corpo, [N]
u	Velocidade do fluido na direção x, [m/s]
t	Tempo de escoamento, [s]
k	Energia Cinética Turbulenta, [m ² /s ²]
G_b	Taxa de geração de energia cinética turbulenta devido a flutuabilidade, [m ² /s ³]
G_k	Taxa de geração de energia cinética turbulenta devido a média do gradiente de velocidade, [m ² /s ³]
n_{fj}	Vetor unitário normal a face f, [-]
A_f	Área da face f, [m ²]
\forall	Volume da célula, [m ³]
J	Coeficiente matriz função da geometria, [-]

Símbolos Gregos

$\nabla \vec{u}$	Gradiente de velocidade, [m/s]
∇p	Gradiente de pressão estática, [Pa]
μ	Viscosidade molecular, [Pa.s]
μ_t	Viscosidade turbulenta, [Pa.s]
ρ	Densidade, [Kg/m ³]
δ_{ij}	Deltra de Kroecker, [-]
ε	Taxa de dissipação da energia cinética, [m ² /s ³]
σ_k	Número de Prandtl turbulento para equação k, [-]
σ_ε	Número de Prandtl turbulento para equação ε , [-]
Γ_ϕ	Coeficiente de difusão da variável de interesse, [-]
ϕ	Variável de interesse nas equações de conservação, [-]
ϕ_f	Valor da variável ϕ convectada através da face, [-]
ϕ_{up}	Valor de ϕ no esquema <i>upwind</i> primeira ordem, [-]
ϕ_{C_0}	Valor de ϕ no centro da célula do volume de controle, [-]
$\nabla \phi_f$	Gradiente de ϕ na face f, [-]
Δr_i	Distância entre dois centros de volume de controle, [m]

Nomenclatura

CFD - *Computational Fluid Dynamics*

RANS - *Reynolds Averaged Navier-Stokes*

SIMPLE - *Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations*

Sumário

Resumo	I
Abstract.....	II
Lista de Figuras	III
Lista de Quadros.....	V
Lista de Tabelas	V
Lista de Siglas e Símbolos.....	VI
INTRODUÇÃO e OBJETIVO	2
1.1 Contextualização	2
1.2 Objetivo.....	3
1.2.1 Objetivo Geral.....	3
1.2.2 Objetivo Específicos	4
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Filtro Manga.....	5
2.1.1 Princípios Operacionais	7
2.1.2 Velocidade.....	8
2.1.3 Queda De Pressão	9
2.1.4 Design de Entrada do Fluído.....	13
2.2 Outros Critérios de Dimensionamento.....	14
2.2.1 Propriedades da Partícula.....	14
2.2.2 Tecido Filtrante	14
2.2.3 Características da Corrente de Gás	16
2.2.4 Espaçamento das Mangas	17
2.3 CFD Como Ferramenta Para Projetos.....	17
2.3.1 Modelos Utilizados	19
2.3.2 Modelagem Do Meio Poroso	22

2.3.3 Algoritmo	23
METODOLOGIA.....	Erro! Indicador não definido.
3.1 Construção e discretização da geometria:	24
3.2 Entradas	26
3.3 Modelagem	27
3.3.1 Modelagem Do Escoamento	27
3.4 Pós-Processamento.....	29
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4.1 - Entrada Convencional.....	32
4.2 – Entrada Tripla Concêntrica	38
4.3 – Entrada Simples	42
4.4 - Análise Comparativa das Entradas	45
4.5 - Supressão de Mangas.....	48
4.5.1 – Entrada Convencional	50
4.5.2 – Entrada Tripla Concêntrica	53
4.5.3 – Entrada Simples	56
4.5.4 – Análise Comparativa das Diferentes Configurações e Entradas.....	59
CONCLUSÃO.....	62
ETAPAS FUTURAS.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

Capítulo 1

INTRODUÇÃO e OBJETIVO

1.1 Contextualização

A emissão de material particulado pela atividade antropogênica, principalmente com a presença de compostos quimicamente nocivos à natureza, constitui um grande problema da poluição atmosférica atual. 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).

Com a criação do SISNAMA começou-se a estabelecer limites máximos, aceitáveis, para diversos tipos de poluentes. Dentre os poluentes, está a emissão de particulados sólidos, onde as ações de controle visam reduzir a quantidade de poluentes descarregados na atmosfera, através da instalação de equipamentos de controle dos poluentes.

Para esse fim, existem alguns equipamentos que podem ser utilizados, e dentre eles o Filtro de Mangas, um dos equipamentos mais utilizados para a remoção de materiais particulados secos em efluentes gasosos industriais. Apesar de sua difusão, algumas melhorias podem ser feitas para um melhor uso do meio filtrante, uma diminuição no consumo energético, entre outras melhorias, e para isso estudos e tecnologia estão sendo desenvolvidos.

No ramo da eficiência energética do equipamento pouco tem se estudado em relação ao melhor aproveitamento da área filtrante. Os estudos realizados, e já implementados, se concentram na otimização dos motores que atuam na exaustão do ar. Empresas como a WEG já desenvolveram sistemas de controle que chegam a reduzir em até 60% o consumo energético através do controle de velocidade, além de outros benefícios como aumento da vida útil dos elementos filtrantes e redução do desgastes das tubulações (WEG, 2016).

Assim, melhorias no equipamento podem ser feitas, porém, geralmente, esta é mediante a construção de protótipos para testes, até obtenção de resultados satisfatórios. Devido aos grandes gastos, riscos de acidente e alta complexidade de alguns equipamentos, antes da construção realizam testes por simulações computacionais.

Esse recurso, chamado de fluidodinâmica computacional [ou do inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD)], pode ser aplicado tanto no projeto de engenharia como na investigação e desenvolvimento de uma base de conhecimento para auxiliar em novos projetos. A utilização desta ferramenta tem se destacado, nos últimos anos, em função da possibilidade de fornecer resultados com maior acurácia para situações com escoamentos complexos e onde o acesso a instrumentação de equipamentos industriais se torna difícil.

Assim, através de softwares comerciais, sua aplicação encontra-se em diversas áreas, como: na indústria petroquímica que utiliza na simulação de diversos equipamentos e processos, como por exemplo, o caso da PETROBRAS que utiliza este software para simular diferentes equipamentos e processos, tais como *Risers*, Ciclones e outros; na indústria aeroespacial que utiliza na simulação e desenvolvimento de aeronaves, o qual o escoamento é externo, turbinas, onde o escoamento é interno com reação química, que como exemplo se tem a EM-BRAER; na área de Filtro Manga têm-se começado a utilizar para verificar a influência das diferentes configurações do equipamento no meio filtrante, para otimizar a operação; dentre as outras aplicações.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Geral

O Filtro de Mangas é um equipamento utilizado por muitos segmentos industriais, porém essa versatilidade de aplicação não é seguida por um padrão de dimensão e quantidade de mangas em todos os casos. Logo, o trabalho utilizou um modelo de uma indústria moveleira e fez-se um *scaledown* por conta dos equipamentos utilizados na simulação não terem um bom desempenho para a dimensão original.

Assim, preocupado com o melhor aproveitamento da área filtrante, que é a parte mais onerosa a longo prazo, é essencial uma redução nos custos iniciais, de manutenção do equipamento e consumo energético da operação. Então, na tentativa dessa otimização, foi proposto diferentes *designs* de entrada e configurações de posicionamento das mangas, para que fosse feito uma análise de qual proporcionaria melhores resultados dentro das variáveis estudadas.

Logo, o trabalho tem como objetivo principal verificar como as técnicas de CFD podem ser utilizadas para análise de parâmetros fundamentais na otimização do equipamento.

1.2.2 Objetivo Específicos

- Identificar qual design de entrada proporciona maior aproveitamento da área filtrante e menor queda de pressão;
- Investigar a influência dos diferentes design na fluidodinâmica no equipamento;
- Investigar a influência da variação de velocidade de entrada na eficiência de filtração e na queda de pressão do equipamento;
- Investigar a influência da supressão de mangas no aproveitamento da área filtrante e na queda de pressão do equipamento.

Capítulo 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica e revisão da literatura são relevantes para o desenvolvimento e compreensão deste trabalho. Serão abordados, de forma sucinta, o equipamento, suas variáveis e a importância das técnicas CFD no desenvolvimento de projetos.

2.1 Filtro Manga

O Filtro de Mangas é um equipamento muito utilizado na limpeza de gases que contêm partículas sólidas, e hoje exerce um importante papel principalmente no controle de emissão de poluentes secos no meio ambiente. Os segmentos de aplicação do equipamento abrangem diferentes áreas industriais, como a produção de cimento, mármore e granito, petroquímica, dentre outros (ROCHA, 2010).

Dentre as características dele, é importante que o filtro fique seco quando os gases são filtrados pois no escoamento de gás, muitos sólidos são deliquescentes e, se houver umidade, esses materiais têm uma tendência para pegar umidade e dissolver ligeiramente, causando um entupimento do tecido. Nesses casos, é impossível remover este material do pano sem lavar ou raspar o filtro (WANG *et al*, 2004). Como todo equipamento os filtros de mangas apresentam vantagens e desvantagens em sua utilização.

Dentre as vantagens destacam-se a excelente eficiência, cerca de 99,9% de retenção das partículas acima de um micron, coleta a seco possibilitando recuperação fácil do material, operação e manutenção simples. Dentre as desvantagens destacam-se a restrição de temperatura inerente ao material das mangas, custo de manutenção alto, localização das mangas danificadas e pode requerer um tratamento especial das mangas para determinadas aplicações, como por exemplo, a impregnação química (LISBOA, 2007; SALEEM; KRAMMER, 2007).

Na indústria não existe um *design* padrão de Filtro de Mangas, podendo diferenciar na composição de componentes, tecidos, posição de entrada e outros fatores. Porém há uma estrutura básica de Filtro Manga que, de um modo geral, pode ser dividida em três partes: Pleno Superior, Corpo e a Moega.



Figura 2.1 – Estrutura de um Filtro Manga. **Fonte:** INOVA (2017)

A configuração dos componentes no equipamento depende basicamente do mecanismo de limpeza das mangas, que são: Ar Reverso, Agitação Mecânica (sacudimento) e Jato Pulsante (*Jet Pulse*). Entretanto, de forma geral, as partes importantes são: Gaiolas, que dão suporte para o tecido ser colocado e compor o meio filtrante; Tecido, responsável por realizar a filtração dos gás, sendo assim a parte fundamental no equipamento; Moega, que é o recipiente de descarga do pó desprendido das mangas e também das partículas que entram com baixa velocidade; Chapa Espelho, local onde as mangas são fixadas, com aberturas distribuídas em fileiras, de forma a garantir que o número total de mangas esteja distribuído de acordo com o projeto na caixa de filtração.

Apesar da configuração do equipamento não seguir um padrão geral, a forma de dimensionamento sempre leva em consideração basicamente os mesmo parâmetros: a taxa de fluxo do gás a ser filtrado, a velocidade de filtração ou relação ar-pano é determinado pelo design do fornecedor do meio filtrante, tipo de tecido, fibras utilizadas para o tecido, mecanismo de limpeza, número total de compartimentos, dentre outros. Assim os seguintes fatores devem ser levados em consideração ao dimensionar o equipamento.

2.1.1 Princípios Operacionais

Por definição, a filtração é um método físico de separação de misturas heterogêneas, quando temos um sólido disperso em um líquido ou gás (CREMASCO, 2014). Em um filtro manga ela ocorre através do elemento filtrante, as mangas. As partículas ficam retidas na superfície do tecido e nos poros das fibras, formando assim a chamada torta de filtração, responsável direto pela filtração. No momento em que se atinge o tempo de filtração ou queda de pressão máxima determinada para o equipamento, a torta então deverá ser removida da manga (SANTO, 2004; TIENI, 2005).

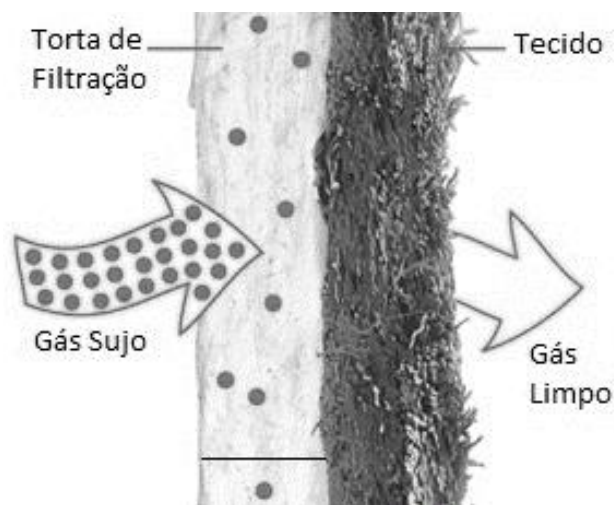


Figura 2.2 – Formação da torta de filtração. **Fonte:** Adaptado de TAPC (2016).

Um dos fatores mais importante para otimização do acionamento da limpeza das mangas é o ponto da formação da torta. Determinar o momento exato da formação não é possível por causa da não uniformidade dos materiais dos tecidos, no entanto, a dificuldade em se determinar experimentalmente este ponto, fez com que muitos estudiosos adotassem um valor experimental que demarcaria o ponto em que a torta se forma (ponto de colmatção).

Esse ponto pode ser entendido como a capacidade de retenção do meio poroso, e sua velocidade de formação depende do tamanho das partículas. Quanto menores forem as partículas envolvidas, maior será a velocidade de colmatção, visto que o espaço disponível entre as fibras para a deposição das partículas é pequeno (ROCHA,2010; WALSH et al., 1996; JAPUNTICH et al.,1994).

Portanto, fatores como tamanho de partículas, tipo do tecido da manga, queda de pressão, velocidade de filtração, dentre outros, são variáveis importantes para o dimensionamento do

equipamento. Assim, de forma sucinta, será revisado algumas dessas variáveis relevantes para a operação.

2.1.2 Velocidade

A velocidade de entrada, determinada pela vazão de entrada, é uma das variáveis mais importantes na operação, pois está diretamente relacionada com o tempo necessário para filtração, o desgaste do tecido, a profundidade que o material particulado consegue penetrar no meio filtrante, o tamanho da área de filtração (determinada pela razão ar-pano), entre outros efeitos.

Dentre essas variáveis, a razão ar-pano é fundamental para determinação do tamanho da área filtrante, seleção do tecido e na escolha do mecanismo de limpeza. Os termos velocidade de filtração e razão ar-pano (termo em inglês *Air-to-Cloth*) podem ser usados de forma intercambiável, e é calculada pela seguinte equação.

$$A/C_{razão} = \frac{Q}{A} \quad (2.1)$$

Onde Q (m^3/s) é a vazão de entrada do gás, A (m^2) é a área do meio filtrante e $A/C_{razão}$ é a razão ar-pano, com unidades típicas usadas de $(ft^3/min)/ft^2$ ou $(cm^3/s)/cm^2$, ou em forma de razão, de 1:1 à 12:1 para sistema de Filtro Mangas convencionais.

. Essa razão descreve a quantidade de gás sujo que passa através de uma dada superfície do filtro, em um determinado tempo. Para sistemas de baixa energia, com limpeza por agitação e os fluxos reversos, costumam operar em razões de 1:1 a 3:1, enquanto para mecanismo de limpeza por *Jet Pulse*, o sistema se torna de alta energia e funcionam com razões mais elevadas. Essas razões também dependem do tipo de partícula encontrada no efluente (MCKENNA, 1998; WANG *et al*, 2004).

Tabela 2.1 – Razões Ar-Pano para diferentes origens de partículas.

<i>Partícula</i>	<i>Sistema de limpeza</i>	
	Ar-Reverso/Agitação Mecânica	Jet Pulse
<i>Alumina</i>	2,5	8
<i>Cacau, chocolate</i>	2,5	12
<i>Cimento</i>	2	10
<i>Quartzo</i>	2,8	9

Fonte: WANG *et al*, 2004.

A determinação dos valores da razão é dada por alguns métodos que levam em consideração o tipo de partícula, mecanismo de limpeza, gráficos, equações empíricas e aplicabilidades semelhantes já utilizadas na indústria. Uma estimativa de razão ar-pano que é muito alta, em comparação com o valor correto, leva a maiores quedas de pressão, maior penetração de partículas, menor eficiência da limpeza e limpezas mais frequentes, o que leva a redução da vida útil do tecido. Uma estimativa de uma relação ar-pano que é muito baixa, aumenta o tamanho e o custo do filtro desnecessariamente. Por tanto seu dimensionamento é essencial para os custos do projeto (MCKENNA, 1998).

Outro efeito causado pela velocidade é a penetrabilidade da partícula. Alguns pesquisadores têm investigado a relação entre a velocidade de filtração e a profundidade de deposição das partículas. Tanabe (2008), Rodrigues (2004) e Martins (2001) concluíram que para as velocidades de filtração mais elevadas ocorre um aumento na profundidade de deposição das partículas, no diâmetro e no número de partículas coletadas no interior do meio filtrante.

Outro trabalho importante foi o desenvolvido por Rocha (2010), que verificou a influência da velocidade na operação de filtração. Algumas de suas conclusões foram que a colmatação do meio filtrante depende da velocidade de filtração, sendo o tempo de sua formação menor para as maiores velocidades; foi encontrado maior número de partículas, e uma maior profundidade, no interior do meio filtrante submetido a maiores velocidades; maior velocidade de filtração tem maior penetração no tecido, dificultando sua limpeza e causando uma maior perda de carga na continuidade da operação; o meio filtrante submetidos a velocidades de filtração menores saturou para um menor número de ciclos.

Além do mais, alguns estudos anteriores mostraram que a eficiência do filtro depende fortemente da velocidade do gás, derrubando qualquer hipótese de que o determinante da faixa de retenção seja exclusivamente o espaço entre as fibras. Para que ocorra a filtração, é necessário que haja contato físico entre a partícula e coletor, que, no caso dos filtros de tecidos, são as fibras. Além disso, é necessário que a partícula permaneça retida no coletor (ROCHA, 2010).

Assim, a verificação de qual velocidade seria mais adequada para o equipamento proposto poderá influenciar diretamente na eficiência de filtração e na vida útil das mangas. Uma outra variável que também é afetada pela velocidade será discutida a seguir.

2.1.3 Queda De Pressão

Como citado anteriormente, um dos critérios determinantes para a limpeza do filtro é quando o tecido atinge o ponto de colmatação, o que leva a um aumento na queda de pressão.

Essa variável é um valor que define o trabalho requerido para o escoamento de um fluido vencer as forças de atrito em um escoamento interno, determinado pela diferença entre as pressões na entrada e saída do equipamento, após sua passagem pelo meio filtrante, que deve ser um meio poroso (ROCHA, 2010; GEANKOPLIS, 2003).

O acionamento do mecanismo de limpeza para remoção da torta formada tem seu ponto obtido pelo controle da queda de pressão, e é o ponto final do chamado Ciclo de Limpeza, que é o tempo entre o começo de cada filtração até o alcance da queda de pressão máxima determinada, ou tempo de operação. Assim, quanto maior a frequência de acionamento, ou seja, quanto menor o ciclo de limpeza menor será a vida útil das mangas (RODRIGUES, 2004; JEON e JUNG, 2004).

