UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ANA CLARA ALVES BERNABÉ

AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO E PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS EM UM FILTRO DE MANGAS UTILIZANDO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

VITÓRIA
2016

ANA CLARA ALVES BERNABÉ

AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO E PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS EM UM FILTRO DE MANGAS UTILIZANDO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Rafael Sartim
Co-orientadora: Prof.ª Dr.ª Jane Méri Santos

VITÓRIA

2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por poder sentir sua presença comigo e pela força para seguir em frente;

Aos meus pais, Juvenal e Taisi, por dedicarem sua vida a nós, suas filhas, e por sempre terem colocado nossa educação em primeiro lugar, independente das dificuldades;

Às minhas irmãs, Ana Carolina e Ana Cristina, e aos meus sobrinhos, Eduardo e Guilherme, pelo amor e pelos sorrisos que me ajudaram a seguir em frente nessa caminhada;

Ao Leandro, pelo amor, companheirismo incondicional e pela paciência com todos os meus inúmeros projetos nesses anos de engenharia, independente da distância;

Ao meu professor orientador, Rafael Sartim, pelo desafio lançado, pela oportunidade, confiança e por todos os valiosos ensinamentos e conselhos;

À minha co-orientadora, Jane Méri Santos, pelos ensinamentos e pelo exemplo;

À Sandra Rocha e Elisa Valentim, por aceitarem o convite para participar desta banca examinadora;

Aos queridos amigos da Ufes, por tornarem esses anos tão incríveis e especiais;

Aos professores da Engenharia Ambiental, por nos incentivarem a ir além;

À Universidade Federal do Espírito Santo e à Universidade de Nottingham, pela minha formação;

Ao ArcelorMittal Global R&D Brazil – South America, pela oportunidade e apoio, em especial à Thayná Vervloet e Sergio Mattedi, pelo auxílio com este trabalho;

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

RESUMO

O aumento do conhecimento sobre os impactos negativos decorrentes de poluentes atmosféricos culminou na necessidade de controlar as fontes de poluição e no estabelecimento de limites de emissão. A indústria é uma importante fonte de poluição e, para se enquadrar à legislação utiliza equipamentos de controle da poluição do ar. O Filtro de Mangas é um equipamento amplamente usado para a coleta de material particulado (MP), apresentando alta eficiência para a remoção de partículas em uma grande faixa granulométrica. Neste equipamento, o gás contaminado com partículas passa através de uma série de mangas filtrantes, de tal forma que as partículas são retidas pelo tecido e pela torta de filtração e o ar limpo é liberado. O design do filtro de mangas é geralmente baseado em *know-how* e experiência do projetista e impacta diretamente na eficiência de filtração e na perda de carga do mesmo. Nas últimas décadas, devido ao desenvolvimento exponencial da computação, análises do design destes equipamentos podem ser realizadas por meio da técnica de fluidodinâmica computacional (CFD), tanto em casos de *retrofit*, quanto no projeto de novos filtros. Neste contexto, objetiva-se avaliar as características do escoamento de gás no interior de um filtro de mangas industrial existente e investigar a influência de propostas de melhorias na distribuição do fluxo de gás nas mangas. Realizou-se a análise de um caso referência, um filtro existente de uma indústria siderúrgica, e de três alternativas propostas: a redução da vazão para 60% da vazão de projeto, a divisão do duto de entrada em dois e a instalação de chapas defletoras na entrada. Das alternativas analisadas, a redução da vazão foi a mais efetiva em termos de aumento da porcentagem área de filtração efetiva, promovendo uma melhoria de 79,9% do caso base para 85,1%. Tendo em vista as conclusões tiradas destas três alternativas, foram propostas duas alternativas adicionais: a redução da vazão combinada com divisão do duto de entrada e com a instalação de defletoras. A mais vantajosa foi a alternativa que combinou a instalação das defletoras com a vazão reduzida em termos de distribuição da razão ar-pano nas mangas e redução dos vórtices no fundo da tremonha. As conclusões reforçaram o grande potencial da aplicação da CFD para o desenvolvimento de projetos em filtros de mangas, ao contestar hipóteses de uniformidade de parâmetros ao longo das mangas, como geralmente é realizado nos projetos destes equipamentos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes de um Filtro de Mangas 18
Figura 2 - Dispositivos de descarga de material. A - Válvula Rotativa. B - Rosca Transportadora. 19
Figura 3 - Formação da torta de filtração (*cake*). 20
Figura 4 - Mecanismos de coleta. 21
Figura 5 - Ciclos ideais de filtração. 22
Figura 6 - Formas de limpeza de mangas. A: Sacudimento mecânico. B: Ar Reverso. C: Jato Pulsante. D: Sônico. 25
Figura 7 – Exemplos de diferentes mangas. 27
Figura 8 - Filtro de Mangas estudado (a) e detalhe de duto de entrada (b). 34
Figura 9 - Desenho 3D do filtro de mangas estudado no software SolidEdge. 35
Figura 10 - Malha utilizada no Filtro de Mangas. 36
Figura 11 - Variação da velocidade típica de um escoamento turbulento. 40
Figura 12 - Duto de entrada com chapa divisora do escoamento em (a) vista isométrica e (b) vista em planta, com seta destacando o local de implantação da chapa divisora..... 45
Figura 13 - Duto de entrada com chapas defletoras em (a) vista isométrica, (b) vista lateral e (c) detalhe da defletora. 46
Figura 14 – Linhas de Corrente no caso base com destaque para a tremonha. 48
Figura 15 - Velocidade média em cada entrada do filtro estudado. 49
Figura 16 - Velocidades no plano horizontal à metade da altura do duto de entrada.... 50
Figura 17 - Vetores Velocidade no plano vertical localizado na Entrada 4. 51
Figura 18 - Vetores Velocidade no plano localizado na entrada 4 da tremonha. 52
Figura 19 - Detalhe de região da manga atingida por altas velocidades. 53
Figura 20 - Velocidade de Filtração no Filtro de Mangas na região (a) frontal e (b) posterior. 54
Figura 21 - Região de maiores valores de razão ar-pano, na região posterior do filtro de mangas. 55
Figura 22 - Distribuição da pressão nas mangas no Caso Base na região (a) frontal, (b) posterior e (c) central. 56
Figura 23 – Regiões destacadas em vermelho com vazão mássica igual ou menor que zero nas mangas. 57

Figura 24 - Linhas de corrente das alternativas analisadas: (a) Caso base, (b) Vazão Reduzida, (c) Duto Dividido e (d) Defletoras. 59

Figura 25 - Distribuição de velocidades no duto de entrada: (a) Caso base, (b) Vazão Reduzida, (c) Duto Dividido e (d) Defletoras. 60

Figura 26 – Velocidades de filtração das alternativas analisadas: (a) Caso base, (b) Vazão Reduzida, (c) Duto Dividido e (d) Defletoras. 61

Figura 27 - Distribuição das pressões nas mangas da região frontal (acima) e posterior (abaixo) nas alternativas analisadas: (a) Caso base, (b) Vazão Reduzida, (c) Duto Dividido e (d) Defletoras. 62

Figura 28 - Distribuição da razão ar-pano nas alternativas complementares: (b) Vazão Reduzida, (e) Defletoras com vazão reduzida e (f) Duto dividido com vazão reduzida. 64

Figura 29 - Fluidodinâmica das alternativas complementares: (b) Vazão Reduzida, (e) Defletoras com vazão reduzida e (f) Duto dividido com vazão reduzida. 66

Figura 30 - Localização da linha traçada para a realização do teste de malhas. 75

Figura 31 - Comparação entre velocidades encontradas na linha L1 com diferentes malhas. 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Velocidades de filtração máximas recomendadas para variados tipos de particulados em filtro de mangas de jato pulsante. 24

Tabela 2 - Características do filtro de mangas estudado. 35

Tabela 3 - Permeabilidade e porosidade da manga adotadas na simulação. 37

Tabela 4 - Valores adotados para as constantes do modelo $\boldsymbol{k-\varepsilon}$. 41

Tabela 5 - Valores de queda de pressão para as alternativas analisadas. 63

Tabela 6 - Área de filtração efetiva dos casos analisados. 63

Tabela 7 - Área de filtração efetiva e queda de pressão das alternativas complementares. 65

LISTA DE SÍMBOLOS

g	aceleração da gravidade [m^2s^{-2}]
P_k	produção de energia cinética turbulenta por cisalhamento [N m^{-2}]
p	pressão [Pa]
p_m	pressão manométrica [Pa]
Q_m	vazão mássica [kg s^{-1}]
ρ	massa específica [kg m^{-3}]
t	tempo [s]
u_i	componente da velocidade na direção i [m s^{-1}]
$\overline{u_i}$	média da componente da velocidade na direção i [m s^{-1}]
$\bar{u}$	velocidade média nas direções [m s^{-1}]
u'	flutuação da velocidade [m s^{-1}]
x_i	coordenada na direção *i* [m]
δ_{ij}	operador delta de Kronecker
Δt	variação de tempo [s]
ε	taxa de dissipação da energia cinética turbulenta [m^2s^{-3}]
k	energia cinética turbulenta [m^2 s^{-2}]
μ	viscosidade molecular do fluido [N s m^{-2}]
μ_t	viscosidade turbulenta [N s m^{-2}]
μ_{eff}	viscosidade efetiva [N s m^{-2}]
C_μ, C_1, C_2	constantes empíricas do modelo *k* -ε
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	constantes empíricas do modelo *k* -ε
τ_{ij}	tensor das tensões [N m^{-2}]
ϕ_{ip}	valor da variável genérica no ponto de integração
ϕ_{up}	valor da variável genérica no nó a montante
r_i	vetor a partir do nó a montante até o ponto de integração

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
2 OBJETIVOS 13
2.1. Objetivo Geral 13
2.2. Objetivos específicos 13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14
3.1. Poluição do ar 14
3.2. Filtro de Mangas 17
3.3. Fluidodinâmica Computacional 28
3.4. Trabalhos correlatos 30
4 METODOLOGIA 34
4.1. Coleta de dados 34
4.2. Modelagem Matemática 35
4.3. Método Numérico 42
4.4. Analise de Alternativas 44
5 RESULTADOS 47
5.1. Caso Base 47
5.2. Análise das alternativas 58
5.3. Alternativas complementares 64
6 CONCLUSÕES 67
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 69
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 70
APÊNDICE A 75

1 INTRODUÇÃO

É notório que nas últimas décadas, principalmente após os anos 70, a preocupação ambiental cresceu fortemente. Segundo Lora (2002), acidentes industriais graves, derramamentos de petróleo e problemas ambientais em escala global como as mudanças climáticas e a depleção da camada de ozônio, nos anos 90, contribuíram para esse crescimento.

No Brasil, o caso da cidade de Cubatão/SP ficou conhecido em 1979 com uma série de artigos publicados descrevendo a cidade como o "vale da morte" e a "cidade mais poluída do mundo" (PIRES, 2012). A poluição atmosférica, em níveis altíssimos e de lenta dispersão, causou extremo desconforto e problemas de saúde a longo prazo na população exposta (LEMOS, 1998). Nesse contexto, a poluição em todas as suas formas tem se fortalecido como objeto de pesquisa, sendo a poluição atmosférica destacada no presente trabalho.

Muitos são os poluentes atmosféricos, com diferentes consequências à saúde, ao bem-estar público ou aos materiais, à fauna e flora. Dentre eles, o material particulado (MP) está associado a efeitos deletérios ao sistema respiratório e cardiovascular na população exposta (Organização Mundial da Saúde, 2006).

Dada a importância do controle da concentração deste poluente no ar, destaca-se a necessidade de controle nas fontes de emissão do mesmo. Assim, essa necessidade culminou no estabelecimento de limites de emissão de material particulado em todo o mundo. No Brasil, ocorreu em 2006 a criação da Resolução CONAMA 382 (BRASIL, 2006) e posteriormente, em 2011, da Resolução CONAMA 436/2011, que estabelecem os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.

A indústria é uma importante fonte de MP de modo que, em uma enorme parcela de processos, necessita de equipamentos de controle para reduzir sua taxa de emissão e alcançar os valores máximos estabelecidos pelas resoluções nacionais. Assim, diversos estudos acerca desses equipamentos vêm sendo desenvolvidos no intuito de melhorar a eficiência e reduzir os custos de implantação, operação e manutenção dos mesmos.

Um sistema de controle da poluição do ar amplamente utilizado é o Filtro de Mangas, equipamento que apresenta altos valores de eficiência na remoção de MP quando projetado corretamente. Seu princípio de funcionamento é baseado na filtração do gás contendo MP em um fluxo forçado através de uma série de mangas filtrantes, de modo que as partículas são retidas pelo tecido, que funciona também como suporte para a camada de partículas

que se deposita sobre ele (COOPER; ALLEY, 2011). Em uma etapa seguinte, a própria camada superficial de material particulado (torta de filtração) se torna o principal meio filtrante da operação (ROCHA, 2010).

Para o dimensionamento deste equipamento, diversos parâmetros de projeto devem ser definidos, tais quais: razão Ar-Pano (velocidade de filtração), velocidade ascendente, material da manga, tipo de limpeza da manga e design do equipamento. O design do equipamento é fundamental para a boa distribuição do escoamento pelas mangas filtrantes, de modo a evitar a existência de valores muito superiores ou inferiores à velocidade de filtração definida no projeto. Regiões com velocidades de filtração muito altas estão sujeitas a desgaste prematuro das mangas, maior penetração de partículas no meio filtrante dificultando a remoção da torta e maiores perdas de carga (TOGNETTI, 2007, ROCHA, 2010). Regiões com velocidades de filtração muito baixas representam uma subutilização das mangas, que deve ser evitada. Além disso, representam filtros muito maiores e, portanto, de maior custo de instalação e manutenção. Assim, o design é o ponto chave para um filtro de mangas com boa eficiência de filtração, baixas perdas de carga, e consequente baixo consumo de energia e baixo custo de manutenção, devido ao aumento da vida útil das mangas. Um filtro com uma boa distribuição do fluxo de gás pelas mangas também torna possível a operação com valores mais elevados de razão ar-pano, o que possibilita uma geometria mais compacta e, consequentemente, proporciona um menor custo de fabricação, instalação e manutenção.

Estudos recentes mostram o potencial de melhoria da performance de filtros de mangas por meio da otimização da distribuição do fluxo de gás através de modificações e testes do escoamento em diferentes designs (NIELSEN; SKRIVER; CASTAÑO, 2011). Esse tipo de problema de engenharia pode ser resolvido por métodos analíticos, métodos numéricos e experimentação em laboratório (MALISKA, 2004). O emprego de métodos analíticos é, muitas vezes, inviável, pela baixa precisão e falta de informações na literatura sobre o tema o que torna difícil analisar casos complexos. Por outro lado, os métodos experimentais tipicamente envolvem grandes custos e, em muitos casos, são difíceis de serem executados.

Já o método numérico se mostra extremamente atrativo, principalmente levando em consideração o aumento exponencial da velocidade de processamento dos computadores bem como a redução de seu custo nas últimas três décadas. Além disso, houve o desenvolvimento de diferentes *softwares* de simulação, o aumento de sua flexibilidade e a

melhoria de rotinas fundamentais, como geração da malha, de modo que as simulações de fluidodinâmica computacional (CFD) aumentaram drasticamente desde a década de 90 (NIELSEN, 2015). Tal técnica é considerada versátil para o estudo da dinâmica dos fluidos em diversos sistemas e tem sido amplamente utilizada em aplicações de engenharia (VIEIRA et al, 2007). A CFD permite a inclusão dados experimentais nas simulações, de modo que os resultados destas se aproximem mais da condição real.

Nesse contexto, trabalhos encontrados na literatura como de Damian *et al.* (2004a), Feldkamp, Dickamp e Moser (2008), Nielsen, Skriver e Castaño (2011) e Pereira *et al.* (2016) destacam o grande potencial da aplicação da CFD em filtros de mangas, tanto para otimização de filtros existentes quanto para decisões no projeto de novos filtros. Tais autores encontraram resultados expressivos em termos de melhoria da eficiência de filtração e redução da perda de carga no equipamento.

Assim, o presente trabalho pretende contribuir na investigação da aplicação da análise da CFD em filtros de mangas, por meio da realização de um estudo de caso em um filtro existente, visto o grande potencial da aplicação desta técnica para a solução de problemas de engenharia.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar as características do escoamento de gás no interior de um Filtro de Mangas Industrial e investigar a influência de propostas de melhorias na distribuição do fluxo de gás nas mangas.

2.2. Objetivos específicos

Com base neste objetivo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o escoamento de um caso referência com base em dados de um filtro de mangas existente;

- Propor alternativas baseando-se nos resultados da simulação do caso base e simular o escoamento em cada uma delas;

- Comparar o caso base e as alternativas propostas, em relação à distribuição do escoamento nas mangas, o comportamento das velocidades na tremonha e perda de carga do filtro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Poluição do ar

O conceito de poluição atmosférica segundo o *Engineer's Joint Council on Air Pollution and Its Control* é

> "A presença em ar atmosférico de um ou mais contaminantes, como poeira, fumos, gás, névoa, odores, fumaça ou vapor em quantidades, características e duração que seja prejudicial aos humanos, plantas ou propriedades, ou que interfiram exageradamente no gozo confortável da vida e da propriedade" (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004)

Em consonância com esse conceito, a resolução CONAMA 003/1990 (BRASIL, 1990) define poluente atmosférico como:

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

Os poluentes atmosféricos podem ser divididos em material particulado (sólidos ou líquidos) e gases. Dentre os gases citam-se SO_2, SO_3, NO_2, NO_3, CO, H_2S e VOC, gases estes cujas propriedades possuem comportamento físico relativamente previsível, ao contrário do material particulado (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004).

3.1.1. Material Particulado (MP)

Define-se por material particulado (MP) a mistura complexa de partículas extremamente pequenas e gotículas líquidas, de composição variável podendo conter diversos componentes como ácidos, compostos orgânicos, metais, entre outros (US-EPA, 2015; COOPER; ALLEY, 2011). Assim, ao contrário de outros poluentes, o MP não é uma entidade química específica, mas uma mistura de partículas de diferentes fontes, tamanhos, composições e propriedades (VALLERO, 2008).

O material particulado pode ser classificado segundo seu tamanho que é determinado pelo processo de formação da partícula e estão diretamente associados a seus efeitos à saúde. Partículas menores que 10 µ são denominadas inaláveis, enquanto aquelas com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 µm são comumente chamadas de partículas

respiráveis. Ambas são de grande interesse por seus efeitos à saúde humana (US-EPA, 2015).

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (2006), há evidência da associação do material particulado presente no ar com efeitos no sistema respiratório e cardiovascular na população exposta. Isto se dá pois partículas inaláveis são capazes de penetrar no sistema respiratório, enquanto as mais finas, respiráveis, podem também afetar o coração e o pulmão causando sérios impactos à saúde (US-EPA, 2015).

Assim, o controle da emissão de material particulado é de extrema relevância sendo matéria legislada no Brasil e no mundo.