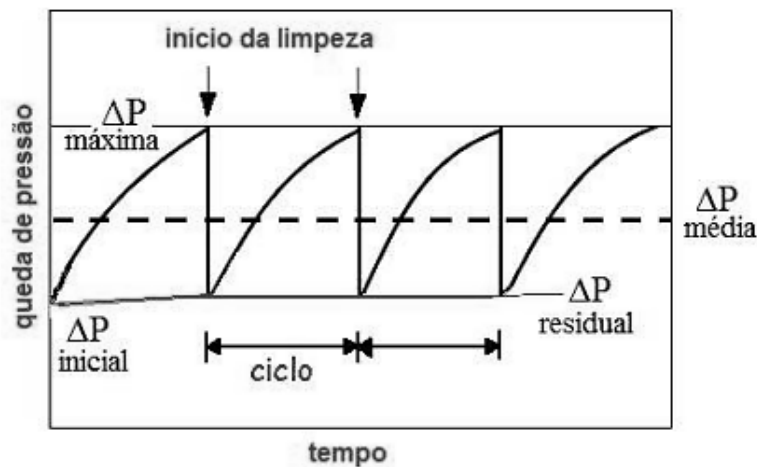


Figura 2.3 - Queda de pressão e ciclos de limpeza de um filtro de manga. **Fonte:** ROCHA, 2010

Os valores da queda de pressão variam de ciclo para ciclo, pois aumentam proporcionalmente à quantidade de partículas que ficam retidas no meio filtrante após a remoção da torta em cada ciclo, sendo assim chamada de queda de pressão residual (ROCHA, 2010).

Logo, quando se inicia um novo ciclo de filtração, a queda de pressão através do filtro é bem menor que os valores imediatamente anteriores à limpeza (queda de pressão máxima admitida) mas ligeiramente superior ao valor inicial do ciclo anterior, correspondente ao filtro virgem. Esse comportamento é explicado pela existência de pedaços de torta que não foram removidos (*Peatchy Cleaning*), bem como pelas partículas que permaneceram nos interstícios do tecido e o crescente acúmulo de partículas em seu interior (ROCHA, 2010; DULLIEN, 1998).

Após vários ciclos, esse valor tende a se estabilizar, indicando uma “quantidade de equilíbrio de pó” ou uma saturação no tecido, que depende do tipo do material do filtro, do tamanho das partículas, do tempo e do tipo de sistema de remoção da torta (CALLÉ et al., 2002). Em alguns casos, esse equilíbrio pode nunca ser atingido, e a operação prossegue até que a vazão de ar não possa mais ser mantida por muito tempo sob condições adequadas de queda de pressão, tornando o processo impraticável e, conseqüentemente, sendo necessária a substituição das mangas (RODRIGUES, 2006)

Os valores da queda de pressão levam a determinadas conclusões sobre a operação. Por exemplo, uma alta queda de pressão significa que o filtro perdeu a função, pois a torta formada é tão espessa que impede que a filtração ocorra de forma eficiente. Assim um aumento da velocidade de filtração para tentar vencer essa resistência ao escoamento, pode provocar o rasgo das mangas, elevando ainda mais o custo para empresa, além de proporcionar maior gasto energético (RODRIGUES, 2006).

A quantificação dessa variável é feita pelo seu equacionamento, que depende do filtro que se está trabalhando, mas geralmente a queda de pressão total é uma função da perda do filtro limpo, que dependerá da resistência da fibra do tecido e da velocidade de filtração, e a perda de formação da torta, que é uma função da resistência da torta, concentração de partículas no carregamento, velocidade e tempo de filtração (RODRIGUES, 2004).

Geralmente, a operação de filtração de gases ocorre a baixas velocidades e o comportamento da queda de pressão em função da velocidade superficial do gás pode ser expresso pela Lei de Darcy (ROCHA, 2010):

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha \cdot \mu_g \cdot V_f \quad (2.2)$$

Sendo, L a espessura do meio filtrante, α é o coeficiente de resistência viscosa, μ_g é a viscosidade do gás e V_f a velocidade superficial de escoamento do gás. Assim, através de rearranjo matemático e levando-se em conta algumas considerações como: coeficiente de permeabilidade do meio filtrante constante para escoamento de fluidos newtonianos e incompressíveis em meios porosos; espessura do meio filtrante durante a operação é fixa; aumento da espessura da torta com o tempo deve ser considerado; dentre outros, a equação da queda de pressão total será:

$$\Delta P_T = K_m \cdot V_f + K_c \cdot V_f \cdot W \quad (2.3)$$

Sendo K_m a resistência específica do meio filtrante, K_c a resistência específica da torta, para um dado sólido e porosidade constante e W a massa de sólido depositada por unidade de área (ROCHA, 2010; LEITH; ALLEN, 1986). Logo, a velocidade superficial é diretamente proporcional a queda de pressão total.

Segundo CAVASSEN (1980), a maioria dos filtros coletores de pó, na prática, é operada com quedas de pressão entre 490 e 1.961Pa. Outros autores, como McKENNA (1998), falam que os valores de queda de pressão podem variar entre 1245 à 4981Pa dentro de todo o sistema, se tiver muita canalização.

Na prática, variações na queda de pressão fora da faixa de projeto podem indicar problemas com o meio. Variação excessiva podem indicar: um aumento no volume do fluxo, obstrução do tecido do filtro, tremonhas cheias de poeira e ocorrendo ressuspensão de partículas e/ou mecanismo de limpeza inoperacional. Por isso recomenda-se o monitoramento contínuo da queda de pressão (WANG *et al*, 2004).

Outra característica fundamental a operação do equipamento é o monitoramento do gasto energético do equipamento. A energia utilizada depende em grande parte da necessidade de energia do soprador. A Equação 2.3 pode estimar esta exigência, assumindo uma eficiência do motor do ventilador de 65% e uma gravidade específica do fluido de 1,00 (WANG *et al*, 2004):

$$F_p = 1,81 \times 10^{-4} (Q_{e,a})(P)(HRS) \quad (2.4)$$

Onde F_p é a energia requerida pelo soprador (kWh/ano), $Q_{e,a}$ é a vazão do gás, P é a queda de pressão do sistema e HRS é a quantidade de horas operadas. Logo, sistema que operam com a mesma vazão e pela mesma duração temporal, devem se atentar para o controle da queda pressão, para minimizar os gastos energéticos desnecessários e fazer as manutenções adequadas para que isso seja evitado.

Portanto, além dessas duas variáveis, outras variáveis como permeabilidade do meio filtrante, porosidade da torta de formação, dentre outros, também são de suma importância para o melhor dimensionamento possível das condições operantes e material do tecido. Porém essas não serão abordados no trabalho. Para melhor estudo do equipamento e dos tecidos, recomenda-se os trabalhos Andersen *et al* (2016); Rocha (2010); Rodrigues (2004); Rodrigues (2006); McKenna (1998); entre outros. Neles são abordados assuntos como a formação da torta, remoção da torta, propriedades dos tecidos, entre outros fatores importantes, de forma mais aprofundada.

2.1.4 Design de Entrada do Fluido

Os filtros têm duas configurações básicas de entrada de ar, empurrados através do sistema por um ventilador localizado na entrada do equipamento (*forced draft fan*) ou puxado por um ventilador ligado à saída do equipamento (*induced draft fan*). O primeiro é chamado de pressão positiva e o último é chamado de pressão negativa ou de sucção. Para a pressão positiva a caixa do equipamento pode ser aberta à atmosfera ou fechada (selada e isoladas da pressão). Para a pressão negativa só podem ser do tipo fechada.

O *design* de sucção deve ser selecionado para uma aplicação com poluente nocivo ao ambiente, evitando a liberação acidental dos poluentes capturados. Outro cuidado é em relação a temperatura. Essa variável quando muito próxima do ponto de condensação do fluxo pode condensar, o que pode levar ao humedecimento da torta de filtração, encharcar o tecido e promover a corrosão da caixa e dos instrumentos metálicos presentes, pois deve-se ter cuidado com os parâmetros de *design* (WANG *et al*, 2004).

Além do posicionamento do ventilador, a geometria, tamanho e quantidade de entradas e mangas, influenciam muito nos resultados, e geralmente o *design* dos filtros de mangas é realizado com base na experiência do fabricante com processos e aplicações similares (US-EPA, 1995). Independente do *design* escolhido, em geral, para fins de cálculo, assume-se que o escoamento na entrada é uniforme e que todas as mangas estão sujeitas aos mesmos valores de velocidade e pressão.

Um filtro com uma distribuição não homogênea proporciona áreas com velocidade de filtração superiores ou inferiores à velocidade de filtração especificada no projeto, além de não promover uma uniformidade na formação da torta (TOGNETTI, 2007). Além disso, a experiência da indústria indica que, com uma torta de filtração mais distribuída, o aumento no ΔP do filtro será mais lento, provocando um intervalo maior entre as limpezas do filtro (BERNABE, 2016).

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 *designs* de filtros mais compactos, o que reduz consideravelmente os custos de fabricação, instalação e manutenção.

Assim esse trabalho visa uma análise de redução de um filtro de grande escala, promovendo um melhor aproveitamento da área filtrante, e por não encontrar estudos para avaliar a o

comportamento da retirada de áreas que possivelmente estão sendo mal aproveitada, será feita uma análise de como seria o aproveitamento dessa área se houvesse a retirada dessas mangas, estrategicamente, e seus efeitos da dinâmica do funcionamento de filtros manga e suas variáveis.

2.2 Outros Critérios de Dimensionamento

A determinação da velocidade de filtração e a queda de pressão constituem importantes partes do dimensionamento da operação, porém não são as únicas decisões a serem tomadas. Um conjunto de fatores leva a tomada de decisões da escolha do tecido que será utilizado no meio filtrante, quantidade de mangas, etc.

Assim faz-se necessário uma revisão sucinta de outros critérios de dimensionamento, pensando em futuros trabalhos a partir deste, mostrando que o conjunto dessas variáveis são fundamentais para um dimensionamento coerente e otimizado.

2.2.1 Propriedades da Partícula

As propriedades físicas e químicas são extremamente importantes para selecionar o tecido que será usado. Estes incluem tamanho, origem, forma e densidade de poeira; média e máxima concentrações; abrasividade, explosividade, carga eletrostática e tendências de aglomeração, dentre outros. Por exemplo, as poeiras abrasivas deterioram tecidos de algodão ou vidro muito rapidamente. Se o pó tiver uma carga eletrostática, o tecido escolhido deve ser compatível para fornecer a máxima coleta de partículas e ainda limpar sem danificar os tecidos, dentre outras peculiaridades inerentes a essas características (WANG *et al*, 2004).

2.2.2 Tecido Filtrante

É o principal elemento no projeto de um filtro, entretanto não é objeto de estudo desse trabalho. As fibras, que compõe o tecido, são feitas de forma industrial, com elementos retirados da natureza ou sinteticamente produzidos. Algumas propriedades físicas e estruturais dos tecidos de filtração determinam o processo de limpeza de gases em Filtros de Manga, pois neles ocorrem a coleta do material particulado e a remoção deste material durante o processo de limpeza do filtro (RODRIGUES, 2004).

A diferença básica na utilização das duas, inicialmente, foi o limite na vazão de material particulado no meio. As fibras naturais, apesar de terem sido pioneiras, tem a vazão de ar limitada a no máximo 0,23 m³/min. Em velocidades mais altas, o material pulverulento era mais

compactado, o que levava a uma grande queda de pressão e à quebra local da torta de filtração, permitindo uma penetração excessiva do sólido no filtro.

Mais recentemente, com o desenvolvimento dos tecidos sintéticos, maiores velocidades podem ser empregadas, sem que haja penetração demasiada de material pulverulento. Os filtros de tecido sintético, por sua flexibilidade, apresentam maior durabilidade e facilidade de limpeza do que os de fibra natural (DONOVAN, 1985; ITO, 2002).

Por conta de algumas características, as fibras sintéticas são mais utilizadas que as naturais. Isto se deve ao seu baixo custo, maior resistência química e mecânica e menor diâmetro das fibras. Nelas são incluídas os acetatos, acrílicos, poliamidas, poliésteres, polipropileno entre outros materiais. (MARTINS, 2001)

De um modo geral, o tipo do tecido tem grande influência no processo de remoção das tortas de filtração, e apesar de apresentarem materiais diferentes, basicamente podem ser classificados em duas categorias, os tecidos trançados e os não trançados.

Nos Filtros de Manga onde o fluxo de gás ocorre do interior das mangas para fora, como os limpos por ar reverso, que operam geralmente com baixas vazões de gás, usam quase que exclusivamente os tecidos trançados. Estes tecidos tem grande restrição a altos fluxos, mas grande resistência mecânica se comparados a tecidos não trançados. Devido a isto, eles são selecionados nas aplicações de limpeza por fluxo de ar reverso e por vibração mecânica (RODRIGUES, 2004). No entanto, segundo Davis (1992), nas aplicações com limpeza por pulso de ar o uso de tecidos trançados é usualmente restrito devido à diminuição da eficiência de filtração que este procedimento de limpeza acarreta ao tecido, por ser realizado em pulsos de alto fluxo de gás (jatos).

Os tecidos não trançados são geralmente mais indicados para filtro de mangas com sistema de limpeza por jato pulsante, que oferece elevada energia para limpeza e alto fluxo operacional de gás. Filtros não trançados trabalham bem com sólidos mais pesado, como areia seca, pedra calcária, e grãos. Em geral, os tecidos não trançados propiciam uma vida útil mais longa das mangas, em contrapartida, oferecem maior resistência ao fluxo de gás do que os tecidos trançados (MYCOCK et al., 1995)

Dentre as variáveis dos tecidos que influenciam no escoamento e formação da torta, a permeabilidade do meio filtrante se torna uma das mais importantes para determinar a relação entre a queda de pressão e velocidade superficial. Ela deve ser considerada na escolha do meio filtrante pois indica maior ou menor facilidade à passagem do fluido através de seus poros ou

vazios. Filtros pouco permeáveis possuem baixa taxa de coleta de partículas, o que torna o processo economicamente menos vantajoso (ROCHA, 2010).

Em alguns casos, filtros com baixo valor de permeabilidade são necessários como, por exemplo, quando a penetração de partículas pode causar danos para algum material ou ocasionar problemas no funcionamento de algum equipamento (INNOCENTINI et al., 2009). Durante a operação de filtração, a permeabilidade do tecido é reduzida pela deposição de material particulado residual, causando valores diferentes para o tecido novo e o tecido após a limpeza. Ao se confeccionar um meio filtrante para ser usado em filtro de mangas, o objetivo é mantê-lo altamente permeável, tanto limpo quanto impregnado de pó (DAVIS; BUONICORE, 1992).

2.2.3 Características da Corrente de Gás

O teor de umidade e corrosão são as principais características do fluxo de gás que requerem atenção, quando se está trabalhando com gases com esse potencial. Os componentes associados devem ser isolados e possivelmente aquecidos, para evitar uma condensação e formação de ácidos, pois ambos os componentes estruturais e de tecido podem estar danificados como consequência desses dois fenômenos. Especificamente para onde a corrosão estrutural é provável, a substituição de aço inoxidável por leve pode ser necessária, desde que os cloretos não estejam presentes quando se utiliza aço inoxidável, pois a maioria dos aços inoxidáveis austeníticos são suscetíveis à corrosão por cloreto (McKENNA *et al*, 1998).

Outra característica importante é a temperatura da corrente. Ela deve permanecer acima do ponto de condensação de qualquer condensável no fluxo, para que evite uma aderência tão forte que impossibilite que o mecanismo de limpeza exerça sua função. Se a temperatura puder ser baixada sem se aproximar do ponto de condensação, refrigeradores ou ar de diluição podem ser usados para diminuir a temperatura de modo que os limites do tecido não será excedido.

No entanto, o custo adicional de um pré-refrigerador terá que ser pesado contra o maior custo dos tecidos com maior resistência à temperatura. O uso de ar de diluição para esfriar o fluxo também envolve uma compensação entre um tecido menos caro e um filtro maior para acomodar o volume adicional do ar de diluição. Geralmente, o pré-resfriamento não é necessário e existem tecidos resistentes à temperatura e aos produtos químicos. (McKENNA *et al*, 1998).

2.2.4 Espaçamento das Mangas

Espaçamento das mangas é muito importante para uma boa operação e facilidade de manutenção. Ele afeta a velocidade na qual o gás se move através do compartimento. Por exemplo, se as mangas são muito próximas, a velocidade do gás seria alta porque há pouca área entre os sacos para que a corrente passe. Portanto, é preferível espaçar as mangas suficiente para minimizar este problema potencial, mas não tão distante entre si como para aumentar o tamanho da caixa do filtro e os custos associados (WANG *et al*, 2004).

Existem outros fatores que são fundamentais para o dimensionamento do equipamento, porém não serão abordados neste trabalho, por causa da extensão do conteúdo. Então sugere-se a leitura dos trabalhos de Rocha (2010), McKenna (1998), Wang *et al* (2004), entre outros, para aprofundar sobre o equipamento e suas variáveis.

2.3 CFD Como Ferramenta Para Projetos

A competitividade do mercado requer equipes com desenvolvimento de métodos para tomar as melhores decisões, e certas, de projetos ou desenvolvimento de produtos. As empresas não podem pagar o custo e atrasos associados as decisões erradas.

Quando os produtos interagem com fluxo de gás, aquecimento ou resfriamento, reações químicas, turbulência e fenômenos fluidodinâmicos, entra em cena a Fluidodinâmica Computacional (CFD). A análise do CFD é uma ferramenta valiosa que, entre muitas vantagens, diminui o número de protótipos físicos, oferece oportunidades para praticamente testar mais cenários e permite a otimização do projeto.

Os resultados do CFD devem ser usados regularmente ao longo do ciclo de desenvolvimento. Alavancar o uso de CFD ao longo do ciclo de desenvolvimento requer uma mudança cultural, mas melhora a capacidade de tomar decisões na engenharia, assim é mais fácil obtê-lo a primeira vez e o processo global se torna mais eficiente. Essa ferramenta também melhora a precisão com que o comportamento do mundo real é avaliado, ajudando os engenheiros a tomar melhores decisões que, em última instância, levam a melhores produtos.

A aplicação da ferramenta é muito difundida, porém precisa-se tomar cuidado com a modelagem para a escolha dos pacotes de equações que melhor irão representar os resultados. Uma simplificação muito utilizada na análise de CFD baseia-se na redução das dimensões. Como exemplo, podemos considerar o fluxo em torno de um cilindro infinitamente longo ou prisma

quadrado, perpendicular à direção do fluxo. À primeira vista, este problema poderia ser baseado na aproximação bidimensional (2D). No entanto, em $Re > 200$, os vórtices que se desenvolvem atrás do cilindro tornam-se instáveis para encurvamento que não pode ser modelado com base no 2D (PANTON, 1997; PAVLOV *et al*, 2000).

Outra simplificação amplamente utilizada baseia-se no pressuposto de que os efeitos de turbulência no fluxo podem ser descritos pelas equações de Reynolds Average Navier-Stokes (RANS). Essa abordagem, no entanto, não pode explicar a origem do ruído (vibrações induzidas pelo fluxo) no fluxo (PANTON, 1997).

Portanto, os códigos de CFD não podem ser usados como ferramentas exclusivas para a pesquisa na engenharia, mas sim como ferramentas úteis se forem utilizados juntamente com outras ferramentas de análise de fluxo. Para aplicação deve-se ter os valores e considerações sobre as propriedades gerais do fluxo para um análise dos detalhes desse fluxo.