3.1.1.1. Padrões de Emissão de MP em Fontes Fixas

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

A legislação brasileira, através das resoluções CONAMA 382/2006 e 436/2011, estabelece limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas, com licenças de instalação posteriores e anteriores a 2007, respectivamente. Dentre os anexos dessas resoluções que se referem a diversas atividades industriais, o ANEXO XIII estabelece limites de emissão para poluentes atmosféricos gerados nas indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas e usinas de pelotização de minério de ferro (BRASIL, 2007). A resolução dispõe limites referentes às etapas de Coqueria, Sinterização, Alto forno a Coque, Alto Forno a Carvão Vegetal, Aciaria LD, Aciaria Elétrica, Laminação, Pelotização e Central Termelétrica.

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

3.1.1.2. Equipamentos de Controle de MP

Quanto mais puder ser feito para prevenir qualquer problema de poluição, menores são os custos operacionais e custos ocultos de uma solução de controle (CHEREMISINOFF, 2002). Segundo Vallero (2008), a prevenção da poluição atmosférica associada a

atividades industriais pode se dar por mudanças operacionais, mudança nas matérias-primas utilizadas e modificações nos processos.

No entanto, há limites para a prevenção da poluição do ar, e em muitos casos o custo de se investir em tecnologias mais limpas é muito superior ao investimento nos sistemas de controle de poluição tradicionais (CHEREMISINOFF, 2002).

No que se refere à emissão de material particulado, sabe-se que atividades industriais dificilmente alcançam os padrões de emissão estabelecidos pela legislação sem o auxílio de equipamentos de controle. É importante considerar o custo de controlar fontes de poluição do ar uma vez que, de acordo com Vallero (2008), esse custo é, em geral, uma função exponencial em função da porcentagem de controle.

Diversas técnicas de controle da poluição do ar são empregadas, dentre elas, as mais comuns para a remoção de material particulado são explanadas nos parágrafos a seguir.

Um dos primeiros dispositivos usados para o controle de material particulado foi a câmara gravitacional. Estas consistem meramente numa grande câmara na qual a velocidade do ar é reduzida devido à expansão da área do escoamento, permitindo que as partículas sedimentem devido à gravidade. A aplicação industrial dessas câmaras é geralmente limitada à remoção de partículas maiores, entre 40 e 60 µm (COOPER; ALLEY, 2011; THEODORE, 2008).

Uma alternativa com design um pouco mais complexo se comparado às câmaras gravitacionais, de maior eficiência e custo relativamente baixo são os ciclones. Um ciclone remove partículas forçando o fluxo de ar a escoar de forma espiral dentro de um tubo, como as partículas maiores apresentam maior momento, estas não podem realizar a mesma trajetória circular do gás. Assim, tais partículas se chocam com a parede, escorregando e sendo depositadas no fundo do equipamento (COOPER; ALLEY, 2011; THEODORE, 2008).

Segundo Theodore (2008), uma alternativa aos métodos anteriores é o lavador de gases, que utilizam um líquido para a remoção de partículas ou até mesmo gases poluentes do gás de exaustão. Um lavador de gases emprega os princípios de impactação e interceptação de partículas sólidas pelas gotas do líquido para sua remoção (COOPER; ALLEY, 2011).

Outro equipamento amplamente utilizado para controle de material particulado é o precipitador eletrostático (ESP), aplicável a situações de fluxo com grandes variedades de vazões, temperaturas e pressões e apresenta boa performance em condições onde o fluxo contém gases ácidos. Para muitas aplicações, a eficiência de coleta de material particulado

pode ser superior a 99% (US-EPA, 1998). O princípio de operação de um precipitador consiste no carregamento elétrico do material particulado, por meio da ionização do gás, seguido da sua coleta e remoção. O funcionamento tem como base a teoria da precipitação eletrostática. Basicamente, uma alta tensão, negativa, é aplicada aos eletrodos (componentes fixados no interior do precipitador) gerando um campo negativo. Esse campo conduz os elétrons gerados em direção as placas coletoras (carga positiva) fazendo com que colidam com as moléculas do gás tornando-as negativas e, dessa forma, ionizando o gás. As moléculas ionizadas do gás são, então, atraídas pelas placas coletoras e em seu trajeto encontram-se com o material particulado carregando-os negativamente. Essa carga negativa faz com que o MP migre em direção as placas. Periodicamente as placas são limpas, removendo a camada de particulado que se deposita sobre elas (COOPER; ALLEY, 2011).

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

3.2. Filtro de Mangas

Os Filtros de Mangas são equipamentos amplamente utilizados para o controle da emissão de material particulado em indústrias. O mesmo é capaz de fornecer altas eficiências de remoção para partículas de até 0,1 µm e remove uma parcela significativa das partículas de 0,01 µm (THEODORE, 2008). Discorre-se nos tópicos a seguir sobre o princípio de funcionamento e as características desse equipamento.

3.2.1. Princípio de funcionamento

O filtro de mangas é um equipamento que compõe um sistema de ventilação local exaustora cuja função é de separar as partículas contidas no gás exaurido. O gás escoa através de uma série de mangas filtrantes, de modo que as partículas são retidas pelo tecido, que funciona também como suporte para a camada de partículas que se deposita sobre ele (COOPER; ALLEY, 2011). Na Figura 1 estão exibidas as principais partes de um Filtro de Mangas.

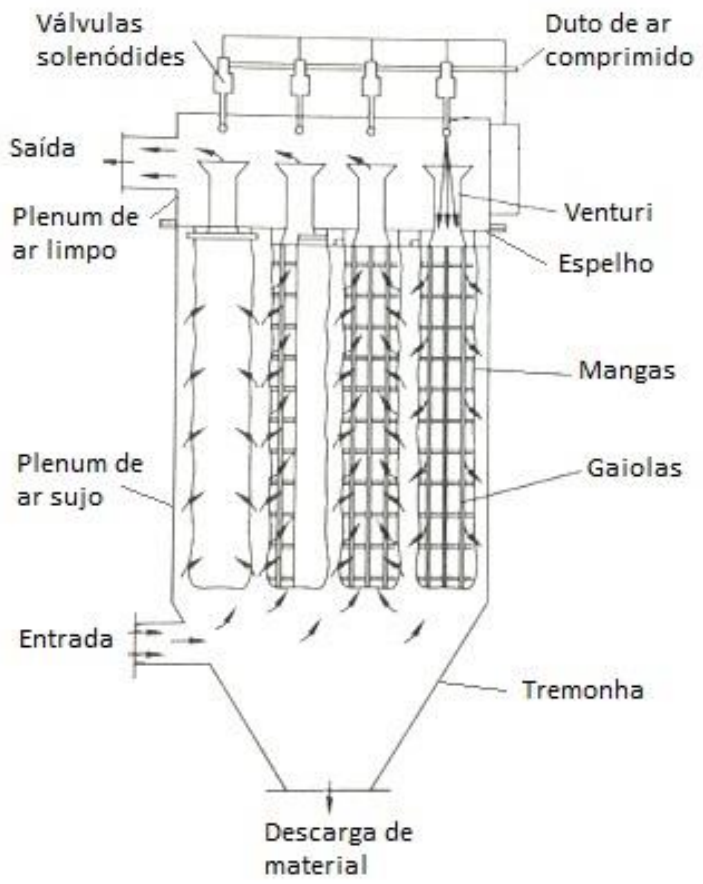

Figura 1 - Componentes de um Filtro de Mangas
Fonte: Adaptado de Lora (2002).

Segundo US-EPA (1995), os principais componentes do filtro são:

a) Manga e gaiola:

Correspondem ao meio filtrante e ao suporte, respectivamente. As mangas podem ser de diversos tecidos e tratamentos, e seu suporte se dá, geralmente, por gaiolas que sustentam toda a manga.

b) Carcaça:

Envoltório do filtro. Os filtros podem ser construídos em um ou vários compartimentos. Filtros não compartimentados geralmente são menores e ligados a atividades que não são realizadas continuamente. Filtros compartimentados podem ter um compartimento *offline* para limpeza, dependendo da tecnologia escolhida para limpeza ou manutenção, enquanto os outros compartimentos continuam em operação. Geralmente as carcaças dos filtros são construídas em material metálico rígido, podendo ou não contar com isolamento térmico, dependendo da aplicação.

c) Tremonha:

A tremonha é usada para o armazenamento temporário do material recolhido no filtro, para posterior descarga e destinação, como reuso no processo, por exemplo. O particulado deve ser removido da tremonha o mais rápido possível para evitar a compactação de material na tremonha. Seu tronco é geralmente projetado com uma angulação lateral de 55 a 70º para facilitar o direcionamento do material do topo ao fundo da tremonha, onde há o dispositivo de descarga.

d) Dispositivo de descarga do material:

Necessário para descarregar o material particulado depositado na tremonha, podendo ser manuais ou automáticos. Alguns exemplos são as válvulas rotativas e roscas transportadoras. A Válvula rotativa (Figura 2-A) é usada geralmente para filtros médios e grandes e consiste em uma pá rotativa montada em um eixo movido por um rotor. Outro tipo de dispositivo, a rosca transportadora (Figura 2-B), consiste em uma rosca rotativa helicoidal instalada no fundo da tremonha para a remoção do material.

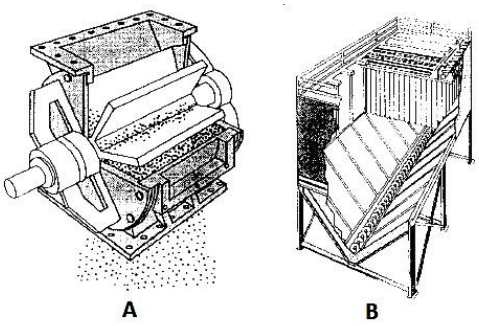

Figura 2 - Dispositivos de descarga de material. A - Válvula Rotativa. B - Rosca Transportadora.
Fonte: Adaptado de US-EPA (1995).

e) Espelho

O espelho é a chapa metálica que divide o *plenum* de ar sujo do *plenum* de ar limpo, onde as gaiolas das mangas são fixadas.