Apesar do Filtro de mangas ter uma eficiência muito alta, alguns estudos tentam conhecer melhor suas variáveis, para que seja possível desenvolver melhorias ou equações que irão auxiliar no dimensionamento, na diminuição dos desgastes da manga, no consumo energético da operação, etc. A maioria dos trabalhos publicados na área de limpeza e filtração de gases são estudos experimentais, porém alguns pesquisadores têm utilizado a ferramenta computacional para comparar com dados obtidos experimentalmente, ou para obtenção de resultados preliminares para futuros trabalhos.

Assim alguns trabalhos na literatura já foram feitos utilizando a simulação computacional, principalmente para investigação da influência da velocidade de filtração e da máxima queda de pressão no leito.

- DITTLER e KASPER (1999), que em seu trabalho utilizaram um modelo bidimensional em regime semi-estacionário para prever a queda de pressão como uma função da eficiência de regeneração e dos padrões de regeneração de filtros cerâmicos.
- DEUSCHLE *et al.* (2008) apresentam uma validação experimental de um modelo CFD que descreve os efeitos da regeneração, filtração e depósitos no filtro de cerâmica. O modelo de CDF utilizado mostrou-se eficiente para o modelo de bancada utilizado, e também, para a investigação em longo prazo de um sistema de filtro de gás de diferentes geometrias.

- ROCHA (2010) investigou a influência dos ciclos de filtração na estrutura da torta formada a partir de diferentes velocidades superficiais de filtração, e a influência da velocidade de filtração e do número de ciclos na fluidodinâmica do gás através da técnica de CFD, utilizando-se um equipamento de filtração para colher as informações necessárias, com diferentes tipos de tecidos.
- MARQUES (2014), PEREIRA (2015), ROCHA *et al* (2013) e ROCHA *et al* (2014), onde foi utilizada a técnica de CFD para análise de diferentes posicionamentos de entrada de fluido em um filtro de manga.

Na literatura há poucos estudos sobre o aumento da eficiência e melhor aproveitamento das mangas no equipamento, uma vez que ele já apresenta uma alta eficiência, se bem dimensionado, e pelo esforço computacional requerido por configurações com muitas mangas que geralmente compõem os equipamentos utilizados industrialmente.

Além disso não existe uma configuração padrão do equipamento, que varia de indústria para indústria pela sua posição de alimentação, quantidade de mangas, aparatos para impactar a entrada do fluido e precipitar as partículas logo na entrada, dentre outras diferenças. Por isso este trabalho veio propor, de forma não aprofundada, como as técnicas de CFD podem ser utilizadas para o estudo da influência do *design* de entrada no equipamento, visando simplificar e reduzir a configuração das mangas, afim de obter resultados expressivos com intuito de diminuição de custos com as mangas e redução do gasto energético.

Então, através do uso de CFD propõe-se configurações simples do equipamento, variando suas posições de alimentação, velocidades de entrada, posicionamento e quantidades de mangas no meio filtrante, a fim de verificar qual as consequências dessas variações na eficiência de filtração. Para o entendimento da metodologia, é importante uma revisão sucinta da modelagem desse trabalho.

2.3.1 Modelos Utilizados

As equações de Navier-Stokes são as que regem o escoamento de fluidos líquidos e gasosos, e permitem determinar os campos de velocidade e de pressão no escoamento. É necessário fazer várias suposições à cerca dos fluidos antes de se chegar nessas equações. Uma suposição fundamental é que um fluido é um meio contínuo. Isto significa que a continuidade reside no fato que a escala de análise é muito maior que a escala molecular. Outra hipótese necessária é que todas as variáveis de interesse tais como pressão, velocidade, densidade, temperatura, etc, são diferenciáveis (isto é, não tem transição de fase) (FOX *et al*, 2003).

Nesse trabalho as equações de Navier-Stokes serão reduzidas a Equação 2.6, pois apenas as conservações de massa e quantidade de movimento foram aplicadas, porque o sistema foi considerado isotérmico e com escoamento de um fluido incompressível. Logo têm-se:

- Conservação da massa (Equação da Continuidade) e Quantidade de Movimento.

$$\nabla \vec{u} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.6)$$

Em que \vec{u} é a velocidade do ar, p a pressão estática, $\bar{\tau}$ é o tensor de stress, $\rho \vec{g}$ e \vec{F} são a força gravitacional do corpo e forças externas ao corpo (FLUENT, 2013).

O tensor tensão de um fluido newtoniano é dado por:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{u} I \right] \quad (2.7)$$

Em que μ é viscosidade molecular, $\nabla \vec{u}^T$ gradiente de velocidade transposto, I é a unidade do tensor, e o segundo termo do lado direito da equação é o efeito da dilatação volumétrica (FLUENT, 2013).

Essas equações resultantes são extremamente complexas e não possuem solução analítica conhecida, apenas para casos muito particulares. Porém, as soluções numéricas obtidas são consideráveis, desde que as condições de contorno e iniciais sejam feitas de acordo com as propriedades físicas do processo. Essas soluções são obtidas aplicando-se técnicas de discretização nos elementos da malha, e como resultados obtêm-se velocidade, pressão, dentre outras variáveis, que são calculados em cada elemento, cuja combinação desses resultados geram uma detalhada distribuição do escoamento do ar dentro do domínio (KOLESNIKOV, 2006).

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais parciais não-lineares em praticamente todas as situações reais. A não linearidade faz com que a maioria dos problemas sejam difíceis ou impossíveis de resolver. Para resolver esse problema é necessária a utilização de um modelo de turbulência.

A princípio, as equações de conservação são capazes de tratar escoamentos turbulentos sem a necessidade de informação adicional. No entanto, as escalas de comprimento envolvidas trariam a necessidade de malhas numéricas com volumes de controle muito pequenos, tornando o cálculo inviável para os padrões computacionais atuais. Assim, na prática faz-se necessário o uso de modelos de turbulência (DIAS, 2007).

Atualmente existe uma grande quantidade de modelagem da turbulência. Porém, com base na literatura, o trabalho irá utilizar as Equações de Médias de Reynolds (RANS - *Reynolds-*

Averaged Navier-Stokes), mais precisamente o modelo que aborda a resolução em casos transientes, pois são os mais indicados para aplicações aerodinâmicas.

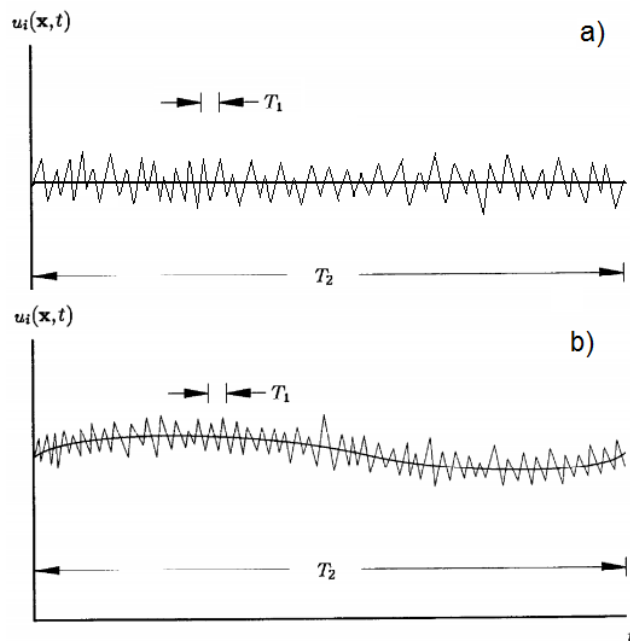


Figura 2.4 - a) Comportamento do modelo RANS. b) Comportamento do modelo URANS. Fonte: WILCOX (1998).

A diferença entre os modelos contínuo e transiente é a forma com que resolvem as equações de Navier-Stokes. O modelo URANS (*Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) introduz termos que são dependentes do tempo, ou seja, é mais adequado em escoamentos transientes. Já a ausência desses termos no modelo RANS, que é melhor aplicado em processos no estado estacionário, pode fazer com que não haja uma convergência ou que haja uma instabilidade na obtenção da solução (WANG et al, 2012).

Ele tem a mesma forma geral que as equações de Navier-Stokes instantâneas, com as velocidades e outras variáveis de solução representando agora os valores médios em conjunto (ou em tempo). O desenvolvimento matemático das equações geram termos adicionais que representam os efeitos da turbulência.

Esses efeitos são resolvidos através de um modelo de turbulência, e existem alguns modelos que poderiam ser utilizados, porém no trabalho foi utilizado o Modelo $k-\varepsilon$ *Realizable* (FLUENT, 2013).

As equações deste modelo são definidas por funções que descrevem a energia cinética da turbulência e sua taxa de dissipação. Suas propriedades escalares são: k , que modela a equação

de transporte da energia cinética turbulenta e , ε que modela a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (HEUERT, KHATCHATOURIAN, 2007).

Estudos iniciais mostraram que o modelo *Realizable* fornece o melhor desempenho de todas as versões do modelo para várias validações de fluxos e fluxos separados com recursos de fluxo secundário complexos (FLUENT, 2013)

➤ As equações de transporte modeladas para k e ε no modelo *Realizable* são:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + \\ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2.9)$$

Nestas equações, G_k representa a geração de energia cinética de turbulência devido aos gradientes de velocidade média. G_b é a geração de energia cinética de turbulência devido à flutuabilidade. Y_M representa a contribuição da dilatação flutuante em turbulência compressível para a taxa de dissipação global. C_2 e $C_{1\varepsilon}$ são constantes. σ_k e σ_ε são os números de Prandtl turbulentos para k e ε , respectivamente. S_k e S_ε são termos de origem definidos pelo usuário.

O termo *Realizable* significa que o modelo satisfaz certas restrições matemáticas sobre as tensões de Reynolds, consistente com a física dos fluxos turbulentos. Além disso ele é susceptível de proporcionar desempenhos superiores para os fluxos que envolvam rotação, camadas limites sob forte adversos gradientes de pressão, separação e recirculação (FLUENT, 2013).

Então, o campo de turbulência foi modelado usando o modelo Realizable k - ε onde têm-se visto na literatura que modelos baseados na viscosidade turbulenta apresentam compromisso entre a velocidade e razoável acurácia para queda de pressão (WILCOX, 1998; ROCHA, 2010).

2.3.2 Modelagem Do Meio Poroso

O meio poroso tem uma espessura finita sobre a qual a mudança de pressão é definida como uma combinação da Lei de Darcy e um termo de perda inercial adicional:

$$\Delta p = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \Delta m \quad (2.10)$$

Onde μ é viscosidade do fluido laminar, α é a permeabilidade do meio, C_2 é o coeficiente de pressão-salto, v é a velocidade normal à face porosa, Δm é a espessura do meio.

2.3.3 Algoritmo

As componentes da velocidade são governadas pela equação da quantidade de movimento, que é um caso particular da equação geral de transporte. A dificuldade real no cálculo do campo de velocidades está em determinar o campo de pressões. O gradiente de pressão forma uma parte do termo fonte para a equação da quantidade de movimento. Contudo, não há uma equação discretizada para a pressão. Para um campo de pressão dado não há dificuldade particular para se resolver a equação do momento. Porém, o meio de se determinar o campo de pressão é mais difícil (PATANKAR, 1980).

O campo de pressão é indiretamente especificado pela equação da continuidade. Quando o campo de pressões correto é substituído na equação da quantidade de movimento, o campo de velocidades resultante deve satisfazer a equação da continuidade. Dessa forma o problema pressão-velocidade pode ser resolvido adotando uma solução iterativa (PATANKAR, 1980).

Uma dessas soluções iterativas, e a utilizada nesse trabalho, foi o método de acoplamento SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations*). Essencialmente o algoritmo SIMPLE consiste em solucionar iterativamente o sistema de equações lineares garantindo que o campo de velocidades assim obtido satisfaça a equação da continuidade.

Capítulo 3

METODOLOGIA

O trabalho foi realizada em quatro etapas: a construção e discretização da geometria, as definições das condições de contorno e propriedades físicas das variáveis, definição dos métodos computacionais oferecidos pelo *Fluent* e o pós-processamento das simulações.

3.1 Construção e discretização da geometria:

A geometria construída foi baseada em um protótipo de um filtro manga utilizada pela indústria. As principais dimensões do filtro manga são: altura do equipamento com 5,3m; comprimento 1,8m e profundidade de 2,0m. Foi utilizado um conjunto de mangas 7x7 (49 mangas), com dimensões de 0,3m de diâmetro e 3,0m de altura, proporcionando uma área de filtração de 75m².

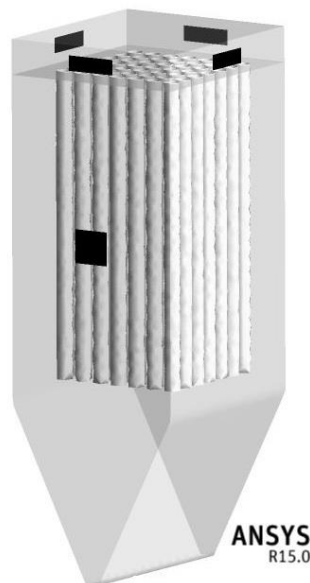


Figura 3.1 – Filtro manga industrial utilizado como base. **Fonte:** ROCHA (20130)

Na discretização do domínio feito, as equações diferenciais de transporte aplicadas ao escoamento de fluidos, ao serem discretizadas, formam um sistema linear de equações. Para uma dada propriedade conservada em um volume de controle, as equações de transporte são válidas para qualquer ponto infinitesimal dentro deste volume, sendo que a região do contorno afeta o comportamento da propriedade conservada. Para a solução numérica, o domínio passa a ser discretizado sendo, portanto, composto de vários subdomínios.

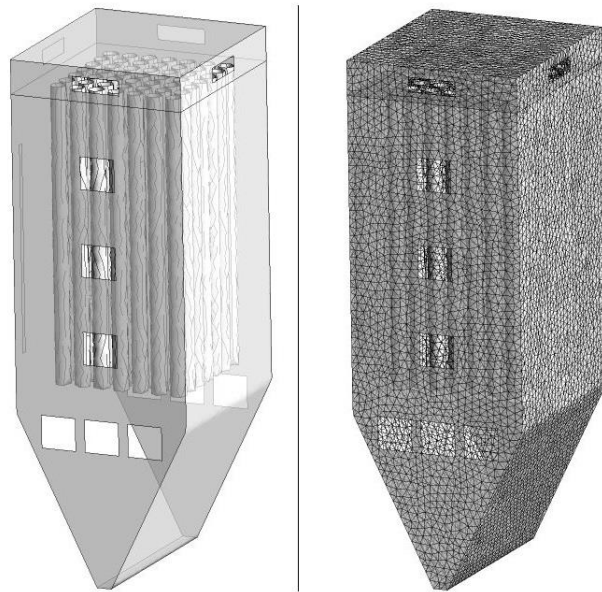


Figura 3.2 – Domínio e subdomínio utilizados. **Fonte:** AUTOR (2016)

No trabalho, o domínio de discretização foi conduzido em subdomínio (malha) não estruturado, usando elementos tetraédricos. Com o objetivo da escolha do tamanho ótimo de malha, foi feito um teste preliminar para avaliação da velocidade sobre as mangas para cada malha.

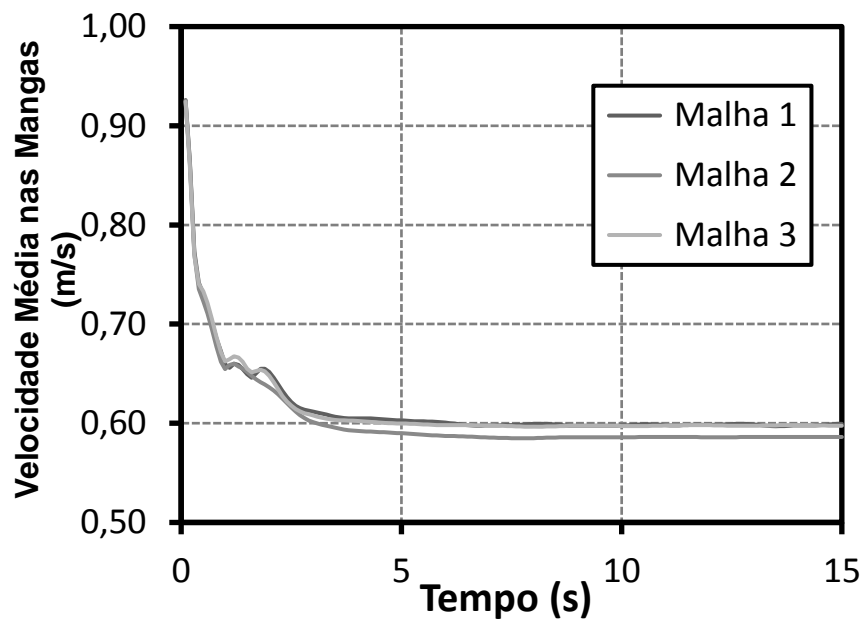


Figura 3.3 - Teste de malha para a velocidade. **Fonte:** ROCHA (2013)

A faixa investigada começou com uma malha de 379.693 elementos até uma malha com 1.614.466 elementos. Analisando o Gráfico 3.1 a velocidade comportou-se de forma bem similar para os diferentes refinamentos, optando assim pela malha que apresentava o melhor custo

benefício, que foi a com 527.609 elementos. O número de elementos é considerado baixo, porém foi simulado mesmo assim devido a limitação computacional.

3.2 Entradas

Afim de verificar a influência de posições diferentes de entrada de fluido no domínio, foi feita uma geometria que concentrava-se todas as entradas que seriam simuladas.



Figura 3.4 – Domínio com diferentes entradas. **Fonte:** AUTOR (2016)

A escolha de concentrar todas as entradas em um único modelo foi por causa da geração dos subdomínios, que possivelmente teria diferentes quantidades de elementos e estruturas para cada entrada que seria simulada. Para que os resultados gerados pudessem ser comparados com mais confiabilidade, sendo a malha igual para todos os casos, optou por essa concentração.

Como todas as entradas se encontravam no mesmo domínio elas receberam nomes distintos e na simulação recebiam dois tipos de condições: entrada (*inlet*) ou parede (*wall*). Assim a entrada poderia ser considerada parede para a situação, ou se por ela iria passar o fluxo de ar para o domínio.

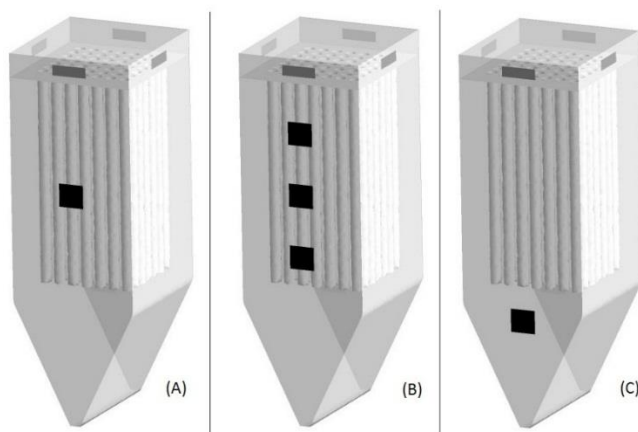


Figura 3.5 – Diferentes *designs*. Fonte: ROCHA(2013)

Com isso foram simuladas três entradas distintas, representadas pela Figura 3.4 acima. A entrada (A), denominada Convencional, é baseado no Filtro de manga industrial, que tem sua entrada do fluido no meio do conjunto de mangas. A entrada (B), denominada Tripla Concêntrica, é uma variação do *design* industrial, com as três entradas em linha vertical distribuindo seu fluxo por toda região do meio filtrante. Por último, a entrada (C), denominada de Simples, é uma alternativa as duas outras para ver o comportamento do fluido quando esse não colide com o meio filtrante. Em todos os *designs* tiveram a mesma quantidade de saídas, totalizando quatro, posicionadas uma em cada lado na caixa superior do equipamento.

Para o *design* tripla concêntrica a velocidade de entrada foi dividida igualmente para cada entrada, em cada caso. A escolha desses valores para a velocidade não foram aleatórios, foi baseado em uma informação de um engenheiro que trabalha em uma grande indústria metalúrgica no Espírito Santo.

3.3 Modelagem

A modelagem computacional é a área que trata da simulação de soluções para problemas científicos, analisando os fenômenos, desenvolvendo modelos matemáticos para sua descrição, e elaborando códigos computacionais para obtenção daquelas soluções. Assim, foi feita a modelagem utilizando dos métodos encontrados no software *Fluent v15*.

3.3.1 Modelagem Do Escoamento

O software aplica o Método de Volume Finito para discretizar as equações. A abordagem transiente foi necessária para atingir a convergência, pois o estado estacionário apresentava-se instável na obtenção de resultado, por conta da entrada ser um jato de colisão, e no caso de seu posicionamento estar na região do meio filtrante leva a mudanças à medida que o escoamento

é realizado e o impacto na manga acontece. Assim as configurações de modelagem utilizadas seguem no quadro abaixo:

Quadro 3.1 – Configurações de modelagem utilizada para obtenção dos resultados:

Considerações Iniciais	Escoamento	Isotérmico Monofásico
	Propriedades do Ar	Densidade: 1,225 kg/m ³ Viscosidade Dinâmica: 1,789.10 ⁻⁵ Pa.s
Solver	Tipo: Baseado na Pressão Formulação da velocidade: Absoluta Tempo: Transiente	Gravidade: Y = -9,81m/s ²
Modelo	Viscoso: k-ε Realizável	C2-Epsilon = 1,9 TKE Prandtl = 1 TKR Prandtl = 1,2
	Função de Parede: Padrão	-
Material	Fluído: Air Sólido: Alumínio	-
Condição de Contorno	Parede	Estacionária Antideslizamento Constante de rugosidade = 0,5
	Entrada de velocidade	Método: Magnitude normal com o contorno Referência: Absoluta Magnitude (m/s): 10, 15, 20 e 25 Pressão Inicial (Pa): 0 Velocidade e pressão constante
	Turbulência	Método de especificação: Intensidade e diâmetro hidráulico Intensidade de turbulência (%): 10 Diâmetro Hidráulico (m): 0,15
	<i>Porous Jump</i>	Permeabilidade (m²): 5,87e ⁻¹⁰ Espessura (m): 0,0025 Coefficiente (C2)(1/m): 0
	Saída de Pressão	Pressão (Pa): 0 Método de especificação da turbulência: Intensidade e diâmetro hidráulico Intensidade de turbulência (%): 3 Diâmetro Hidráulico (m): 0,1
Métodos de Solução	Acoplamento Pressão-Velocidade	SIMPLE
	Discretização Espacial	Gradiente: <i>Last Squares Cell Based</i>

		Pressão: Segunda Ordem Momento: Segunda Ordem <i>Upwind</i> Energia cinética turbulenta: Segunda Ordem <i>Upwind</i> Taxa de dissipação turbulenta: Segunda Ordem <i>Upwind</i> Formulação Transiente: Segunda Ordem Implícita
Solução de controle	Fatores de Sob Relaxação	Pressão: 0,3 Densidade: 1 Momento: 0,6 Energia Cinética Turbulenta: 0,8
Solução de Inicialização	Híbrida	-
Condições de Cálculo	Conduzidas até que o tempo fosse suficiente para atingir o comportamento estacionário nas variáveis monitoradas.	Passo de tempo: 0,0002s Número de passo de tempo: 7500 Tempo: 15s Máxima iteração/ passo tempo: 40

Fonte: Autor (2017)

3.4 Pós-Processamento

O pós-processamento dos resultados desse trabalho foram realizados no *Ansys CFD Post*, e foram feitos utilizando a seguinte metodologia:

- As linhas de correntes foram todas geradas utilizando 600 pontos de partida da entrada de ar, e o range da velocidade foram as diferentes velocidades de entrada.
- Os ranges das legendas para os gráficos de contorno foram baseados na velocidade máxima local de cada caso, e foi feito de forma comparativa para os casos em análise.
- A porcentagem de área efetiva de filtração, e a quantificação da área que não foi utilizada na filtração, foram feitas desconsiderando regiões do filtro onde a velocidade era entre 0 e 0,1m/s.
- O perfil de velocidade foi feito através de um plano traçado na direção XY e cortando o equipamento no meio da entrada.
- A queda de pressão foi feito através do *Fluent* pela diferença do valor da pressão total da entrada subtraindo pelas quatro saídas.
- A velocidade média também foi feita pelo mesmo *software* e foi calculada para o filtro.

Por causa da extensa dedução das fórmulas da metodologia, as explicações foram feitas de forma sucinta e objetiva, porém elas podem ser vistos em algumas literaturas como Malalasekera e Versteeg (2007), Maliska (2004), Guia Teórico do ANSYS FLUENT, dentre outros muitos autores, então para mais detalhes sugerem-se essas literaturas.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um dos principais problemas na indústria, associados aos sistemas de filtração através dos filtros de manga, é o desgaste pré-maturo dos tecidos, geralmente a parte mais cara do equipamento a longo prazo, que provoca frequentes paradas para manutenção e custos não previstos para empresa.

Assim, a fim de analisar como poderia ser melhorado o aproveitamento do meio filtrante, essa dissertação foi baseada nos estudos realizados por Marques (2014), Pereira (2015), Rocha *et al* (2013) e Rocha *et al* (2014), que utilizavam a técnica de CFD para análise de diferentes posicionamentos de entrada de fluido no equipamento.

Com os resultados obtidos por esses estudos, foram escolhidas três entradas que apresentaram os melhores resultados dentro dos parâmetros avaliados (fluidodinâmica, velocidade, queda de pressão e fluxo mássico), e foram utilizadas neste trabalho. Essas entradas foram denominadas de Convencional, Tripla Concêntrica e Simples.

A posição Convencional foi definida baseando-se no modelo utilizado na indústria moveleira, e suas variações foram definidas através da divisão da carga de entrada no sistema e para evitar o impacto direto no meio filtrante. A diferença do modelo utilizado e o de referência, é que foi feita uma diminuição na quantidade de mangas e dimensões do equipamentos.

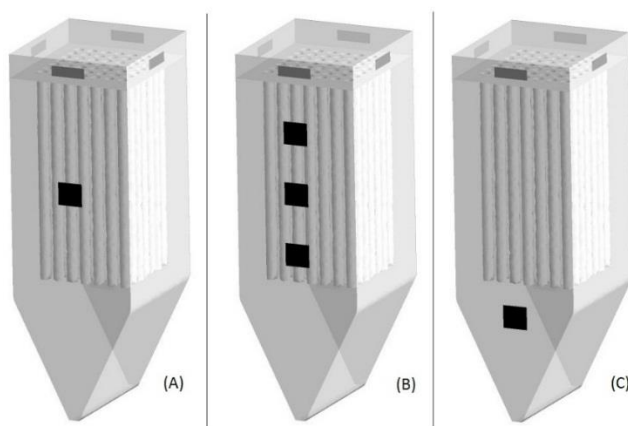


Figura 4.1 – Entradas a) Convencional e b) Tripla Concêntrica c) Simples. **Fonte:** Rocha (2013)

Para verificar se o *scale down* foi coerente, foi calculado a razão ar-pano e utilizou-se como referência os valores adotados na literatura, de forma comparativa, encontradas no Capítulo 2. Levando em consideração que a área superficial é igual para cada entrada, independente do *design*, a vazão depende apenas da variação da velocidade de entrada. Com isso têm-se as seguintes razões ar-pano, utilizando a Equação 2.1:

Tabela 4.1 – Razões ar-pano para os diferentes casos.

<i>Velocidade</i> (m/s)	<i>Área da</i> <i>entrada</i> (m ²)	<i>Vazão</i> <i>de ar</i> (m ³ /s)	<i>Área do</i> <i>meio filtrante</i> (m ²)	<i>Razão Ar-</i> <i>Pano</i> (cm ³ /s) /cm ²
10	0,12	1,2	72,6	1,65:1
15	0,12	1,8	72,6	2,47:1
20	0,12	2,4	72,6	3,31:1
25	0,12	3,0	72,6	4,13:1

Fonte: Autor (2017)

Os valores das razões ficaram dentro da faixa utilizada na indústria, sendo que para os três primeiros casos seriam considerados sistemas de baixa energia, e o último de alta. Assim o *scale down* feito pode ser considerado como coerente, e poderia ser utilizado para alguma aplicação industrial, respeitando todos os outros parâmetros de dimensionamento.

Com as entradas determinadas e as razões verificadas, foi analisado como a variação da velocidade de entrada influencia no desempenho da filtração e como a supressão de mangas afeta na área efetiva de filtração, tentando assim otimizar a velocidade, *design* e posicionamento das mangas, dentro das configurações propostas.

4.1 - Entrada Convencional

Para todos os casos foram gerados resultados utilizando os mesmos critérios de pós-processamento. Primeiramente avaliou-se a fluidodinâmica que a entrada proporciona no equipamento. Como se trata de um escoamento monofásico, não foi levado em consideração a obstrução do meio filtrante por partículas, o que faria com que o escoamento tomasse outros caminhos preferenciais.

Além do mais, vale ressaltar que devido ao esforço computacional e a limitação do equipamento para uma simulação mais refinada, o escoamento foi realizado com a penas 15s, o que poderia não ser suficiente para determinar o escoamento do fluido dentro do equipamento, porém, como não há obstrução dos poros do tecido, pode-se afirmar que as linhas de correntes são coerentes para analisar o comportamento do fluido.

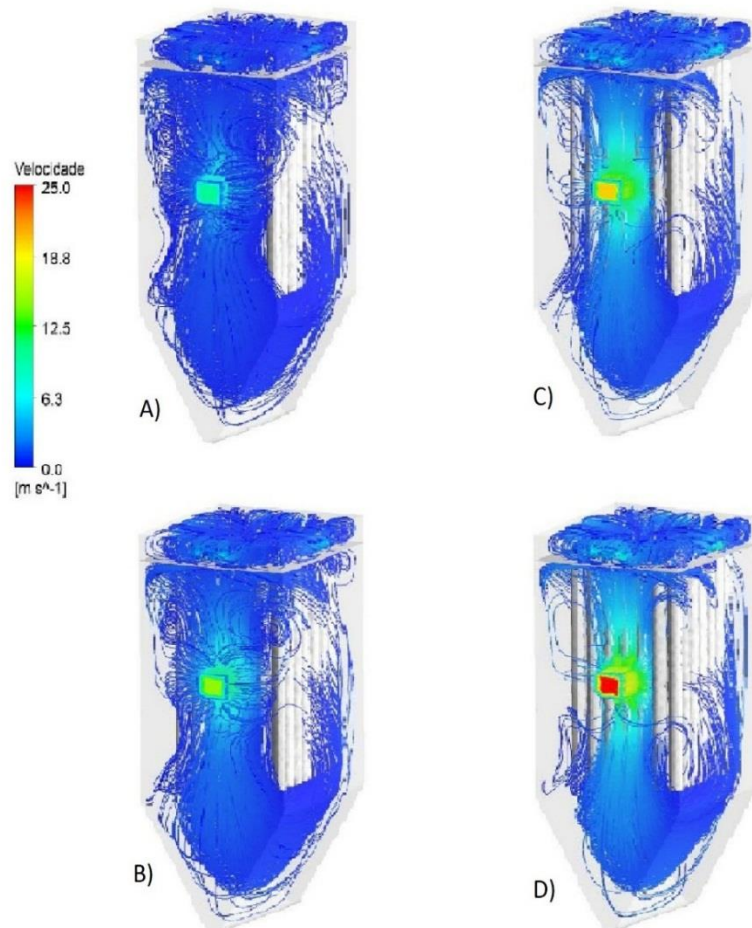


Figura 4.2 – Escoamento no equipamento. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s. **Fonte:** Autor (2017).

Com o aumentando da velocidade ocorre uma diminuição do efeito da expansão da entrada, fazendo com que ocorra uma concentração na região frontal. A falsa interpretação de que não há escoamento nas regiões laterais, por exemplo, à medida que a velocidade aumenta, é um efeito causado pela limitação do número de pontos de partida que foram analisados para as linhas de corrente, que foi determinada para uma melhor nitidez da análise do escoamento.

Outra característica do aumento da velocidade é que o choque contra as mangas faz com que, em todos os casos, haja uma redução na velocidade para o restante do escoamento. Além

dessa redução, quanto maior a velocidade de entrada, maior é a diferença entre a velocidade antes e após o choque.

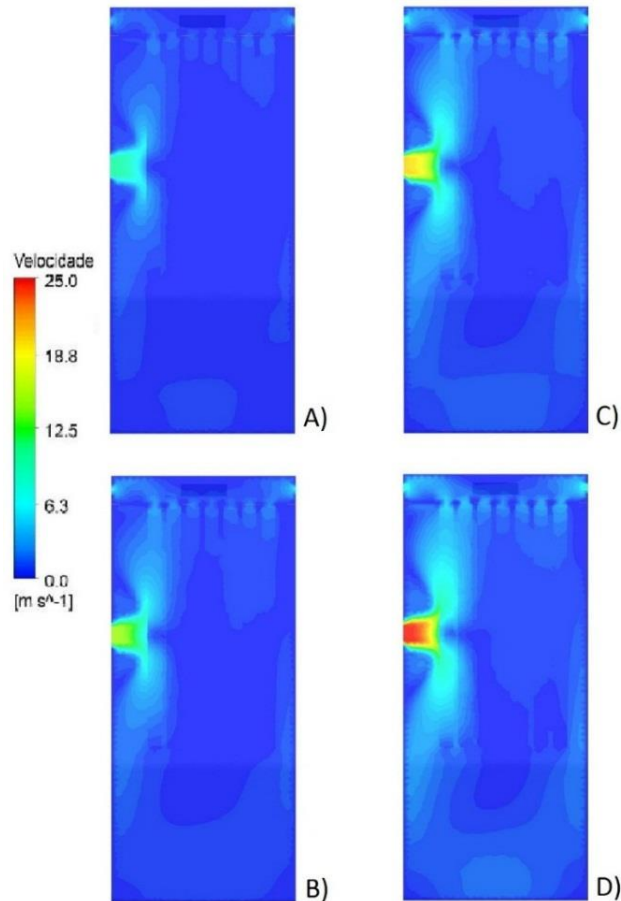


Figura 4.3 – Perfil velocidade de um plano no centro do equipamento, perpendicular à entrada. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s. **Fonte:** Autor (2017).

A velocidade sofre uma redução desde da entrada até o choque com as mangas. Assim a diferença entre as velocidades pré e pós choque, sendo a maior diferença para a entrada com 25m/s e velocidade pós choque de 7,2m/s, e a menor para a entrada de 10 m/s e impacto de 5,6 m/s. Então, aumentar a velocidade afim de melhorar a distribuição do escoamento, ocasiona apenas um aumento na velocidade de impacto e maior concentração da força desse efeito, uma vez que o jato é pungente e perde consideravelmente sua intensidade no primeiro impacto.

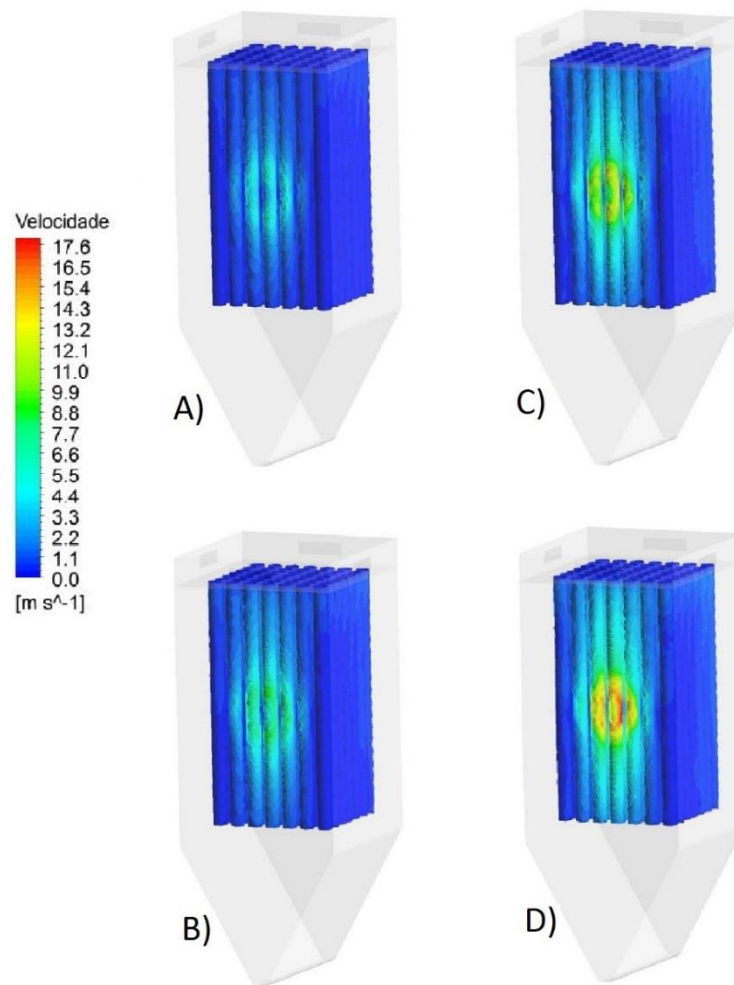


Figura 4.4 – Curvas contorno da velocidade local nas mangas. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s. **Fonte:** Autor (2017).

A concentração do jato e a proximidade com o meio filtrante fez com que as mangas recebessem uma carga localizada. Como discutido no Capítulo 2, a eficiência do filtro depende fortemente dessa velocidade. Ela é responsável por algumas características, como: a colmatação do meio filtrante tem um tempo menor para as maiores velocidades; uma maior profundidade de penetração acontece com as maiores velocidades, dificultando sua limpeza e causando uma maior perda de carga residual; maior é o consumo energético; dentre outras.

Logo, o aumento na velocidade de entrada ocasiona um aumento na velocidade de impacto, como era de se esperar, sendo a maior de 17,6 m/s, o que levaria a um tempo de filtração pequeno, aumentaria a penetração das partículas no tecido, dificultando a remoção da torta, além de aumentar a queda de pressão na filtração e após a remoção da torta (queda de pressão

residual), provocando uma redução na vida útil do tecido causada pela quantidade maior de ciclos de limpeza, se comparado com a de menor velocidade de impacto, 5,6 m/s.