Inicialmente, quando as mangas estão limpas, a filtração se dá pela retenção de partículas na fibra da manga, denominada filtração interna. Nessa etapa, a penetração de partículas através do tecido é maior e implica em uma menor eficiência de captura, uma vez que uma grande parcela de partículas passa diretamente pelas aberturas do tecido

(RODRIGUES, 2006; THEODORE, 2008; VALLERO, 2008). Segundo Rocha (2010), nessa etapa, a queda de pressão aumenta proporcionalmente ao número de partículas coletadas, e o período da mesma depende das características do tecido, sendo maior no tecido virgem e diminuindo nos ciclos subsequentes.

Segundo Rodrigues (2006), após isso há um período intermediário com a formação de dendritos, que são estruturas formadas pela aglomeração de partículas no meio, e passam a agir como novos elementos coletores. Em sequência, os dendritos passam a formar uma camada superficial de material particulado, denominada torta de filtração (Figura 3), que se torna o principal meio filtrante da operação (ROCHA, 2010; RODRIGUES, 2006).

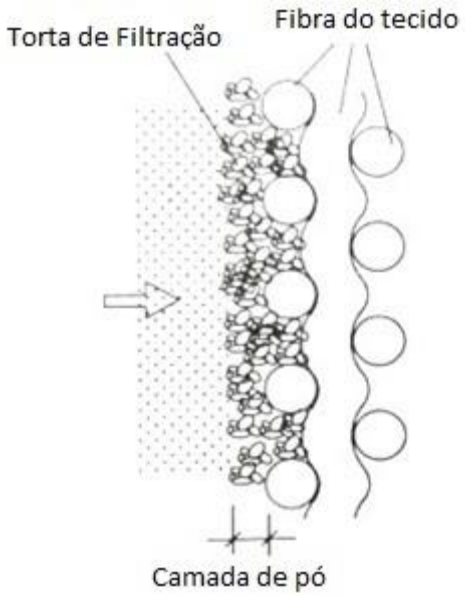

Figura 3 - Formação da torta de filtração (*cake*).
Fonte: Adaptado de Lora (2002) *apud* Ogawa (1984).

Nos estágios iniciais da filtração, os seguintes mecanismos de remoção de partícula são especialmente importantes: impactação inercial, interceptação e difusão. A remoção também pode ocorrer por sedimentação da partícula (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004; US-EPA, 1995; RODRIGUES, 2006).

A Figura 4 ilustra os mecanismos citados. Partículas maiores que 1 µm geralmente são coletadas pelo mecanismo de impactação inercial, quando a partícula sólida, de maior inércia, colide com a fibra da manga e é capturada. Partículas médias, com menor inércia, tendem a desviar da fibra pelos poros, mas não conseguem fazê-lo efetivamente, tocando a fibra e sendo capturadas pelo filtro, mecanismo denominado interceptação. Partículas menores são coletadas pelo mecanismo de difusão Browniana, causado pelo movimento

randômico que faz com que estas entrem em contato com a fibra e sejam capturadas por ela (US-EPA, 1995; WANG; PEREIRA; HUNG, 2004). Segundo Rodrigues (2006), este mecanismo é importante para partículas menores que 1 µm e se torna o mecanismo de captura dominante em partículas de diâmetro inferior a 0,1 µm. Já a sedimentação é predominante em partículas grandes e com baixa velocidade (RODRIGUES, 2006).

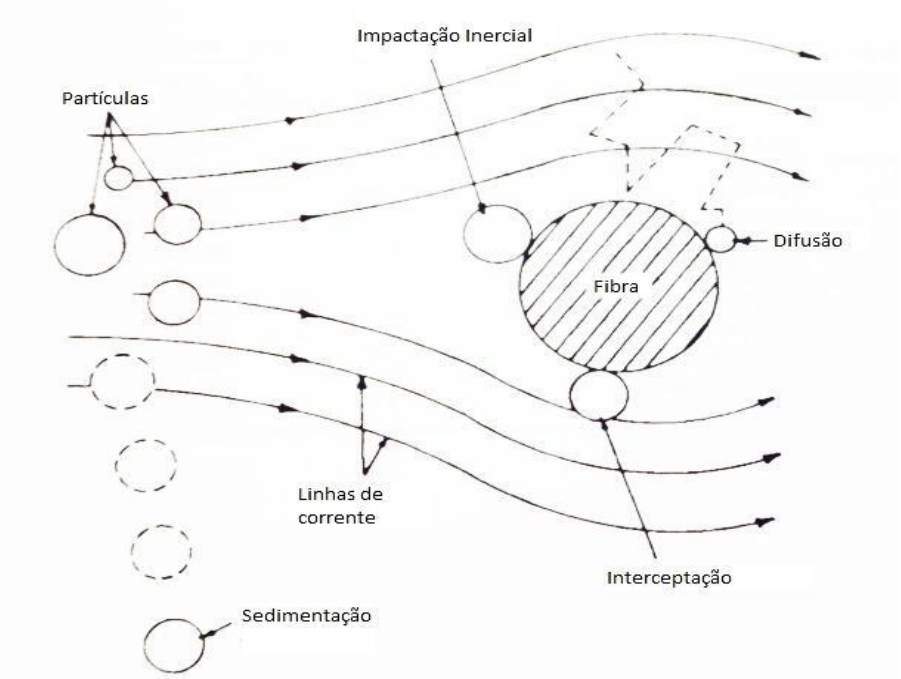

Figura 4 - Mecanismos de coleta.
Fonte: Adaptado de Wang, Pereira e Hung (2004).

Segundo Theodore (2008), após a formação da torta, a remoção de partículas é feita por uma espécie de peneiramento, além dos outros meios de remoção supracitados.

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

Segundo Wilder e Billings (1970) *apud* Rodrigues (2006), quando se inicia um novo ciclo de filtração, a perda de carga através do filtro se encontra em um valor bem abaixo daquele imediatamente anterior à limpeza, mas ligeiramente superior ao valor inicial, correspondente ao filtro limpo e virgem, conforme visto na Figura 5. Isso se deve ao fato de, por mais eficiente que seja a limpeza, algumas partículas não serem removidas, permanecendo nos interstícios do tecido. Outro motivo é a existência de pedaços da torta que não foram removidos (*patchy cleaning* ou remoção por blocos), de modo que a

regeneração do filtro é incompleta (TOGNETTI, 2007). A queda de pressão residual tende a aumentar após cada ciclo de filtração, pelo acúmulo de partículas no interior do tecido até que este valor tende a estabilizar, indicando uma saturação do tecido, que depende do material do filtro, do tamanho das partículas, do tempo e do tipo de sistema de remoção da torta (CALLÉ *et al*., 2002 apud ROCHA, 2010).

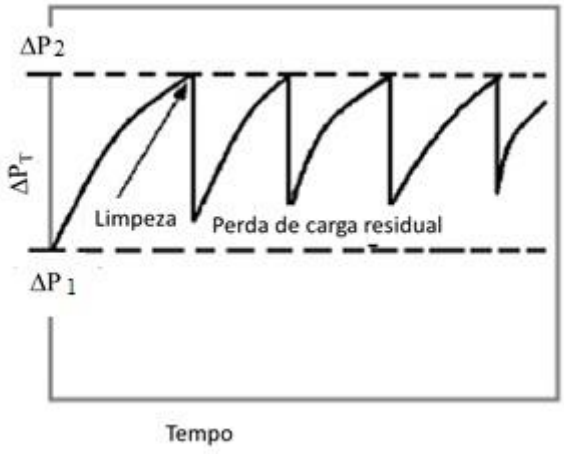

Figura 5 - Ciclos ideais de filtração.
Fonte: Adaptado de Rocha (2010).

Segundo Cooper e Alley (2011), a queda de pressão através de um filtro de mangas em uma determinada vazão é dada por:

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_p + \Delta P_s$$

Em que:

ΔP_f: Queda de pressão associada ao tecido filtrante

ΔP_p: Queda de pressão associada à torta

ΔP_s: Queda de pressão devido à estrutura do filtro

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

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

- Um aumento na vazão do gás;

- Incorporação de partículas nas mangas (*bag bliding*);
- Tremonha cheia de material particulado, bloqueando as mangas;
- Sistema de limpeza inoperante.

E para uma queda de pressão abaixo do previsto:

- Problemas no ventilador ou no motor;
- Mangas quebradas ou fixadas incorretamente;
- Dutos de entrada obstruídos ou *damper* fechado;
- Vazamento entre as seções do filtro de mangas.

3.2.2. Parâmetros de Projeto

3.2.2.1. Razão Ar-Pano

A razão Ar-Pano, também chamada de velocidade de filtração, é definida como a razão da vazão volumétrica pela área de tecido filtrante (US-EPA, 1995). Seu valor numérico é dado por:

$$Razão\ Ar - Pano = \frac{Vazão\ Total}{Área\ Filtrante} \tag{1}$$

Assim, a razão ar-pano é dada em unidade de velocidade, geralmente m/min, e pode ser interpretada como a velocidade que atravessa a manga na direção normal à sua superfície, dada a própria definição de vazão.

Altos valores de razão Ar-Pano promovem a captura de partículas predominantemente por impactação inercial (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004). Segundo US-EPA (1995), valores muito altos de razão ar-pano podem, ainda, provocar a compactação da torta de filtração resultando em uma queda de pressão excessiva. Negrini *et al.* (2001) *apud* Tognetti (2007) relacionam a velocidade de filtração com a porosidade da torta formada, de modo que a porosidade média experimental diminuiu com o aumento da velocidade superficial de filtração. Segundo Rocha (2010), altos valores de velocidades de filtração levam a um tempo de filtração pequeno, mas aumentam a penetração das partículas no tecido, o que dificulta a remoção da torta e aumenta a queda de pressão residual.