Por outro lado, baixo valor de velocidade de filtração leva a um tempo de retenção maior, até atingir a colmatação, a interação entre a partícula e tecido tem menor penetrabilidade, facilitando a remoção da torta e diminuindo a queda de pressão residual, e o ciclo de limpeza é acionado em menor quantidade, fazendo com que o desgaste das mangas seja reduzido (DONOVAN, 1985),

Porém, a análise da velocidade de impacto, e seus efeitos, não é totalmente determinante para concluir qual seria melhor para utilizar na filtração, pois nesse caso a sua ação é pontual no meio filtrante. Assim a análise de outras variáveis ajudam a entender melhor a consequência do aumento ou diminuição da velocidade no meio.

Tabela 4.2 – Valores das variáveis para os diferentes caso de velocidade na Entrada Convencional.

<i>Velocidade de entrada(m/s)</i>	<i>Entrada Convencional</i>				
	ΔP (Pa)	v_{med} (m/s)	Área Meio Filtrante (m ²)	Área não utilizada (m ²)	Área Efetiva
10	36,2	0,40	72,6	4,7	93,53%
15	81,8	0,62	72,6	2,48	96,58%
20	144,3	0,84	72,6	1,06	98,54%
25	224,3	1,09	72,6	0,05	99,31%

Fonte: Autor (2017)

A maioria dos filtros coletores de pó, na prática, é operada com quedas de pressão entre 490 e 1961Pa (CAVASSENO, 1980). Essa faixa de operação, do ponto de vista econômico, mostrou ser a melhor, porque para operar com quedas de pressão mais altas fazem-se necessários equipamentos mais potentes e caros, com conseqüente aumento do consumo de energia.

Como discutido anteriormente, a relação entre a queda de pressão e velocidade é diretamente proporcional, logo ao aumentar a velocidade aumentasse também a queda de pressão. Os valores da tabela estão coerentes pois o escoamento é monofásico e feito em uma condição onde os tecidos estariam totalmente limpos, informação essa recebida por um engenheiro que trabalha em uma grande empresa no Espírito Santo.

Quando a torta atinge a melhor espessura para remoção, estabelecido pela queda de pressão máxima ou por um tempo de filtração pré-fixado, é imprescindível pelo ponto de vista operacional e econômico, a remoção periódica da camada de partículas coletadas. Essa ação é uma das questões mais importantes na operação de filtros de tecidos, pois provoca acréscimo significativo na queda de pressão residual, se realizada inadequadamente. Assim a velocidade de entrada de 25 m/s apresentaria um menor ciclo de limpeza, e como consequência uma maior queda de pressão residual e menor tempo de vida útil, pois um ciclo de limpeza muito curto danifica o filtro, reduzindo o período de vida útil do mesmo, além de um maior consumo energético.

Como há uma má distribuição de velocidade no filtro, a velocidade média nas mangas fica com valores bem distantes do valor da velocidade máxima de impacto. O aumento da velocidade média nas mangas ocorre pois o escoamento vence com maior facilidade a permeabilidade e percorre por maiores distâncias o meio filtrante antes do fluxo de ar sair.

A última variável, dentre as propostas neste trabalho, que ajuda a analisar se há um aumento da eficiência de filtração ao aumentar a velocidade, é a área que não foi utilizada do filtro, em relação a área disponível. O aumento da velocidade proporciona um maior aproveitamento da área disponível, chegando a um aproveitamento de área de 99,31%, ou seja 0,05m² não foi aproveitado dentro das condições especificadas, e a menor de 93,53%, com uma área de 4,7m², o que seria referente a área de quase 2 mangas.

Porém a má distribuição do escoamento faz com que haja uma concentração na face central da primeira fila de mangas. Assim a queda de pressão máxima seria atingida antes que houvesse a colmatção nas demais áreas, levando a um desgaste pontual e ocasione paradas desnecessárias.

Logo, mesmo que a velocidade mais branda não tenha apresentado uma boa distribuição e aproveitamento menor da área de filtração, apresentou uma diferença menor entre a velocidade média e a velocidade de impacto máxima, o que levaria a um tempo de filtração maior e com menor queda de pressão.

Assim uma velocidade de entrada de 15m/s seria a melhor das alternativas pelo bom aproveitamento da área filtrante, velocidades de impacto no filtro razoáveis, apresenta uma queda de pressão razoável o que levaria a um consumo energético aceitável e apresenta uma sobrecarga razoável na primeira fileira nas mangas, comparando com as demais entradas.

A análise foi realizada de forma superficial, não considerando por exemplo o tipo de tecido utilizado e partindo do pressuposto que todas as variáveis operacionais estão sendo obedecidas, como temperatura, etc. Logo, existiria diversos pontos a serem questionados, porém o foco o do trabalho é analisar como a aplicação das técnicas de CFD podem ajudar a analisar a influência de *designs* distintos nas variáveis operacionais do equipamento, e não se chegar a um resultado conclusivo sem antes realizar experimentos para validação das simulações.

4.2 – Entrada Tripla Concêntrica

Na entrada Tripla ocorreu a divisão da magnitude da velocidade de entrada entre as três entradas idênticas. Assim esperava-se que essa distribuição proporcionaria uma melhor distribuição na fluidodinâmica e menor sobrecarga nessa região.

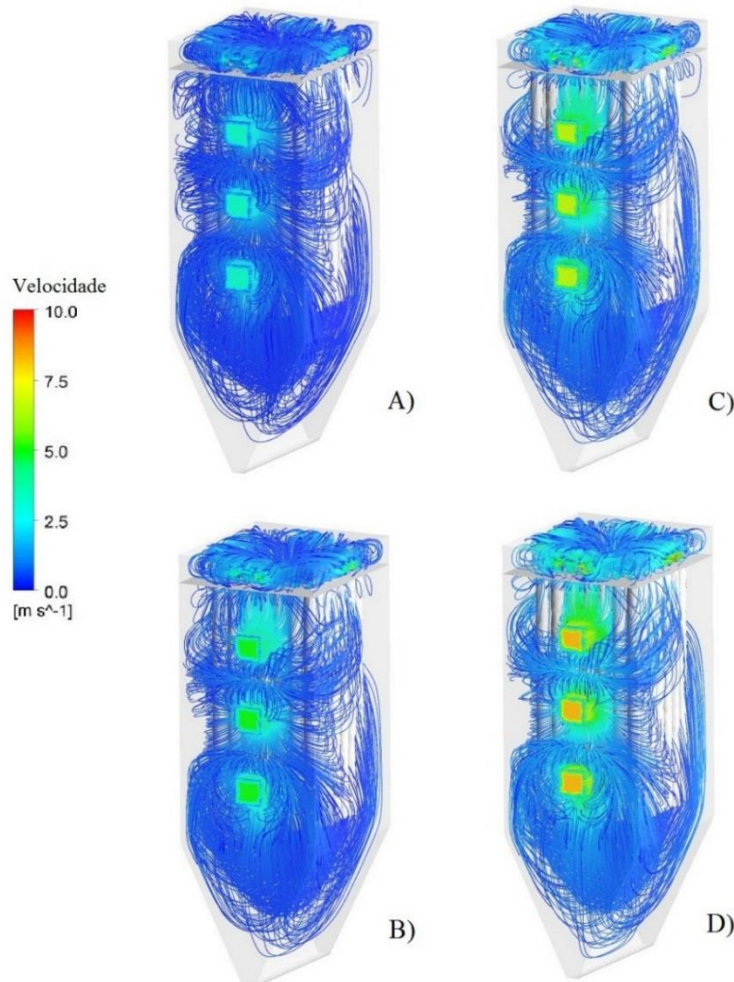


Figura 4.5 – Escoamento no equipamento. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s. **Fonte:** Autor (2017).

Um cuidado que deve ser tomado, por causa da divisão, é em relação ao range de velocidade da legenda, que sofreu uma redução significativa. Em termos de fluidodinâmica, à medida que aumentou a velocidade ocorreu uma tendência de escoamento mais centralizado, porém pela influência da divisão, ocorre uma concentração de fluxo na região mais no topo do filtro. Isso deve-se aos menores valores das velocidades, que com a expansão tendem a subir, somando-se as outras entradas de ar e concentrando-se no fluxo da entrada mais acima.

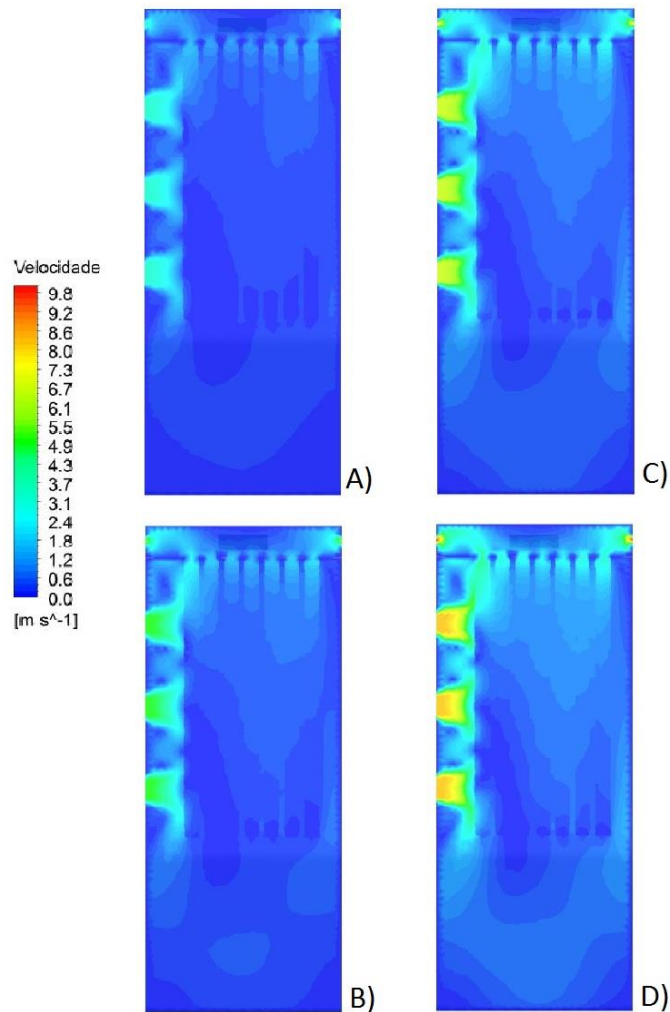


Figura 4.6 – Perfil velocidade de um plano no centro do equipamento, perpendicular as entradas. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s. **Fonte:** Autor (2017).

Esse aumento também faz com que o escoamento vença a permeabilidade mais facilmente, alcançando regiões mais ao centro do filtro e outras regiões de forma geral. O perfil da velocidade até o choque também sofre uma redução durante a trajetória, porém as diferenças entre as velocidades pré e pós choque são mais brandas, por causa da redução da magnitude das velocidades para cada entrada. Assim, a diferença para o caso de menor velocidade é de 3,33m/s

na entrada e 1,8 m/s de velocidade de impacto, e sendo a maior de 8,33m/s na entrada e 6,1 m/s no impacto.

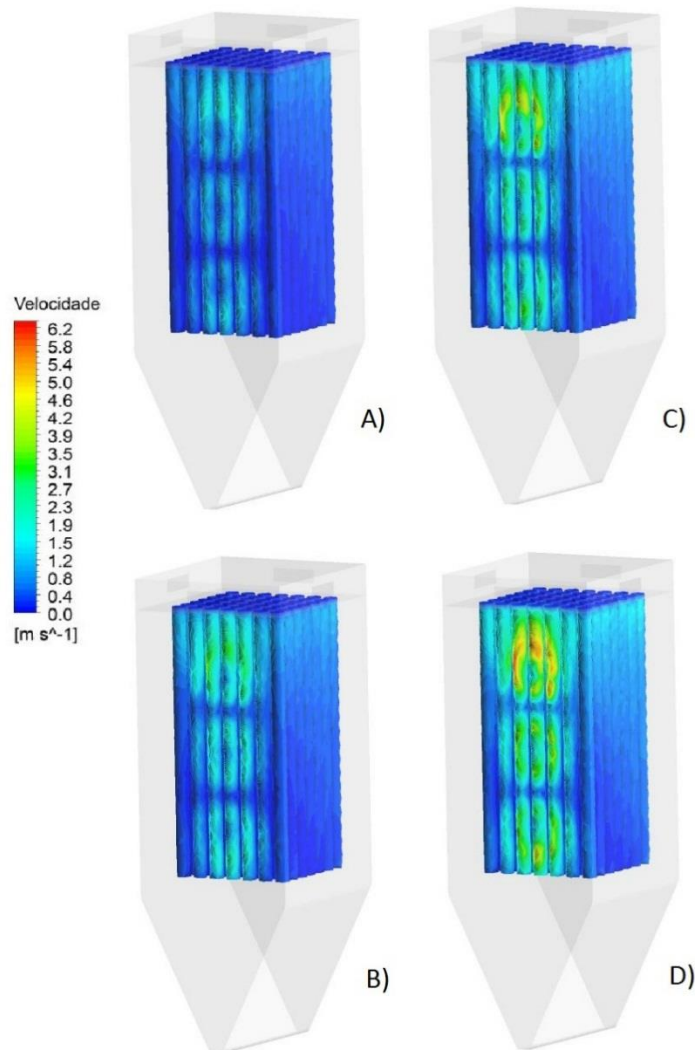


Figura 4.7 – Curvas contorno da velocidade local nas mangas. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s. **Fonte:** Autor (2017).

Um benefício da divisão da velocidade é que esse *design* sofre menos sobrecarga e melhor distribuição no filtro, podendo assim operar com velocidades de entrada maiores, aumentando o tempo de operação e da vida útil das mangas. Entretanto, somente a análise da velocidade não é suficiente para analisar se o aumento da velocidade leva a um melhor desempenho na filtração.

Tabela 4.3 – Valores das variáveis para os diferentes casos de velocidade na Entrada Tripla Concêntrica.

Velocidade de entrada(m/s)	Entrada Tripla Concêntrica				
	ΔP (Pa)	v_{med} (m/s)	Área Meio Filtrante (m ²)	Área não utilizada (m ²)	Área Efetiva
10	24,9	0,34	72,6	5,12	92,95%
15	53,4	0,49	72,6	3,2	95,59%
20	92,5	0,63	72,6	2,14	97,05%
25	142,5	0,77	72,6	1,5	97,93%

Fonte: Autor (2017)

Assim, o aumento da velocidade acarretou em um aumento da queda de pressão, da velocidade média nas mangas e do aproveitamento da área de filtração. Além disso, a entrada teve uma menor variação e valores de queda de pressão, o que significaria menor gasto energético, durante o mesmo tempo de operação, de acordo com a Equação 2.4.

A diferença do aproveitamento da área de filtração não teve grandes variações, especificamente entre o caso de 20m/s e 25m/s, que foi a menor. Portanto, sendo a queda de pressão entre esses dois casos menor para o primeiro, a tendência seria utiliza-la uma vez que a distribuição de fluxo não se diferem muito, e pelo gasto energético ser menor por conta da queda de pressão

Então uma velocidade de entrada de 20m/s seria a melhor das alternativas pelo bom aproveitamento da área filtrante, velocidades de impacto no filtro razoáveis, não tem uma grande diferença entre a velocidade máxima e a velocidade média, apresenta uma queda de pressão razoável o que levaria a um consumo energético aceitável e apresenta uma sobrecarga razoável na primeira fileira nas mangas, comparando com as demais entradas.

4.3 – Entrada Simples

A proposta da entrada é de evitar que o fluxo de ar entre colidindo diretamente com o meio filtrante e assim consiga atingir maior área com a expansão do fluxo. O impacto que antes ocorria nas mangas, fazia com que o fluxo perdesse a força e o escoamento seguia com uma menor intensidade. Sem essa colisão inicial, o escoamento percorre a caixa e colidi contra a parede, e no espalhamento do ar ocorre uma maior incidência do fluxo na região da tremonha, o que pode proporcionar uma ressuspensão das partículas que inicialmente poderiam ser depositados pela ação da gravidade.

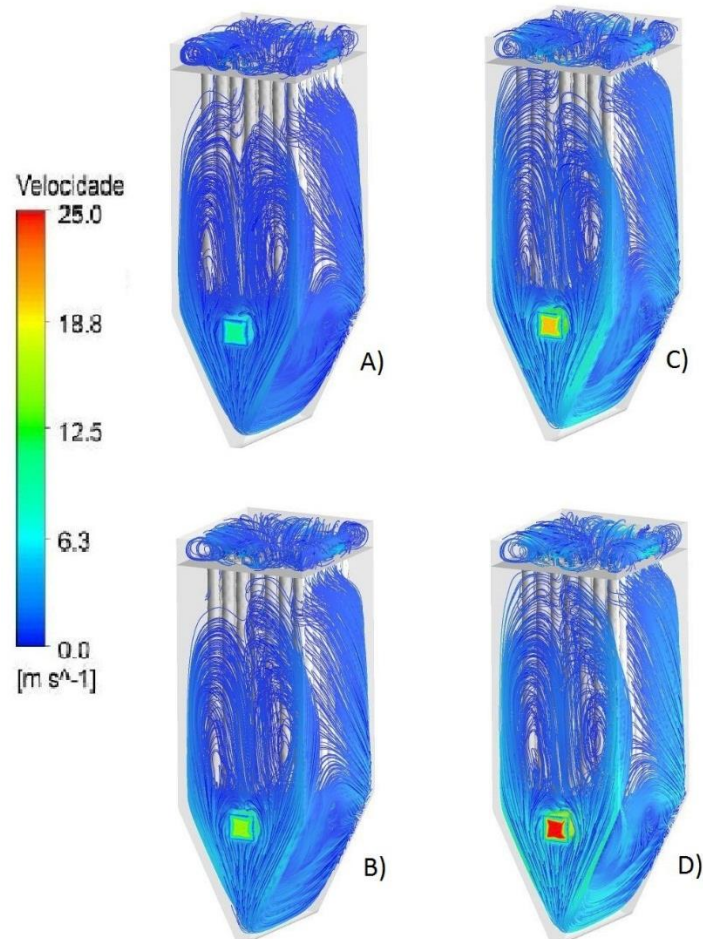


Figura 4.8 – Escoamento no equipamento. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s. **Fonte:** Autor (2017).

A distância entre a entrada e parede é suficiente para que o fluxo perca sua magnitude até a colisão. Assim, o espalhamento do ar, pós colisão, aumenta a medida com que há o aumento da velocidade, o que pode levar ao alcance de maiores áreas de contato com o filtro, porém favorece a ressuspensão das partículas depositadas, como dito anteriormente. Logo, uma sobrecarga desnecessária nos tecidos pode ocorrer devido a esse comportamento, o que desfavoreceria o aumento da velocidade.

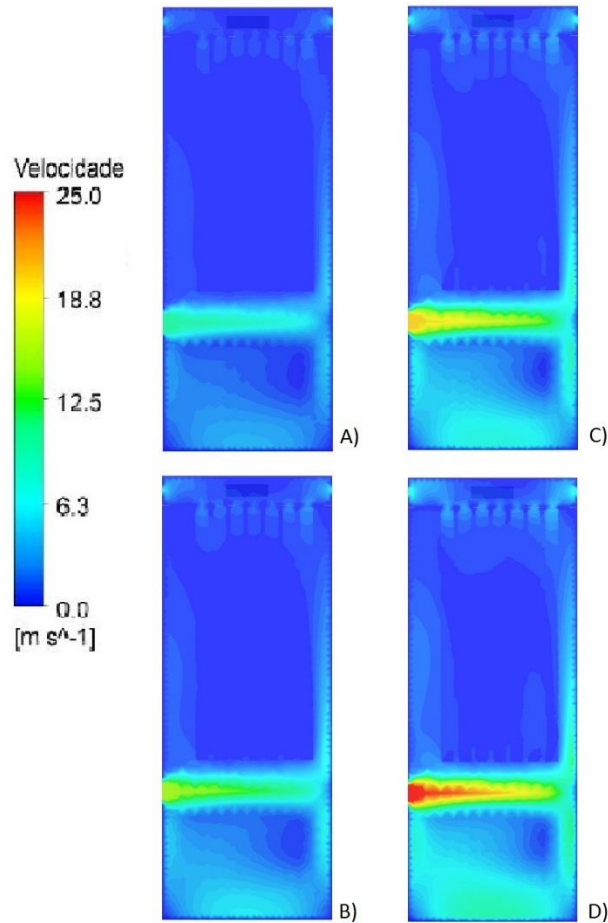


Figura 4.9 – Perfil velocidade de um plano no centro do equipamento, perpendicular à entrada. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s. **Fonte:** Autor (2017).

Apesar do aumento da velocidade estimular a ressuspensão, ela proporciona uma melhor distribuição do fluxo no meio, e com ênfase na magnitude das velocidades, chegando a uma velocidade máxima de impacto de 3,6m/s. Porém essa velocidade ocorre em uma região pequena do filtro, que seria a área logo após acontecer a colisão com a parede e encontrar o filtro

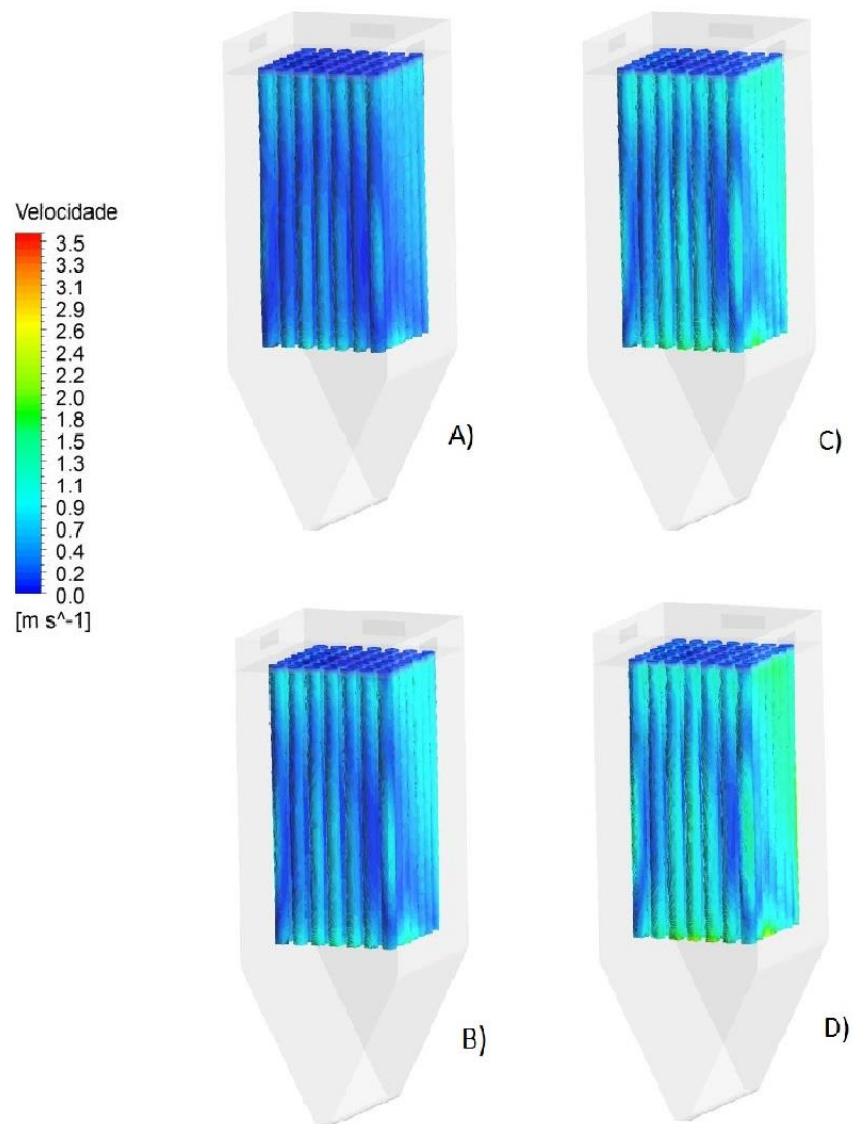


Figura 4.10 – Curvas contorno da velocidade local nas mangas. A) Velocidade de entrada de 10 m/s B) Velocidade de entrada de 15 m/s C) Velocidade de entrada de 20 m/s D) Velocidade de entrada de 25 m/s. **Fonte:** Autor (2017).

As baixas velocidades de impacto e boa distribuição do escoamento, atingindo praticamente todas as regiões do meio filtrante, fazem com que essa entrada tenha um potencial para ter resultados melhores do que as entradas já apresentadas. Porém, mais uma vez, a velocidade e distribuição do fluxo não são determinantes para afirmar que o aumento da velocidade seria fundamental para o aumento do aproveitamento da área de filtração.

Tabela 4.4 – Valores das variáveis para os diferentes caso de velocidade na Entrada Simples.

Velocidade de entrada(m/s)	Entrada Simples				
	ΔP (Pa)	v_{med} (m/s)	Área Meio Filtrante (m ²)	Área não utilizada (m ²)	Área Efetiva
10	36,3	0,28	72,6	10,3	85,81%
15	80,7	0,40	72,6	4,4	93,94%
20	142,2	0,53	72,6	2,08	97,13%
25	220,9	0,66	72,6	0,97	98,66%

Fonte: Autor (2017)

Assim, a entrada apresentou perdas de cargas um pouco elevada, considerando que não tem um obstáculo inicial, porém esse comportamento pode ser explicado pelo o encontro do fluxo de entrada com o fluxo que vem da colisão com a parede, podendo ocorrer uma região de vórtices e dificultando a fluência do escoamento.

As velocidades de impacto ficaram mais próximas das velocidades médias, apresentando assim uma menor sobrecarga e melhor distribuição no filtro, apesar do aproveitamento da área para velocidades de entrada menores não terem obtido um bom resultado, em relação as maiores. Logo, trabalhar com velocidades de entrada maiores, para esse *design*, pode ser considerado, uma vez que há um aumento do aproveitamento da área sem que haja um aumento significativo da velocidade de impacto no filtro, apesar de uma diferença considerável entre o penúltimo e último casos.

Assim uma velocidade de entrada de 20m/s seria a melhor das alternativas por promover bom aproveitamento da área filtrante, baixas velocidades de impacto no filtro, boa distribuição da velocidade no filtro, não ter uma diferença discrepante entre a velocidade máxima e a velocidade média, apresentar uma queda de pressão razoável o que levaria a um consumo energético aceitável e apresentar um média ressuspensão das partículas, se comparando com os demais casos.

4.4 - Análise Comparativa das Entradas

Com os resultados sendo apresentados separadamente, uma análise comparativa deve ser feita para as principais variáveis afim de verificar qual seria o *design* que proporcionaria melhores resultados em termos de aproveitamento da área de filtração disponível, velocidade de impacto e queda de pressão.

Tabela 4.5 – Área não utilizado do meio filtrante.**Área de Filtração não utilizada (m²)**

Caso	Convencional	Tripla Concêntrica	Simple
1	4,7	5,12	10,3
2	2,48	3,2	4,4
3	1,06	2,14	2,08
4	0,05	1,5	0,97

Fonte: Autor (2017)

Os casos são a representação da magnitude das velocidades, sendo Caso 1 para 10 m/s, Caso 2 para 15 m/s, Caso 3 para 20 m/s e Caso 4 para 25 m/s. Assim, a medida que a velocidade aumenta, também há o aumento do aproveitamento da área de filtração, devido a maior força que o escoamento tem para percorrer através dos tecidos.

A entrada Convencional é que apresenta maior aproveitamento do meio filtrante, devido a seu escoamento ter maior força de penetrabilidade, concentração do fluxo em forma de jato, menor influência da expansão do gás na entrada e a área de colisão ocorre totalmente no meio filtrante, seguido da entrada Tripla e a Simple, que supera a entrada Tripla nos dois últimos casos. Porém, em contra partida, a entrada Convencional apresenta a maiores velocidade de impacto.

Tabela 4.6 – Velocidade máxima no meio filtrante para as diferentes entradas.**Velocidade Máxima (m/s)**

Caso	Convencional	Tripla Concêntrica	Simple
1	5,6	1,8	1,5
2	8,7	3,5	2,2
3	12,5	4,9	2,9
4	17,9	6,1	3,5

Fonte: Autor (2017)

Vale ressaltar que essas velocidades são para regiões pontuais no filtro. Logo, comparando a entrada Convencional com as demais, sua menor velocidade máxima, apresentada no

Caso 1, é quase maior que todas as velocidades máximas para todos os casos das outras entradas, sendo que também a entrada com a maior sobrecarga pontual no filtro, por conta da concentração do jato.

Como discutido já discutido, altos valores na velocidade de filtração levam a um tempo de filtração pequeno, entretanto aumentam a penetração das partículas no tecido, o que dificultaria a remoção da torta, além de aumentar a queda de pressão durante a filtração e após a remoção da torta (queda de pressão residual), provocando uma redução na vida útil do tecido.

Assim, analisando a velocidade e área efetiva, pode-se dizer que o Caso 3 para a entrada Simples apresenta o resultado mais interessante, pois trabalha com uma velocidade de impacto baixa, com velocidade média e aproveitamento da área filtrante satisfatórios, promovendo assim menor penetrabilidade e maior facilidade de limpeza.

Em relação a avaliação da queda de pressão, segue uma tabela abaixo.

Tabela 4.7 – Queda de pressão para as diferentes entradas.

Queda de Pressão (Pa)			
Caso	Convencional	Tripla Concêntrica	Simples
1	36,2	24,9	36,3
2	81,8	53,4	80,7
3	144,3	92,5	142,2
4	224,3	142,5	220,9

Fonte: Autor (2017)

A entrada Tripla apresentou menor queda de pressão, devido a menor magnitude das velocidades em suas entradas. Já a Simples, apesar de não ter uma obstáculo inicial como as demais, apresentou queda de pressão similar, o que poderia indicar que a recirculação do escoamento pudesse está influenciando nesse fator.

Portanto em termos de gastos energéticos a entrada Tripla poderia apresentar os menores, utilizando a Equação 2.4, para um mesmo período de operação das outras, mas a melhor distribuição do fluxo da Simples é determinante para desconsiderar essas pequenas diferenças, para os mesmos casos, e ser a escolhida dentre as três.

Existem diversos pontos a serem questionados, mas o fato é que dado os resultados da simulação, a entrada Simples apresentou um melhor desempenho, dentro dos parâmetros propostos. Como essa alimentação tende a diminuir o número de limpezas do filtro, sistema que

provoca movimento repetitivo aplicado nas mangas ocasionando uma diminuição da elasticidade do tecido, podendo causar rupturas nas mangas, ela promoveria um maior tempo de vida útil das mangas, gasto energético razoável e ótimo aproveitamento da área filtrante.

4.5 - Supressão de Mangas

A variação de velocidade afeta diretamente no aproveitamento da área de filtração, como visto anteriormente. Porém, um aumento excessivo dessa variável na busca da total utilização dessa área disponível, pode levar a velocidades de impactos que seriam prejudiciais para o filtro, além da distribuição do escoamento não ser homogênea.

Logo, com a intenção de se trabalhar com a menor velocidade possível e visando o máximo aproveitamento do meio filtrante, utilizou-se os casos de entrada de 10m/s, que obteve menor aproveitamento da área do filtro, para verificar como a supressão das mangas pode influenciar no aproveitamento do filtro e na tentativa de redução de custo sem perder a eficiência da filtração.

Assim, a quantidade de mangas foi reduzida e alteradas de acordo com as configurações propostas, definidas pelo fechamento dos buracos no espelho, e alterando a condição de *porous jump* para *interior* nas mangas que não iriam exercer mais a função de filtro. Dessa forma, foi possível manter a quantidade de elementos para a simulação, sem alteração da confiabilidade dos resultados.

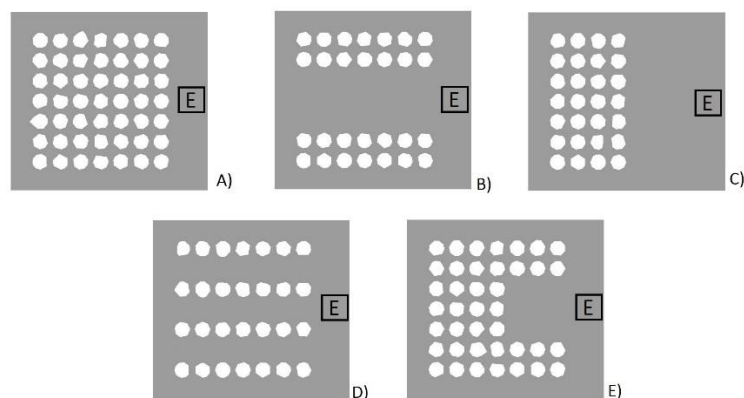


Figura 4.11 – Diferentes configurações de distribuição das mangas, onde a letra E significa o local da entrada do escoamento. A) Original B) Central C) Frontal D) Alternada E) Mista. **Fonte:** Autor (2017).

A escolha dessas configurações foram baseadas no comportamento do fluido no escoamento das entradas e pela posição das entradas. A denominação das configurações foi feita baseada na remoção das mangas. Portanto, na configuração Central removeu-se as mangas afim das entradas Convencional e Tripla evitarem a colisão no filtro. Na configuração Frontal a ausência de mangas na frente do filtro foi para ver o comportamento da expansão do gás e diminuir a intensidade do impacto. Na configuração Alternada o posicionamento de fileira sim, outra não, foi para tentar aumentar a circulação do fluxo no meio filtrante. E por fim, na configuração Mista tentou diminuir o impacto inicial e aumentar a expansão do ar para abranger maior área de contato com o filtro.

Para verificar se a alteração nas configurações ficaram coerentes, em relação a razão ar-pano, foi novamente calculado a partir da Equação 2.1. Levando em consideração que a área superficial é igual para cada entrada, independente do *design*, foi considerado a vazão constante.

Tabela 4.8 – Razões ar-pano para as diferentes configurações.

<i>Configuração</i>	<i>Área da entrada (m²)</i>	<i>Vazão de ar (m³/s)</i>	<i>Área do meio filtrante (m²)</i>	<i>Razão Ar-Pano (cm³/s) /cm²</i>
<i>Original</i>	0,12	1,2	72,6	1,65:1
<i>Mista</i>	0,12	1,2	59,28	2:1
<i>Frontal</i>	0,12	1,2	41,48	2,9:1
<i>Central</i>	0,12	1,2	41,47	2,9:1
<i>Alternada</i>	0,12	1,2	41,47	2,9:1

Fonte: Autor (2017)

Os valores das razões ficaram dentro da faixa utilizada na indústria, sendo que para todos casos seriam considerados sistemas de baixa energia. Assim a alteração das configurações feitas podem ser considerados como coerentes, e poderiam ser utilizado para alguma aplicação industrial, respeitando todos os outros parâmetros de dimensionamento.

4.5.1 – Entrada Convencional

A entrada foi o que apresentou menor área não aproveitada para a velocidade de entrada de 10m/s, porém teve a maior velocidade de impacto e maior concentração do fluxo no meio filtrante, o que pode acarretar, como discutido anteriormente, tempo de filtração pequeno, acionamento precoce do mecanismo de limpeza, redução da vida útil das mangas, dentre outros efeitos.

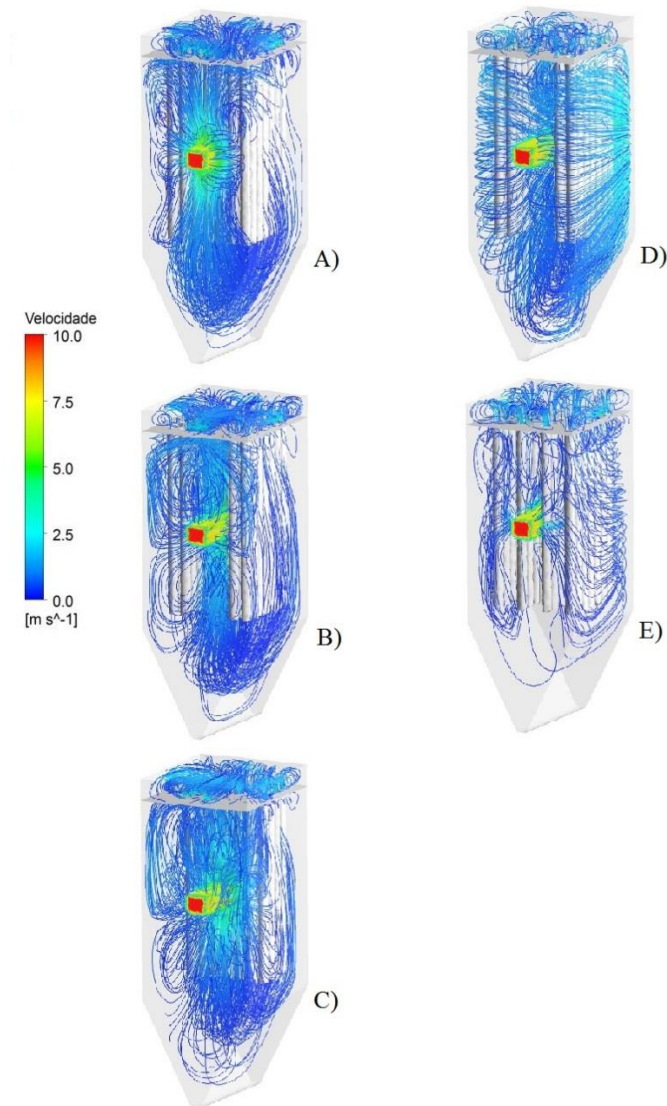


Figura 4.12 – Fluidodinâmica no equipamento para a entrada Convencional. A) Entrada Original B) Entrada Mista C) Entrada Frontal D) Entrada Central E) Entrada Alternada **Fonte:** Autor (2017).

A fluidodinâmica foi realizada da mesma forma para os resultados anteriores, utilizando 600 pontos a partir da entrada. A modificação da configuração das mangas afeta o caminho

preferencial do escoamento, fazendo com que haja um maior aproveitamento das regiões laterais, sendo a Central a configuração que teve maior exploração da caixa como um tudo.