Valores baixos de razão ar-pano resultam em um equipamento de tamanho maior e, portanto, de maior custo de investimento. Ainda, segundo Donovan (1985) *apud* Tognetti

(2007), baixos valores de velocidade de filtração promovem uma a interação menor entre a partícula e o tecido, facilitando a remoção da torta.

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

A literatura descreve que são encontrados na indústria valores de razão Ar-Pano, em geral, entre 1 e 10 m/min (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004). A Tabela 1 apresenta sugestões de valores de velocidade de filtração máximas para determinadas aplicações, de modo que, segundo Cooper e Alley (2011), há uma tendência crescente a utilizar valores significativamente mais baixos dos que estão especificados na tabela, principalmente para aplicações mais conservadoras.

Tabela 1 - Velocidades de filtração máximas recomendadas para variados tipos de particulados em filtro de mangas de jato pulsante.

Poeira ou fumo	Velocidade de Filtração máxima (m/min)
Carbono, Grafite, Fumos Metalúrgicos, Sabão, Detergente, Óxido de Zinco	1,5 - 1,8
Cimento (matéria-prima), Argila (crua), Plásticos, Pigmentos de tinta, Amido, Açúcar, Madeira, Gesso, Zinco (metálico)	2,1 - 2,4
Óxido de Alumínio, Cimento (final), Argila (vitrificada), Cal, Calcário, Mica, Quartzo, Soja, Talco	2,7 - 3,4

Fonte: Adapatado de Cooper e Alley (2011).

Uma faixa de valores mais conservadora usada para aplicações industriais é de 1,0 a 1,2 m/min. Esse valor é válido para condição de pouca umidade do gás, baixa temperatura, baixa carga de pó e para aplicação em uma indústria siderúrgica (BONELLI, 2014).

3.2.2.2. Limpeza da manga

Conforme explicado anteriormente, a limpeza das mangas é necessária periodicamente. A limpeza pode ser de forma intermitente ou contínua. Intermitente quando o filtro é separado em câmaras, e regularmente um desses compartimentos é parado para a realização da limpeza. A limpeza contínua é realizada de forma automática e *online*, ou seja, não há necessidade de parada do equipamento para limpeza. As técnicas mais comuns

de limpeza das mangas são: sacudimento mecânico, ar reverso, jato pulsante e sônica, conforme exemplificado na Figura 6.

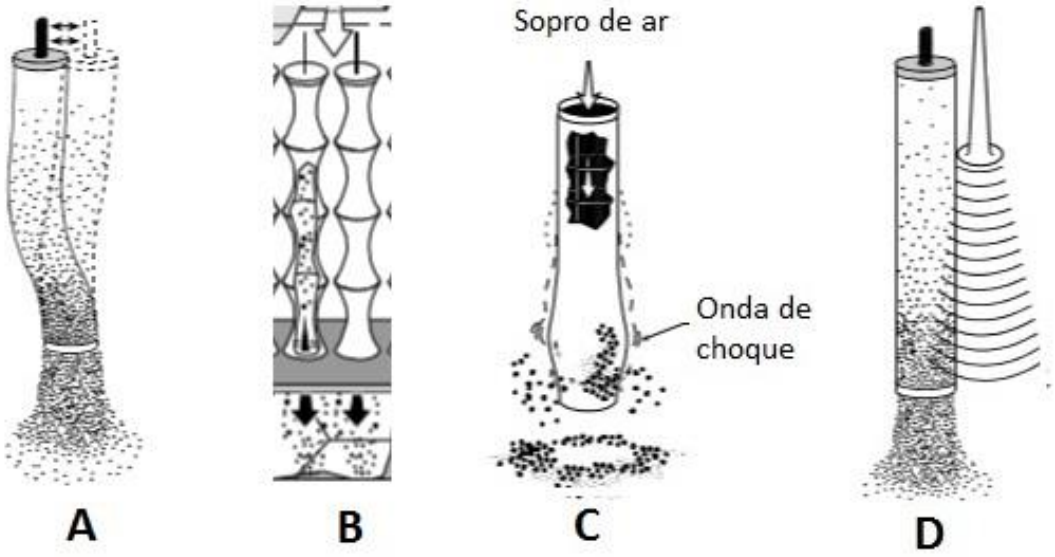

Figura 6 - Formas de limpeza de mangas. A: Sacudimento mecânico. B: Ar Reverso. C: Jato Pulsante. D: Sônico.
Fonte: Adaptado de: US-EPA (1995).

O sacudimento mecânico é uma forma antiga e pouco eficiente de limpeza. Tipicamente, as mangas são ligadas a um eixo movido por um motor externo, de modo que são agitadas, o particulado se solta da manga e é depositado na tremonha (US-EPA, 1995). Segundo Lora (2002) as principais vantagens são uma maior relação Ar-Pano que no fluxo reverso e um menor consumo de energia para a limpeza.

Filtros de ar reverso são compartimentados para permitir que um dos compartimentos seja isolado para a limpeza. Em geral, nesses filtros, o particulado é coletado na parte interna da manga e, no momento da limpeza, o ar passa no sentido inverso ao da filtração, provocando a fratura e o descolamento da torta (RODRIGUES, 2006; US-EPA, 1995).

Alguns sistemas realizam a agitação da manga por meio de vibração sônica. Um gerador de som é usado para produzir uma onda de baixa frequência provocando a vibração das mangas (US-EPA, 1995). Esta técnica geralmente é usada em associação com uma das outras descritas.

Por fim, a técnica mais comum de limpeza de filtros é o jato pulsante, técnica que se destacou devido à capacidade de tratar altas cargas de material particulado, trabalhar a uma queda de pressão constante e ocupar menos espaço que filtros com outras formas de limpeza (CHEREMISINOFF, 2002). Essa técnica consiste na injeção de um jato de ar

comprimido na parte superior da manga, o que interrompe o fluxo normal de ar e provoca a geração de uma onda de choque que expande a manga à medida que passa (US-EPA, 1995). Não é necessário o isolamento dos compartimentos durante a limpeza, realizada de forma *online*.

Apesar de ser o mais usado atualmente, o filtro de mangas com limpeza jato pulsante possui algumas desvantagens. Segundo Cooper e Alley (2011), essa técnica de limpeza pode provocar resuspensão do material, que volta à mesma manga ou a alguma manga das imediações. Além disso, o comprimento das mangas é limitado uma vez que o pulso de ar rapidamente dissipa sua energia. O custo também é uma importante consideração, uma vez que o uso de ar comprimido é o maior custo operacional de um filtro de mangas do tipo jato pulsante.

3.2.2.3. Mangas Filtrantes

Segundo Rodrigues (2006), os tecidos utilizados em filtração industrial atualmente englobam uma variedade considerável de materiais, incluindo tecidos trançados e tecidos não trançados ou feltros, os materiais de fabricação incluem cerdas naturais, artificiais e sintéticas. Alguns exemplos podem ser vistos na Figura 7. Existem ainda várias formas de tratamento, como mecânicos, térmicos e químicos, para melhorar o desempenho dos filtros de tecido. Esses tratamentos são justificados para:

- Assegurar a estabilidade adequada ao tecido;
- Modificar as características superficiais, alterando inclusive a capacidade de liberação da torta;
- Regular a permeabilidade do tecido e a capacidade de coleta;
- Minimizar a penetração de partículas e diminuir a colmatação do tecido.

Em geral a escolha do meio filtrante é determinada por limitações em relação à temperatura e resistência química, de modo que a resistência à corrosão, estabilidade dimensional e custo também são fatores considerados (THEODORE, 2008).

Além disso, a configuração da manga também é um fator importante. Atualmente há no mercado formatos diferentes de mangas que não a tradicional (cilíndrica), como a manga plissada e a Star-Bag. Tais modelos objetivam aumentar a área filtrante em relação às mangas tradicionais mantendo as dimensões do filtro.

As mangas plissadas são construídas por um processo no qual as fibras são calandradas sob calor e pressão, com o intuito de aumentar a área filtrante, reduzindo o tamanho total

do filtro (VIANA, 2009). Já a Star-Bag® possui um design especial de plissas, com a configuração semelhante à de uma estrela e permite aumentar de 65 a 100% a área filtrante do filtro de mangas (SOLAFT, 2015).

Figura 7 – Exemplos de diferentes mangas.
Fonte: Solaft (2016).

3.2.2.4. Eficiência de Coleta

A eficiência de coleta de um filtro de mangas é um importante parâmetro tanto para a avaliação de desempenho quanto para verificação de cumprimento dos limites legais de emissão. Não há fórmula única para a determinação da eficiência de coleta de um filtro de mangas com base nos parâmetros de projeto. Existem, no entanto, algumas equações teóricas que fazem uso de coeficientes determinados experimentalmente de modo a fornecer uma estimativa do valor da eficiência (US-EPA, 1995). Theodore (2008), por exemplo, sugere uma fórmula baseada nas características do tecido, da torta, do tempo de operação para o desenvolvimento da espessura da torta e da espessura do tecido. No entanto, em geral, valores de eficiência de coleta são fornecidos por fabricantes com base em valores conhecidos pela experiência (US-EPA, 1995).

Segundo Wang, Pereira e Hung (2004), algumas modificações podem ser realizadas para melhorar a eficiência de um filtro de mangas, entre elas a alteração da Razão Ar-Pano, alteração no tecido da manga e modificações no design do filtro para garantir que o fluxo de gás atinja as mangas de forma bem distribuída, de modo a promover uma filtração mais uniforme.

3.2.2.5. Design do Filtro de Mangas

Geralmente o design dos filtros de mangas é realizado com base na experiência do fabricante com processos e aplicações similares (US-EPA, 1995). Em geral, adota-se uma configuração de dutos de entrada e geometria do filtro e assume-se, para fins de cálculo, que o escoamento na entrada é uniforme e que todas as mangas estão sujeitas aos mesmos valores de velocidade e pressão, o que na prática não é verdade.

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

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

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 (informação verbal)[1]. É preciso destacar que a cada limpeza de mangas há um pico de emissão, de modo que uma operação com menos limpezas, a média da emissão é reduzida.

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.

3.3. Fluidodinâmica Computacional

A melhoria do comportamento do escoamento do fluido no interior de um filtro de mangas é um problema de engenharia. Para tal, segundo Maliska (2004), há três ferramentas para análise e solução: métodos analíticos, métodos numéricos e

[1] Informação passada por Rafael Sartim em maio de 2016.

experimentação em laboratório. Destes, a simulação numérica vem se destacando por poder resolver problemas complexos, com geometrias complexas e condições de contorno gerais, apresentando resultados com rapidez.

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

O uso da CFD cresceu drasticamente nas últimas décadas, principalmente desde a década de 90. Esse desenvolvimento se deve a várias causas, sendo as principais delas, o aumento exponencial da velocidade computacional associada à redução de seu custo, e esta tendência parece continuar. Além disso, deve-se ao desenvolvimento dos softwares de simulação e a melhoria de rotinas fundamentais, como a geração de malha e de métodos numéricos (NIELSEN, 2015).

A estrutura de um código da CFD contém três elementos principais, são eles: Pré-processamento, Solução do escoamento e Pós-processamento.

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

A solução do escoamento é realizada baseada nas leis da física que regem o escoamento dos fluidos, que são equacionadas gerando as equações básicas ou governantes. Esse equacionamento para as considerações deste trabalho é explicado no tópico 4.2.2.

No pós-processamento avaliam-se os resultados obtidos no Solver. Segundo o iESSS (2010), nesta etapa está uma das maiores vantagens da utilização do CFD: a facilidade de

explorar os resultados em qualquer parte do domínio, o que seria muito difícil usando técnicas experimentais.

3.4. Trabalhos correlatos

Trabalhos anteriores como o de Damian *et al.* (2004a,b), Feldkamp, Dickamp e Moser (2008), Nielsen, Skriver e Castaño (2011), Marques (2013), Rocha *et al.* (2014) e Pereira *et al.* (2016) destacam o grande potencial de aumento da eficiência de um filtro de mangas através da melhoria do design por meio da CFD, de modo a alcançar menores valores de perda de carga, melhor distribuição do fluxo e maior eficiência de filtração.

Damian *et al.* (2004a) desenvolveram um sistema de filtragem compacto para usinas de asfalto composto por um filtro de mangas e um pré-coletor de pó centrífugo, utilizando análises CFD para melhorar o desempenho do sistema. Após resultados de análises preliminares, os autores propuseram um novo projeto de filtro de mangas comparando com um sistema tradicional, alterando a manga, a geometria e a configuração da entrada, com a instalação de chapas defletoras. Em estudos preliminares, por Damian *et. al* (2004b), verificou-se em um teste de campo com a instalação de chapas defletoras uma redução na perda de carga do filtro de 800 Pa para 350 Pa. Assim, após a apresentação deste resultado na indústria onde a análise foi desenvolvida, o estudo prosseguiu e culminou no desenvolvimento de um novo sistema de filtração (DAMIAN *et al.*, 2004a). A simulação foi realizada considerando o regime estacionário, o fluido incompressível e de fase única. As mangas foram modeladas como meio poroso baseando-se na Lei de Darcy. Nas paredes foi estabelecida a condição de não deslizamento com uma rugosidade de 500 µm e adotou-se um plano de simetria. A utilização da ferramenta CFD para prototipagem auxiliou no desenvolvimento de equipamentos mais confiáveis, com menor custo e em menor tempo que por meios tradicionais.

Feldkamp, Dickamp e Moser (2009) realizaram a simulação de um precipitador eletrostático e de um filtro de mangas no intuito de destacar as possibilidades de utilização da CFD para design de novas plantas e *retrofit* de plantas existentes. Os autores realizaram a simulação dos dois equipamentos considerando a presença de partículas (duas fases) e observaram que o fluxo de entrada em ambos os casos estudados é não uniforme em relação à velocidade do gás e distribuição das partículas, o que prejudica a eficiência de coleta. Os autores concluíram que é possível aplicar a CFD em ambos os equipamentos considerando a presença de partículas com grande acurácia, sendo possível avaliar

questões como a otimização do escoamento, redução da perda de carga e melhoria da eficiência de coleta de forma rápida e econômica.

Já Nielsen, Skriver e Castaño (2011) realizaram três estudos de caso para *retrofit* de filtros de mangas existentes e um estudo de conversão de um precipitador eletrostático em um filtro de mangas, aplicando CFD. Quatro diferentes soluções foram encontradas para os casos estudados, que foram todos em indústrias cimenteiras. No primeiro caso de *retrofit* optou-se, após os resultados da CFD, pela aplicação de um sistema de chapas defletoras no manifold de entrada para direcionar melhor o fluxo nas entradas na tremonha. Essa melhoria foi efetivamente implantada e a melhoria na vida útil das mangas alcançada foi de 400% em relação ao caso base. No segundo estudo de caso, o design inicial sofria com recorrentes casos de falha das mangas por abrasão, de modo que diversas alterações intuitivas foram realizadas na planta, sem sucesso. Com a aplicação da CFD foi possível aprimorar a entrada na tremonha, removendo parte do duto de entrada na tremonha e instalando novas defletoras. O pico de velocidades de aproximação nas mangas, que antes era de 6 m/s, chegou a 2.5 m/s e a distribuição da vazão total em cada compartimento foi considerada adequada. No terceiro estudo de caso, o desgaste das mangas em determinadas áreas foi observado alguns meses após o início da operação do filtro, além de outros problemas como fluxo desbalanceado. Nele, concluiu-se que a solução contaria com um sistema de placas defletoras na tremonha e um sistema de chicanas nas entradas. O novo sistema apresentou melhorias em relação às velocidades máximas encontradas na proximidade das mangas e na distribuição das velocidades no equipamento. A solução não foi implementada, mas os resultados auxiliaram na implantação de ajustes menores no equipamento existente. Por fim, no estudo de conversão de um ESP em um filtro de mangas permitiu a instalação de dutos de entrada com *dampers* e chicanas em cada compartimento, alcançando uma boa distribuição e velocidades consideradas adequadas. Em resumo, o estudo concluiu que a técnica CFD aplicada a equipamentos de controle da poluição do ar permitem a predição do comportamento do escoamento e das perdas de carga, permitindo a avaliação de diferentes alterações no design dos mesmos.

Marques (2013) realizou a simulação de oito diferentes configurações do fluxo de entrada em um filtro de mangas visando determinar qual dos designs apresentava maior uniformidade na distribuição da vazão mássica entre as mangas, menor queda de pressão no equipamento e melhor distribuição da velocidade no meio filtrante. Das alternativas analisadas, a alimentação Colinear (duas entradas localizadas abaixo do meio filtrante) apresentou um melhor desempenho sob as mesmas condições operacionais, apresentando

melhor distribuição do fluxo entre as mangas, com menor velocidade de filtração e queda de pressão total. Neste trabalho, considerou-se o escoamento transiente, de fase única, incompressível e isotérmico, aplicando o modelo de turbulência *realizable* $k - \varepsilon$ e usando o software ANSYS Fluent v 13.0. A mesma geometria e condições supracitadas foram usadas em trabalhos posteriores de Rocha *et al.* (2014) e Pereira *et al.* (2016).

Rocha *et al.* (2014) compararam a entrada convencional, com entrada de ar no centro do meio filtrante, e a entrada tripla, localizada abaixo do meio filtrante com mesmo sentido de escoamento. Entre os dois casos analisados a entrada tripla se mostrou a mais vantajosa em termos de uniformidade da distribuição do fluxo de massa, velocidade e pressão na área de filtração, podendo promover uma vida útil maior das mangas, quando comparado à entrada convencional.

Já Pereira *et al.* (2016) avaliaram as entradas: Simples, com entrada localizada abaixo do meio filtrante, Convencional, com entrada de ar no centro do meio filtrante, Dupla Invertida, duas entradas localizada abaixo do meio filtrante e em sentidos opostos e Tangencial, com entrada lateral na carcaça do equipamento com escoamento tangenciando o meio filtrante. Dentre os casos analisados, a entrada dupla invertida apresentou o fluxo de massa nas mangas mais uniforme apresentando, no entanto, mais vórtices na tremonha que podem resuspender as partículas já depositadas.

O Quadro 1 resume as principais informações dos trabalhos supracitados, com destaque aos objetivos e à metodologia utilizada em cada um deles.

	Marques (2013) **Rocha *et al.* (2014) e Pereira *et al.* (2016)**	**Damian *et al.* (2004a)** **Damian *et al.* (2004b)**	**Nielsen, Skriver e Castaño (2011)**	**Feldkamp, Dickamp e Moser (2009)**
Objetivo	Simular diferentes posições de alimentação em filtro de mangas visando determinar qual dos designs apresenta melhor performance	Desenvolver um sistema de filtragem compacto para usinas de asfalto	Otimização de filtros de mangas existentes e conversão de um ESP em filtro	Expor as potencialidades do CFD em filtros de mangas e ESP
Solver	ANSYS Fluent v13.0	ANSYS CFX 5.0	STAR-CD	ANSYS CFX 11.0
Considera partículas	Não	Não	Sim	Sim
Malha	Não estruturada	Não estruturada	Não informado	Não informado
Regime	Transiente	Permanente	Permanente	Permanente
Modelo de turbulência	*Realizable* $k-\varepsilon$	Standard $k-\varepsilon$	Standard $k-\varepsilon$	Não informado
Condição de Entrada	Velocidade uniforme na entrada	Vazão prescrita	Velocidade uniforme na entrada	Não informado
Condição de Saída	Não informado	Condição de *outlet* (gradientes nulos)	Vazão prescrita	Não informado
Condição de parede	Não informado	Não deslizamento com rugosidade de 500µm	Não deslizamento	Não informado
Considerações adicionais	Isotérmico, incompressível	Isotérmico, incompressível, Simetria	Isotérmico, incompressível	Não informado
Permeabilidade da manga	$5{,}87 \times 10^{-10}$ m²	Não informado	Não informado	Não informado

Quadro 1 - Quadro comparativo de trabalhos correlatos.