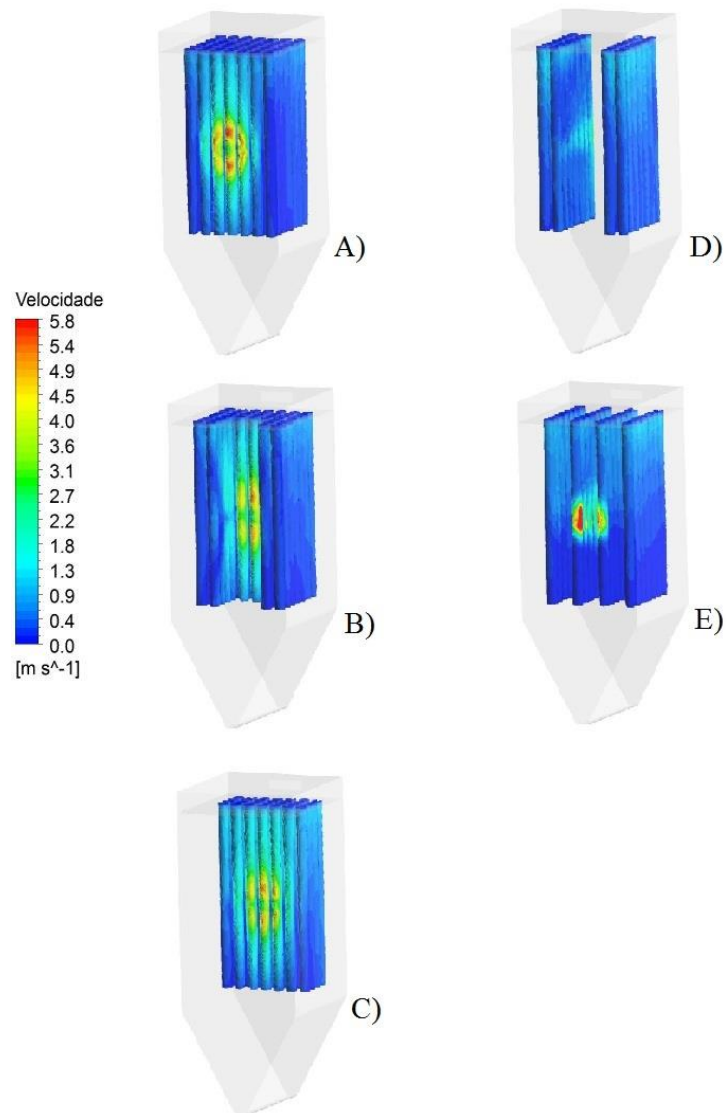


Figura 4.13 – Distribuição da velocidade nas mangas para as diferentes configurações na Entrada Convencional. A) Original B) Mistra C) Frontal D) Central E) Alternada. **Fonte:** Autor (2017).

O range da velocidade foi baseada na velocidade máxima da entrada sem alteração no meio filtrante. As configurações propostas apresentaram uma diminuição da velocidade máxima, com exceção da Alternada, e melhor distribuição ao longo do meio filtrante. Isso levaria uma menor sobrecarga pontual, mesmo que ainda algumas apresentem uma concentração do fluxo de entrada.

Da mesma forma para a variação da velocidade, a análise de outras variáveis se faz necessária para verificar a queda de pressão e aproveitamento da área de filtração, levando em consideração a diminuição da área disponível pela retirada de mangas.

Tabela 4.9 – Valores das variáveis para as diferentes configurações na Entrada Convencional.

<i>Entrada Convencional</i>					
	v_{med} (m/s)	ΔP (Pa)	Área do Meio Filtrante (m ²)	Área não utilizada (m ²)	Área Efetiva
<i>Original</i>	0,40	36,2	72,6	4,7	93,53%
<i>Mista</i>	0,48	37,4	59,28	4,53	92,36%
<i>Frontal</i>	0,65	39,6	41,48	1,3	96,87%
<i>Central</i>	0,48	39,9	41,47	0,38	99,08%
<i>Alternada</i>	0,47	38,2	41,47	9,26	77,67%

Fonte: Autor (2017)

A velocidade média nas mangas não sofreram variações consideráveis, porém a supressão de mangas proporcionou mais espaço para o escoamento e maior contato, o que justifica o aumento em todas as configurações, especialmente na Frontal. A queda de pressão não sofreu variação significativa, logo todas as configurações apresentariam gastos energéticos semelhantes inicialmente.

Em relação a eficiência de filtração, a configuração Central apresentou melhor aproveitamento da área, praticamente com 6% a mais de aproveitamento percentual do que a Original sendo que teve uma redução de área de 43,9%. A ausência da colisão para essa configuração levou a uma maior circulação do escoamento, o que permitiu esse aproveitamento da área.

Então, a configuração Central apresentou maior potencial para otimizar a entrada Convencional a uma configuração com melhor aproveitamento do meio filtrante, melhor distribuição da velocidade e queda de pressão baixa. Esses fatores levariam a um ciclo mais longo, aumento da vida útil das mangas, menores gastos energéticos e menores custos por causa da supressão.

4.5.2 – Entrada Tripla Concêntrica

A divisão da velocidade de entrada de 10m/s faz com que o escoamento seja mais brando e tenha baixas velocidades internas. Essa característica leva a baixa velocidade de impacto, o que pode aumentar consideravelmente o tempo de retenção e a formação da torta incorretamente, prejudicando a filtração e aumentando o gasto energético. As configurações Central e Frontal, apresentaram um melhor aproveitamento fluidodinâmico do meio filtrante.

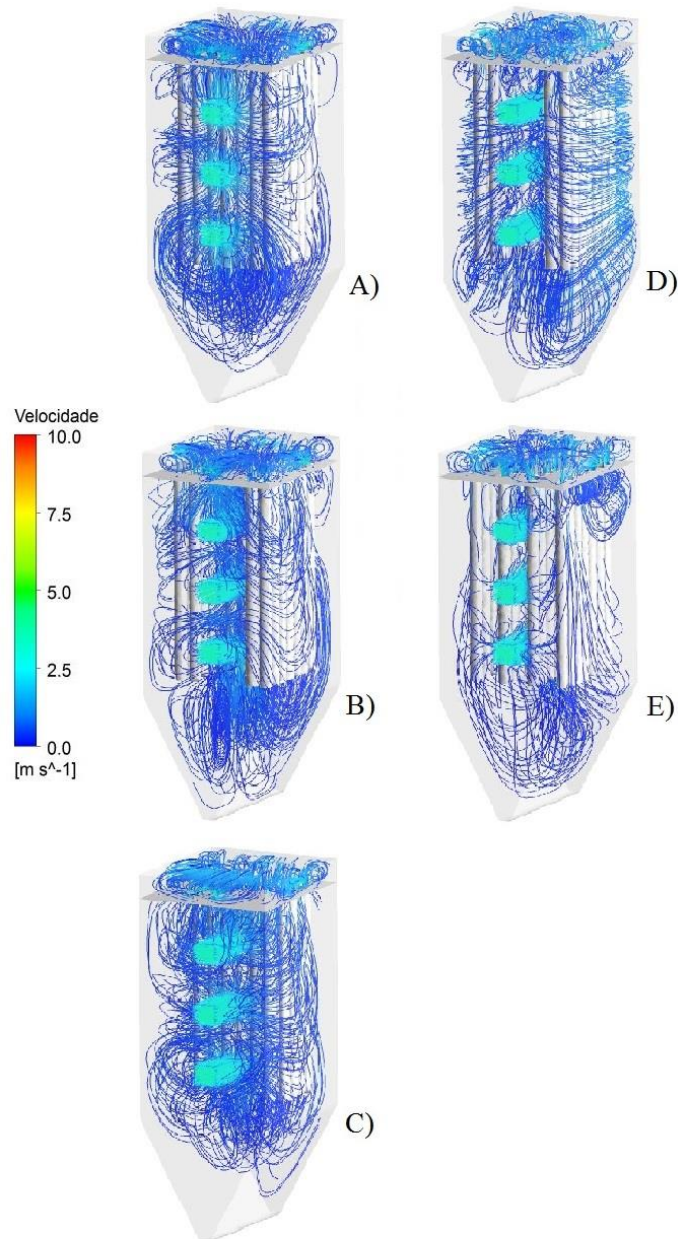


Figura 4.14 – Fluidodinâmica no equipamento para a entrada Tripla. A) Entrada Original B) Entrada Mista C) Entrada Frontal D) Entrada Central E) Entrada Alternada **Fonte:** Autor (2017).

O range da velocidade foi baseada na velocidade máxima da entrada Original. As configurações propostas apresentaram uma diminuição da velocidade máxima e melhor distribuição ao longo do meio filtrante. Isso leva a uma menor sobrecarga pontual, principalmente para a Central, que tem ausência da colisão.

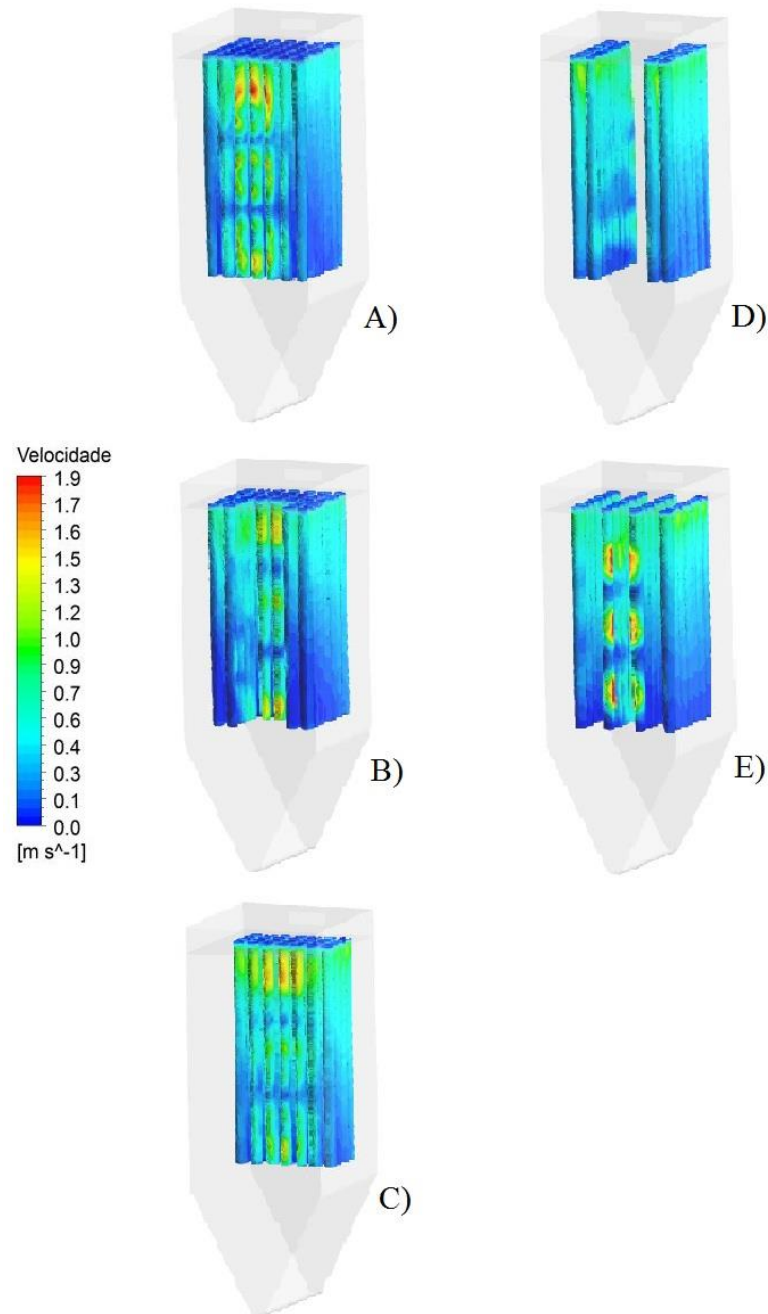


Figura 4.15 – Distribuição da velocidade nas mangas para as diferentes configurações na Entrada Tripla Concêntrica. A) Original B) Mistra C) Frontal D) Central E) Alternada. **Fonte:** Autor (2017).

A análise de outras variáveis se faz necessária para verificar a queda de pressão e a eficiência de filtração, levando em consideração a diminuição da área disponível pela retirada de mangas.

Tabela 4.10 – Valores das variáveis para os diferentes caso de supressão de vendas na Entrada Tripla.

<i>Entrada Tripla Concêntrica</i>					
	v_{med} (m/s)	ΔP (Pa)	Área do Meio Filtrante (m ²)	Área não utilizada (m ²)	Área Efetiva
<i>Original</i>	0,34	24,9	72,6	5,12	92,95%
<i>Mista</i>	0,37	25,7	59,28	6,87	88,41%
<i>Frontal</i>	0,53	30,8	41,48	1,24	97,01%
<i>Central</i>	0,48	28,6	41,47	4,17	89,94%
<i>Alternada</i>	0,44	27,9	41,47	5,77	86,09%

Fonte: Autor (2017)

A velocidade média nas mangas sofreram variações pequenas, causado pelo maior espaço para o escoamento e maior contato com o filtro. A queda de pressão não sofreu variação significativa, logo todas as configurações apresentariam gastos energéticos semelhantes inicialmente.

Em relação a eficiência de filtração, a configuração Frontal apresentou melhor aproveitamento da área, praticamente com 4% a mais de aproveitamento percentual do que a Original sendo que teve uma redução de área de 43,9%. A colisão para essa configuração foi benéfica pois permitiu uma retenção maior do escoamento, o que permitiu melhor aproveitamento do filtro.

Então, a configuração Frontal apresentou maior potencial para otimizar a entrada Tripla, com melhor aproveitamento do meio filtrante, melhor distribuição da velocidade e queda de pressão baixa. Esses fatores levariam a um ciclo mais longo, aumento da vida útil das mangas, menores gastos energéticos e menores custos por causa da supressão.

4.5.3 – Entrada Simples

Essa entrada apresentou o melhor custo benefício dentre as propostas com a variação de velocidade, porém a entrada com 10m/s apresentou o pior resultado de eficiência da área de filtração dentre eles. Sem a colisão com o meio filtrante, o escoamento colidi contra a parede, podendo proporcionar uma ressuspensão das partículas. As configurações propostas podem fazer com que essa possível ressuspensão seja melhor, ou pior, aproveitada pela filtração.

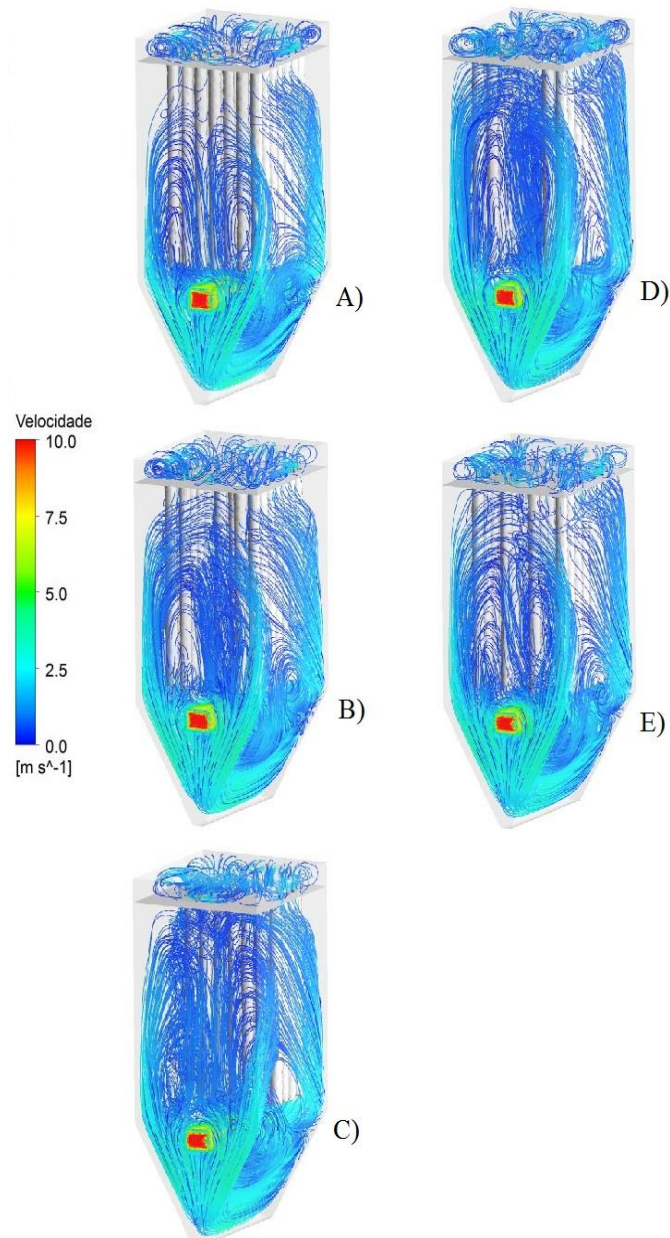


Figura 4.16 – Fluidodinâmica no equipamento da entrada Simples. A) Entrada Original B) Entrada Mista C) Entrada Frontal D) Entrada Central E) Entrada Alternada **Fonte:** Autor (2017).

O range da velocidade foi baseada na velocidade máxima da entrada Original. De forma geral, a diminuição da área permitiu uma melhor distribuição da velocidade no filtro, porém com um aumento de intensidade em algumas regiões, se comparado a configuração Original.

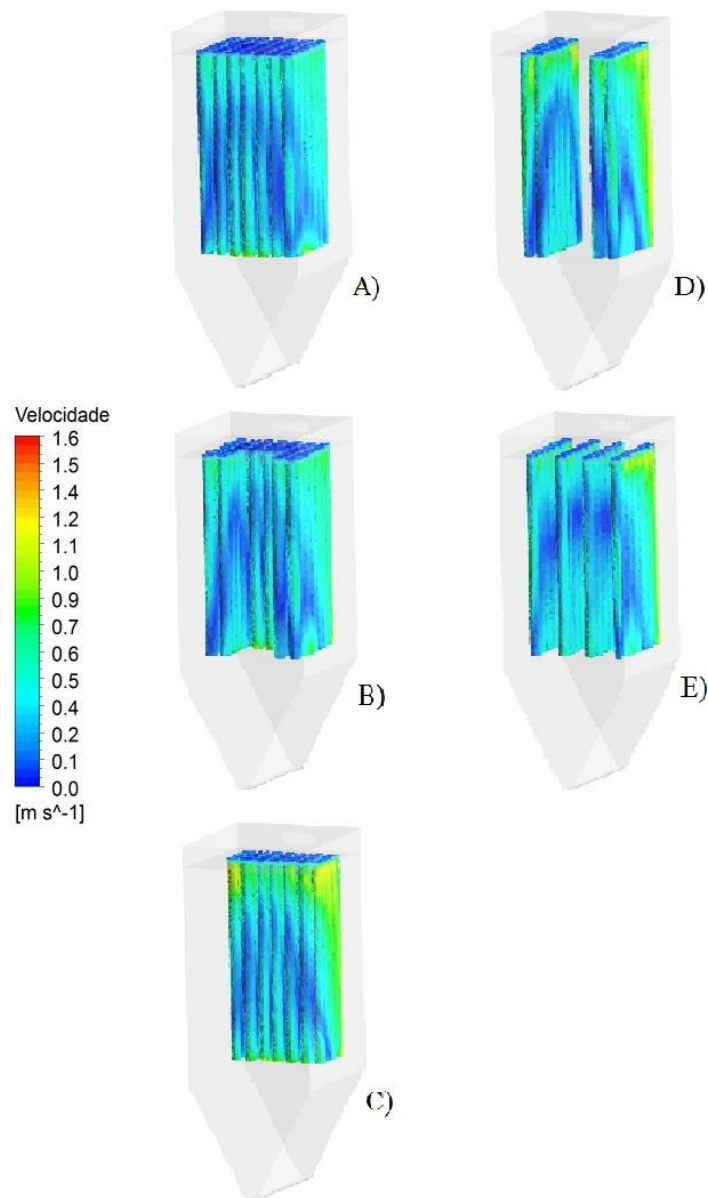


Figura 4.17 – Distribuição da velocidade nas mangas para as diferentes configurações na Entrada Simples. A) Original B) Mistra C) Frontal D) Central E) Alternada. **Fonte:** Autor (2017).

A análise de outras variáveis se faz necessária para verificar o comportamento da queda de pressão e da eficiência de filtração, levando em consideração a diminuição da área disponível pela supressão.

Tabela 4.11 – Valores das variáveis para os diferentes caso de supressão de vendas na Entrada Simples.

<i>Entrada Simples</i>					
	v_{med} (m/s)	ΔP (Pa)	Área do Meio Filtrante (m ²)	Área não utilizada (m ²)	Área Efetiva
<i>Original</i>	0,28	36,3	72,6	10,3	85,81%
<i>Mista</i>	0,33	36,5	59,28	7,58	87,21%
<i>Frontal</i>	0,48	40,0	41,48	5,71	86,23%
<i>Central</i>	0,44	38,0	41,47	5,17	87,53%
<i>Alternada</i>	0,41	37,8	41,47	2,41	94,19%

Fonte: Autor (2017)

A velocidade média nas mangas não sofreram variações significativas, a não em relação a Original causa pela supressão, proporcionando maior espaço para o escoamento e maior contato com o filtro. A queda de pressão não sofreu variação significativa, logo todas as configurações seriam atrativas de se trabalhar, em termos de gastos energéticos.

Em relação a eficiência de filtração, a configuração Alternada apresentou melhor aproveitamento da área, praticamente com 8% a mais de aproveitamento percentual do que a Original sendo que teve uma redução de área de 43,9%. Para todos os casos o escoamento chegava através da recirculação causada pela colisão na parede, e essa configuração conseguiu um maior contato com o fluido, apresentando uma boa destruição de velocidade média e de impacto.

Então, a configuração Alternada apresentou maior potencial para otimizar a entrada Tripla, com melhor aproveitamento do meio filtrante, melhor distribuição da velocidade e queda de pressão baixa. Esses fatores levariam a um ciclo mais longo, aumento da vida útil das mangas, menores gastos energéticos e menores custos por causa da supressão.

4.5.4 – Análise Comparativa das Diferentes Configurações e Entradas

Em uma análise generalizada, as propostas de alteração de configurações da entrada Original proporcionaram uma otimização da área filtrante, e principalmente sob o ponto de vista econômico pela redução na quantidade de mangas, o que causaria menores custos de manutenção e menores tempos de paradas para as mesmas.

Porém uma análise de qual *design* se sobressai se faz necessário para concluir qual o seria a entrada e configuração que proporcionaria maior potencial para ser construída e testada experimentalmente, para uma possível aplicação industrial.

Tabela 4.12 – Área não utilizado do meio filtrante para as diferentes configurações

Área de Filtração não utilizada (m²)

Configuração	Convencional	Tripla Concêntrica	Simples
<i>Original</i>	4,7	5,12	10,3
<i>Mista</i>	4,53	6,87	7,58
<i>Frontal</i>	1,3	1,24	5,71
<i>Central</i>	0,38	4,17	5,17
<i>Alternada</i>	9,26	5,77	2,41

Fonte: Autor (2017)

A entrada Convencional com a configuração Central apresentou o maior aproveitamento do meio filtrante, pois o jato de entrada sem a colisão com o meio, tem força suficiente para colidir na parede e recircular, aproveitando praticamente todo o meio filtrante. Porém, em contra partida, a entrada Convencional apresenta a maiores velocidade de impacto.

Tabela 4.13 – Velocidade máxima no meio filtrante para as diferentes configurações.

Velocidade Máxima (m/s)

Configuração	Convencional	Tripla Concêntrica	Simples
<i>Original</i>	5,8	1,9	1,6
<i>Mista</i>	5,1	1,6	1,1
<i>Frontal</i>	5,0	1,7	1,5
<i>Central</i>	3,0	1,2	1,5
<i>Alternada</i>	8,7	2,8	1,3

Fonte: Autor (2017)

Comparando a entrada Convencional com as demais, em todos os casos apresenta maior velocidade, além de ser concentrado, o que levaria a um tempo de filtração pequeno, entretanto aumentam a penetração das partículas no tecido, o que dificultaria a remoção da torta, aumentando a queda de pressão durante a filtração e após a remoção da torta, provocando uma redução na vida útil do tecido. Já a entrada Simples apresenta pouca variação entre suas velocidades máximas, e pouca diferença para suas velocidades médias, confirmando uma homogeneidade maior.

Assim, analisando a velocidade e área efetiva, pode-se dizer que a entrada Simples com a configuração Alternada apresenta o resultado mais interessante, pois trabalha com uma velocidade de impacto baixa, boa destruição no filtro e aproveitamento da área filtrante satisfatórios, promovendo assim menor penetrabilidade e maior facilidade de limpeza.

Em relação a avaliação da queda de pressão, segue uma tabela abaixo.

Tabela 4.14 – Queda de pressão para as diferentes configurações.

<i>Configuração</i>	<i>Queda de Pressão (Pa)</i>		
	<i>Convencional</i>	<i>Tripla Concêntrica</i>	<i>Simples</i>
<i>Original</i>	36,2	24,9	36,3
<i>Mista</i>	37,4	25,7	36,5
<i>Frontal</i>	39,6	30,8	40,0
<i>Central</i>	39,9	28,6	38,0
<i>Alternada</i>	38,2	27,9	37,8

Fonte: Autor (2017)

A entrada Tripla apresentou menor queda de pressão, devido a menor magnitude das velocidades em suas entradas. Já a Simples, apesar de não ter um obstáculo inicial como as demais, apresentou queda de pressão similar, o que poderia indicar que a recirculação do escoamento pudesse estar influenciando nesse fator. Mesmo com a variação das configurações, para todas as entradas, não houve uma variação significativa.

Portanto em termos de gastos energéticos a entrada Tripla poderia apresentar menores gastos, utilizando a Equação 2.4, para um mesmo período de operação das outras, mas a melhor distribuição do fluxo da Simples, principalmente para configuração Alternada, é determinante para desconsiderar essas pequenas diferenças, e ser a escolhida dentre todas as opções.

Existem diversos pontos a serem questionados, mas o fato é que dado os resultados da simulação, a entrada Simples com configuração Alternada, com uma redução de 43,9% da área, apresentou um melhor desempenho, dentro dos parâmetros propostos. Como essa alimentação tende a diminuir o número de limpezas do filtro, sistema que provoca movimento repetitivo aplicado nas mangas ocasionando uma diminuição da elasticidade do tecido, podendo causar rupturas nas mangas, ela promoveria um maior tempo de vida útil das mangas, gasto energético razoável e ótimo aproveitamento da área filtrante.

Capítulo 5

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos por meio da técnica de CFD proporcionaram uma análise qualitativa e quantitativa da influência das entradas de gás no filtro de mangas, permitindo a visualização da fluidodinâmica, cálculo de velocidades e queda de pressão, e permite testes de diferentes modificações de projeto. Ela torna possível visualizar as deficiências do sistema em detalhe, e é muito mais eficiente e rentável do que escala de modelos tradicionais ou escala real.

Assim, com o auxílio dessa ferramenta, e sua confiabilidade, foi possível concluir que a variação de velocidade influencia diretamente na variação de queda de pressão, como proposto através de equacionamento, e na área de filtração. O *design* de entrada Simples, mesmo que seu escoamento proporcionasse uma maior ressuspensão de partículas, apresentou melhores resultados com entrada de 20m/s, pois tende a diminuir o número de limpezas do filtro, aumentando o tempo de vida útil das mangas, com um gasto energético razoável e ótimo aproveitamento da área filtrante.

Para a análise de supressão de mangas a entrada Simples com configuração Alternada, com uma redução de 43,9% da área, apresentou um melhor desempenho, dentro dos parâmetros propostos. Essa alimentação tende a diminuir o número de limpezas do filtro, promovendo um maior tempo de vida útil das mangas, gasto energético razoável e ótimo aproveitamento da área filtrante.

Portanto a utilização da técnicas CFD se fazem fundamentais para economia de tempo e dinheiro, porém sempre com o cuidado de se fazer um estudo do caso para que a modelagem está coerente para geração de resultados mais exatos possíveis.

ETAPAS FUTURAS

Um refinamento na malha e a adição de partículas seriam as principais ações que iriam agregar na investigação de como essas variáveis seriam afetadas pela a obstrução dos poros das mangas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSEN, B.O.; NIELSEN, N.F.; WALTHER, J.H.** “Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters”. Powder Technology, Volume 291, April 2016, Pages 284–298. Disponível em: doi: 10.1016/j.powtec.2015.12.028
- BARNETT, T.** "improving the performance of fabric filter dry dust collection equipment". *Filtration and Separation*, p. 28 – 32, 2000.
- BATISTONI, C.** “Padronização e desenvolvimento de Filtro de Mangas”. Trabalho de Diplomação (Título de tecnólogo em Manutenção Industrial), Universidade Tecnologia do Paraná, Pato Branco. 47p. 2011.
- BERNABE, A. C. A.** “Avaliação do escoamento e proposição de melhorias em um filtro de mangas utilizando fluidodinâmica computacional (CFD)”. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo. 76p. 2016.
- CALLÉ, S. et al.** "Descriptions of the clogging and cleaning cycles of filter media". 2002.
- CAVASSENO, V.** "Industrial Air Pollution Engineering". [S.l.: s.n.], 1980
- COPERFIL.** “Gaiolas para filtro manga”. Acessado em Novembro, 2016: <http://www.filtros-coperfil.com.br/manga.html>
- CREMASCO, M.A.** “Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos”. Edgard Blucher; 2ª Ed. 423p. 2014.
- DAVIS, W.; BUONICORE, A.** "Air Pollution Engineering Manual". [S.l.], 1992.
- DEUSCHLE, T.; JANOSKE, U.; PIESCHE, M.A.** “CFD-model describing filtration, regeneration and deposit rearrangement effects in gas filter systems”. Chemical Engineering Journal, v.135, p.49-55. 2008.
- DITTLER, A.; KASPER, G.** “Simulation of operational behavior of patchily regenerated, rigid gas cleaning filter media”. Chemical Engineering and Processing, v.38, p.321-327, 1999.
- DONOVAN, R. P.** "Fabric Filtration for Combustion Sources". [S.l.: s.n.], 1985.
- DULLIEN, F. A. L.** "Introduction to Industrial Gas Cleaning". [S.l.]: Academic Press, 1998.

EXAUSFIBRA. “*Exaustores / Ventiladores (Insufladores) Centrífugo Chapa Siroco Indireto*”. Acessado dezembro/2016 em: <http://catalogo.exausfibra.com.br/viewitems/siroco/exaustores-centrifugo-chapa-siroco-indireto>

FLETCHER, C.A.J. “*Computational Techniques for Fluid Dynamics: Volume 1*”. Second Edition, Springer, New York, 2005.

FOUST, A. S. et.al. (1982). “*Princípios das Operações Unitárias*” – Ed LTC, Rio de Janeiro – RJ, 2ª edição

GEANKOPLIS, C. J. “*Transport processes and separation process principles*”. 4th ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall Professional Technical Reference, 2003.

GONÇALVES, N.D.F. “*Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas*”. 71p. Dissertação (Mestre em Engenharia Matemática) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Matemática, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. 2007.

Guia do Usuário do Ansys Fluent®, 2013, Versão 15.0.

Guia Teórico do Ansys Fluent®, 2013, Versão 15.0.

HEUERT, J.; KHATCHATOURIAN, O. *Interação entre jatos transversais e fluxo principal: Simulação e análise comparativa de modelos de turbulência.* 2007.

IENI, R. F. “*Filtração de Gases: Estudo do Fenômeno da Limpeza por Blocos*”. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2005.

INOVA, H.Z. <http://www.hz-inova.com/cms/images/stories/fabric%20filter.jpg>

JAPUNTICH, D. A.; STENHOUSE, J. I. T.; LIU, B. Y. H. “*Experimental results of solids monodisperse particle clogging of fibrous filters*”. *Journal of Aerosol Science*, v. 25, p. 385–393, 1994.

JUNIOR, M.V. “*Introdução ao método de volume finitos*”. Centro de Ciências Tecnológicas. Universidade do Estado de Santa Catarina. 5ª ed. 2015.

KOCH, D.; SEVILLE, J.; CLIFT, R. “*Dust cake detachment from gas filters*”. *Powder Technology*, v. 86, p. 21 – 29, 1996.

L. K. WANG, N. C. PEREIRA, AND Y.-T. HUNG. “*Air Pollution Control Engineering. Handbook of Environmental Engineering*”. Vol. 1. The Humana Press, Inc., Totowa, NJ. 2004.

- LISBOA, H.M.** *“Metodologia de controle da poluição atmosférica”*. (Unidade VII). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina. 2007.
- MALISKA, C.R.** *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. 2ed. rev. e ampliada. - Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- MARQUES, F.B.** *“Aplicação das técnicas de CFD no projeto de filtro de mangas”*. Trabalho de conclusão de curso bacharel em Engenharia Química. Universidade Federal do Espírito Santo. 67p. 2014.
- MARTINS, J. C.** *“Estudo da deposição de Material Particulado no meio Filtrante durante a filtração gás sólido”*. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2001.
- MCKENNA, J. D. AND J. H. TURNER.** 1998. *Fabric Filter-Baghouses I, Theory, Design, and Selection*. Roanoke, VA: ETS.
- MFRURAL.** *“Filtro de manga jet pulse Maxmill”*. Acessado em novembro, 2016: <http://www.mfrural.com.br/detalhe/filtro-de-manga-pulse-jet-maxmill-para-despoeiramento-aspiracao-transporte-pneumatico-e-outros-208899.aspx>
- MYCOCK, J. C.; MCKENNA, J. D.; THEODORE, L.** *“Handbook of air Pollution Control Engineering and Technology”*. [S.l.]: 1, 1995.
- PACHECO, T.A.** *“Filtro de manga: Como obter o rendimento máximo dos filtros de manga”*. Química e Derivados. 5p. 2002. Acessado em: <http://www.quimica.com.br/filtros-de-manga-como-obter-o-rendimento-maximo-dos-filtros-de-manga/5/>.
- PANTON, R.L. (1997).** *“Incompressible Flow”*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- PATANKAR, S.V.** *“Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”*. Taylor & Francis Group. New York. 1980.
- PAVLOV, A.N., SAZHIN, S.S., FEDORENKO, R.P., HEIKAL, M.R. (2000).** *“A conservative finite difference method and its application for the analysis of a transient flow around a square prism”*. Int J Numer Meth Heat Fluid Flow 10: 6-46.
- PEREIRA, T.W.C; MARQUES, F.B.; PEREIRA, F.A.R.; RIBEIRO, D.C.; ROCHA, S.M.S.** *“The influence of the fabric filter design of in a flow mass filtrate”*. Journal of Cleaner Production 111, Part A. 117-124. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.070>

PROCEL. “Ventiladores e exaustores: Guia básico.” Eletrobrás [et al.] – Brasília : IEL/NC, 2008. 80 p.

REZENDE, A.L.T. *Análise numérica de bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa plana fina inclinada.* 2009. 262p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Rio de Janeiro

ROCHA, S. M. S., MARQUES, F.B., PEREIRA, F.A.R., RIBEIRO, D.R. “*Applications of CFD Techniques in the Design of Fabric Filters*”. Chemical Engineering Transactions. Vol.39, 2014.

ROCHA, S.M.S.; RIBEIRO, D.C.; PEREIRA, F.A.R. SIMON, H.K.; MARQUES, F. B. “*The study of gas effluent inlet design over the performance of an industrial fabric filter: a CFD approach*”. FILTECH - Wiesbaden – Germany. 2013.

ROCHA,S.M.S. “*Estudo da influência da velocidade e dos ciclos de filtração na formação da torta de limpeza de gases em filtro de mangas*”. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG. 168p. 2010.

RODRIGUES, A. C. M. “*Estudo da Formação e Remoção de Tortas de Filtração de Gases em Filtros de Tecidos de Polipropileno e de Algodão*”. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2004

RODRIGUES, K. B. “*Filtração de Gas: Estudo da Decomposição de Diferentes Tortas de Filtração em Diferentes Meios Filtrantes*”. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2006.

ROVIGO. “Sistema de exaustão de filtros manga”. Acessado em novembro, 2016: http://www.rovigometal.com.br/sistemas-de-exaustao_filtros-de-manga.html.

SALEEM, M; KRAMMER, G. “*Optical in-situ measurement of filter cake height during bag filter plant operation*”. Powder Technology 173 (2007) 93-106. 2007.

SANTOS, E. L. *Avaliação do “Conceito Bolha” Como Critério de Compensação Ambiental em Atividades Poluidoras de Ar Atmosférico - Estudos de Caso no Estado de São Paulo.* Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2004.

- SILVA, G. et al.** “Effect of process parameters on cake formation and removal during gas-solid filtration in fabric filters”. *World Filtration congress*, v. 1, p. 245–248, 2000.
- SOUZA, A. F.; CHAVES, A. L.** “Control of the Industrial Gas Polluting Waste”. *Technologia*, v. 5, n. 2, p.83-106, 2004.
- TANABE, E. H.** Estudo do Comportamento da Deposição das Partículas de Diferentes Meios Filtrantes. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, 2008
- TAPC – Total Air Pollution Control Pty Ltd.** “Fabric Filters – What are they?”. <http://www.tapc.com.au/fabricfilter>, outubro 2016.
- THEODORE, L.; BUONICORE, A. J.** "Air pollution control equipament - particulates". *CRC Press*, v. 1, 1988.
- THERMAX.** “Reverse air bag house.” Acessado em novembro, 2016: <http://www.thermax-global.com/>
- TIENI, R. F.;** “Filtração de Gases: Estudo do Fenômeno da Limpeza por Blocos”. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de São Carlos, 2005.
- TOGNETTI, E. R.** “Influência das condições operacionais na formação e remoção de tortas de filtração de gases”. 2007. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Química, Engenharia Química, UFSCar, São Carlos, 2007
- US-EPA (Comp.).** “Fabric Filter Operation Review: Self-Instructional Manual”. APTI Course SI: 412A. 2. ed. North Carolina State Univesity, 1995. 156 p. (Fabric Filter Operation Review). Environmental Programs. US-EPA with Cooperative Assistance Agreement to North Carolina State University
- VENTEC AMBIENTAL EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES LTDA.** *Manual técnico de Instalação, Operação e Manutenção. Filtro de Mangas.* 2008.
- VERSTEEG, H.K. AND MALALASEKERA,** “An Introduction to Computacional Fluid Dynamics: The Finite Volume Method”. Second Edition, Prentice Hall, England, 2007.
- WALSH, D. C. et al.** "The effect of solid and liquid aerosol particle loading on fibrous filter material performance". *Journal of Aerosol Science*, v. 27, p. 617 – 618, 1996.
- WANG, M. L, CHEN, Q.** 2012. "Advanced turbulence models for predicting particle transport in enclosed environment,” *Building and Environment*, 47, 40-49.
- WILCOX, D.C.** “Turbulence Modeling for CFD”. DCW Industries. 2nd Ed. 540p. 1998

YILMAZ, O., ANCTIL, A., KARANFIL, T. “*LCA as a decision support tool for evaluation of best available techniques (BATs) for cleaner production of iron casting*”. J. Clean. Prod. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.022>.