4 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho consistiu inicialmente no levantamento de dados relativos a um caso base, o filtro de mangas instalado. A partir daí, definiram-se os parâmetros para modelagem matemática e método numérico para a solução do escoamento. Com base nos resultados preliminares, foram definidas alternativas ao caso base, cujo escoamento foi simulado seguindo o mesmo método. Cada uma dessas etapas é descrita nos próximos tópicos.

4.1. Coleta de dados

A primeira etapa do trabalho foi a coleta de informações sobre o equipamento existente, como dados de projeto e visitas ao equipamento. O Filtro de Mangas estudado neste trabalho faz parte do Sistema de Despoeiramento que atende ao Tratamento de Matérias Primas para os Altos Fornos de uma planta industrial siderúrgica. O projeto original do Filtro de Mangas é do ano de 1982 e muitas foram as modificações no equipamento desde então. A primeira etapa do estudo consistiu no recolhimento dos desenhos. Foi realizado registro fotográfico do filtro e dos dutos de entrada, conforme Figura 8.

(a) **(b)**

Figura 8 - Filtro de Mangas estudado (a) e detalhe de duto de entrada (b).

O filtro possui 2,5 m de largura, 6,4 m de altura, 14,4 m de comprimento. Dados adicionais são expostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Características do filtro de mangas estudado.

Vazão (m^3/min)	**1.999,7**
Nº de mangas	570
Diâmetro da Manga (mm)	175
Comprimento da Manga (mm)	3740
Nº de Compartimentos	1
Razão Ar-pano (m/min)	1,71

4.2. Modelagem Matemática

4.2.1. Domínio computacional e malha

Para a definição da geometria, no caso de simulações tridimensionais, é necessário utilizar softwares de desenho 3D. No presente trabalho utilizou-se o software SolidEdge e o ANSYS SpaceClaim para a confecção da geometria (Figura 9), de modo a representar de forma aproximada do caso real com as informações coletadas na etapa de coleta de dados.

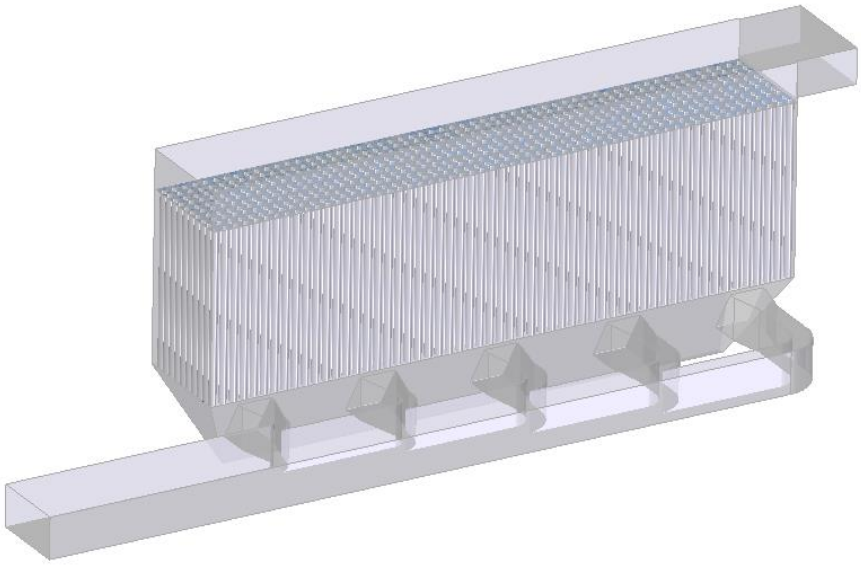

Figura 9 - Desenho 3D do filtro de mangas estudado no software SolidEdge.

Para a geração da malha utilizou-se o software ANSYS Meshing. As regiões da manga, do fluido interno e externo à manga foram modeladas com malha hexaédrica, uma vez que são esperados menores gradientes de velocidade nessas regiões, de modo a usar menos elementos. Nas regiões onde maiores gradientes de velocidade são esperados, como o duto de entrada, a tremonha, o *plenum* de ar limpo e o duto de saída, a malha utilizada foi

tetraédrica. A malha gerada pode ser observada na Figura 10, na qual destaca-se o refinamento nas curvas e nas paredes do *plenum* de ar limpo e o duto de saída.

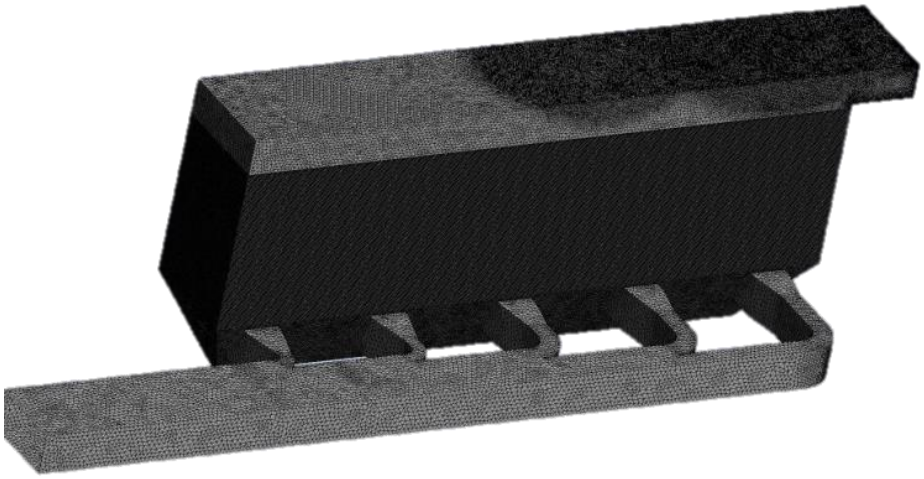

Figura 10 - Malha utilizada no Filtro de Mangas.

É necessário selecionar os fenômenos físicos e químicos que necessitam ser calculados, de acordo com as possíveis hipóteses simplificadoras do problema. Neste trabalho, o domínio é fluido (Ar a 25 ^{0}C) e algumas hipóteses referentes às condições do escoamento são definidas. Foram consideradas hipóteses:

Hipóteses	**Justificativa**
Escoamento Permanente	As propriedades do fluido podem ser consideradas constantes no tempo.
Fluido incompressível	O fluido pode ser considerado incompressível uma vez que o número de Mach é inferior a 0,3, o escoamento é permanente e isotérmico.
Condições isotérmicas	O filtro de mangas estudado compõe o sistema de despoeiramento da captação de correias transportadoras abertas ao ambiente, cujas variações de temperatura não são significativas, de modo que as trocas térmicas podem ser negligenciadas.

Quadro 2 – Hipóteses adotadas no estudo.

Outras informações importantes para representar a física do problema estudado são definidas. As mangas foram modeladas como domínio poroso e com base na Lei de Darcy e nas informações cedidas pelo fornecedor das mangas (BONELLI, 2015), calculou-se a permeabilidade darciana. Ressalta-se que essa permeabilidade corresponde à manga Star-

Bag de 100% poliéster com fibras antiestáticas, cuja geometria é diferente da manga que está sendo simulada, cilíndrica. Seu valor de permeabilidade e porosidade, exibidos na Tabela 3, foram usados em todas as simulações.

Tabela 3 - Permeabilidade e porosidade da manga adotadas na simulação.

k_1	$5{,}0178 \times 10^{-11}$	m^2
Porosidade	81,5%	

O valor da permeabilidade encontrado acima é próximo ao valor encontrado por Rosa (2014) experimentalmente para tecido de Poliéster, $k_1 = 5{,}1 \times 10^{-11}\ m^2$ sendo, portanto, factível para esse material.

4.2.2. Equações Básicas

De acordo com a hipótese do contínuo, um fluido pode ser tratado como uma distribuição contínua da matéria. No presente trabalho as variáveis analisadas serão a velocidade nas três direções $u_i = (u_1, u_2, u_3)$ e a pressão p, pois na física do problema a ser estudado não há transferência de calor ou reações químicas. Para tal, as seguintes leis serão consideradas:

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

As deduções detalhadas das equações a seguir podem ser encontradas em Fox e McDonald (1998) e Versteeg e Malalasekera (2007).

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \qquad (2)$$

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

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

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial\left(p\delta_{ij}\right)}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g \delta_{3i} \tag{4}$$

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

$$\tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \left(\frac{2}{3}\mu\ \frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\delta_{ij} \tag{5}$$

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

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial\left(p\delta_{ij}\right)}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g \delta_{3i} \tag{6}$$

Onde:

$$\tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{7}$$

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

4.2.3. Modelagem da Turbulência

Para predizer os efeitos da turbulência no escoamento é preciso utilizar-se de modelos de turbulência. Os modelos podem ser divididos, segundo Versteeg e Malalasekera (2007), em três categorias:

- Modelos de turbulência para Equações Médias de Reynolds (RANS: *Reynolds-averaged Navier-Stokes*): atenção é dada ao escoamento médio e aos efeitos da turbulência nas propriedades do escoamento médio. Os recursos computacionais necessários para obter resultados razoavelmente precisos são modestos de modo que têm sido o principal método para cálculo de escoamento nas últimas décadas.
- *Large eddy Simulation* (LES): é uma forma intermediária de cálculos de turbulência que compreende melhor os efeitos de grandes vórtices. Equações de escoamento transiente devem ser resolvidas, de modo que o esforço computacional é grande. Esse método está começando a ser utilizado para aplicações de CFD com geometria complexa.
- *Direct Numerical Simulation* (DNS): esse tipo de simulação calcula diretamente o escoamento médio e todas as flutuações turbulentas da velocidade. Requer um enorme esforço computacional, de modo que ainda não é muito utilizado para aplicações de engenharia.

No presente trabalho será utilizado o método RANS. Para tal, utiliza-se o conceito da decomposição de Reynolds, que consiste na representação das propriedades envolvidas em função de sua média e suas flutuações. Tomemos o exemplo da velocidade (u), tal como representado pela Equação 8 e pela Figura 11.

$$u\,(t) = \bar{u} + u'(t) \tag{8}$$

Onde $u\,(t)$ é a velocidade instantânea em t, $\bar{u}$ é a velocidade média e $u'(t)$ é a flutuação da velocidade no instante t.

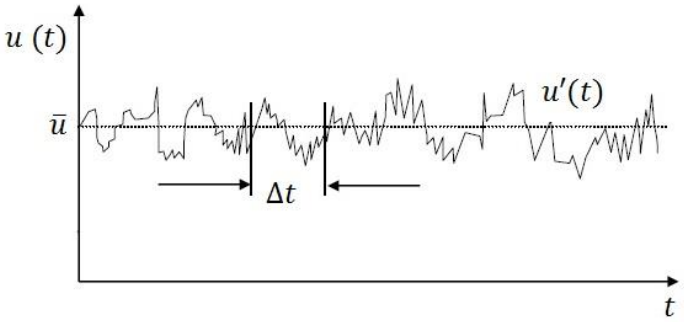

Figura 11 - Variação da velocidade típica de um escoamento turbulento.
Fonte: Adaptado de ANSYS (2013a)

Com esse conceito, pode-se trabalhar as equações básicas através de valores médios e suas flutuações. Dessa forma, substituindo as propriedades na sua forma instantânea pelos valores médios e flutuações nas equações de continuidade e Navier-Stokes, conforme o conceito da decomposição de Reynolds, tem-se:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial\left(\rho \bar{u}_j \bar{u}_i\right)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) - \rho\overline{u_i' u_j'}\right] + \rho g_i \tag{10}$$

A operação supracitada justifica o nome *Reynolds Averaging Navier-Stokes* (RANS), de modo que se nota o aparecimento de termos adicionais ($\rho\overline{u_i' u_j'}$) devido à interação entre as várias flutuações turbulentas. A esses termos dá-se o nome de Tensões de Reynolds.

Dessa forma, o problema da modelagem da turbulência é reduzido ao cálculo das tensões de Reynolds. Há na literatura algumas formas de se resolver esse problema e uma forma é baseada na analogia feita por Boussinesq em 1877, que propôs que as tensões de Reynolds podem ser proporcionais às taxas médias de deformação (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007), conforme equação 11.

$$-\rho\overline{u_i' u_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \tag{11}$$

Em que δ_{ij} é o delta de Kronecker, k é a energia cinética turbulenta $k = \frac{1}{2}\left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}\right)$ e μ_t é a viscosidade turbulenta, que necessita ser modelada.

Desta forma, substituindo a equação 11 na equação 10, tem-se:

$$\frac{\partial\left(\rho \bar{u}_j \bar{u}_i\right)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{eff}\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}\right] + \rho g_i \tag{12}$$

De modo que μ_{eff} é a viscosidade efetiva, e definida como:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \tag{13}$$

Para a modelagem da viscosidade turbulenta (μ_t) o modelo $k - \varepsilon$ destaca-se como uma boa opção, pois é um modelo sofisticado e amplamente utilizado para escoamentos turbulentos em casos industriais devido à sua robustez, economia computacional e acurácia razoável para uma variedade de escoamentos turbulentos.

O modelo $k - \varepsilon$ foca em mecanismos que afetam a energia cinética turbulenta. O mesmo foi desenvolvido por Launder e Spalding e possui duas equações: uma para k, a energia cinética turbulenta, e uma para ε, a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, baseado no entendimento dos processos relevantes que provocam mudanças nessas variáveis (VERTEEG; MALALASEKERA, 2007). Neste modelo, define-se a viscosidade turbulenta (μ_t) como:

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \tag{14}$$

O modelo $k - \varepsilon$ padrão utiliza as sequintes equações de transporte para k e ε, respectivamente, para regime permanente:

$$\frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k - \rho\varepsilon \tag{15}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \frac{\varepsilon}{k}(C_1 P_k - C_2 \rho\varepsilon) \tag{16}$$

P_k é a produção de energia cinética turbulência devido às forças viscosas.

As equações contêm cinco constantes ajustáveis. Os valores padrão utilizados para essas constantes, apresentados na Tabela 4, foram definidos através do ajuste das equações para uma grande variedade de escoamentos turbulentos.

Tabela 4 - Valores adotados para as constantes do modelo $\boldsymbol{k - \varepsilon}$**.**

C_μ	σ_k	σ_ε	C_1	C_2
0,09	1,00	1,30	1,44	1,92

Fonte: Verteeg e Malalasekera, 2007

4.2.4. Condições de Contorno

As condições de contorno necessárias para a solução do escoamento incluem a vazão mássica na entrada de Q_m calculada com base na vazão volumétrica de projeto, a condição de saída de pressão manométrica e a condição de não deslizamento nas paredes. Tais condições são descritas no Quadro 3.

Condição de Contorno	Levantamento
Entrada	Vazão mássica prescrita Q_m
Saída	Para a saída será adotada a condição de $p_m = 0\ atm$
Paredes	Condição de não deslizamento. $u_1 = u_2 = u_3 = 0$

Quadro 3 - Condições de Contorno utilizadas no trabalho.

4.3. Método Numérico

Para a solução das equações citadas anteriormente é preciso empregar um método numérico. Segundo Maliska (2004), há três métodos tradicionais para a solução numérica de equações diferenciais, são eles: Métodos de Diferenças Finitas (MDF), de Volumes Finitos (MVF) e de Elementos Finitos (MEF).

O presente trabalho utilizou o software ANSYS CFX (versão 16.0), que utiliza o Método dos Volumes Finitos. De acordo com Ferziger e Péric (2002), o Método dos Volumes Finitos utiliza as equações de conservação na forma integral como ponto de partida. O domínio é subdividido em volumes de controle e as equações diferenciais são integradas em cada um deles. No centroide de cada volume de controle se encontra um nó, para o qual cada propriedade é calculada e por meio de uma função de interpolação espacial é possível definir as propriedades para a superfície do volume de controle. O resultado é a equação de discretização contendo valores da propriedade para um grupo de pontos no domínio, compondo assim, um sistema linear de equações.

4.3.1. Termo advectivo

Para completar a discretização do termo advectivo é preciso correlacionar o valor da variável (ϕ) contida no nó situado do lado oposto ao sentido do escoamento (ϕ_{up}) com o valor da variável contida no ponto de integração (ϕ_{ip}) (VERARDI, 2007). O termo advectivo é implementado no ANSYS CFX conforme Equação 17.

$$\phi_{ip} = \phi_{up} + \beta\ \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \cdot \Delta r_i \tag{17}$$

Em que ϕ_{up} é o valor no nó a montante, r_i é o vetor a partir do nó a montante até o ponto de integração, e ϕ_{ip} é o valor no ponto de integração. As escolhas de β e $\frac{\partial \phi}{\partial x_i}$ representam diferentes esquemas de cálculo. No esquema Upwind de Primeira Ordem (*Upwind Difference Scheme*-UDS), considera-se $\beta = 0$, ou seja, o valor no ponto de integração igual ao valor no nó a montante (ANSYS, 2013a). Outra possibilidade é o Esquema de Correção da Advecção numérica (Specified Blend Factor), no qual se escolhe o valor de β entre 0 e 1 e fazendo $\frac{\partial \phi}{\partial x_i}$ igual à média dos gradientes dos pontos nodais adjacentes. Tal esquema reduz os erros associados à UDS (ANSYS, 2013a).

No esquema das diferenças centrais (Central Difference Scheme – CDS), o valor de β é considerado 1 e $\frac{\partial \phi}{\partial x_i}$ é igual ao gradiente do elemento local (ANSYS, 2013a).

No presente trabalho, utilizou-se o *High Resolution Scheme*, que utiliza uma função não linear para β em cada nó. Nele, o β é computado localmente no volume de controle e será tão próximo a 1 quanto possível sem introduzir oscilações numéricas. O termo $\frac{\partial \phi}{\partial x_i}$ é considerado igual ao gradiente da variável do nó à montante (ANSYS, 2013a). A utilização deste esquema oferece uma ótima precisão (VERARDI, 2007). Apenas para as equações de k e ε utilizou-se esquema *Upwind* de Primeira Ordem (*Upwind Difference Scheme*-UDS).

4.3.2. Acoplamento Pressão-Velocidade

Se o gradiente de pressão é conhecido, é possível conhecer o campo de velocidades pela equação da conservação do momento. No entanto, geralmente na simulação de escoamentos, pretende-se calcular o gradiente de pressão como parte da solução (VERTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Segundo Mendes (2007), o pacote ANSYS CFX utiliza uma solução acoplada do sistema de equações, e para envolver a pressão na equação da conservação da massa o software utiliza o esquema de interpolação Rhie-Chow, cuja explicação detalhada por ser encontrada em ANSYS (2013b).

4.3.3. Solução do sistema linear de equações

De acordo com ANSYS (2013), para a solução do sistema linear de equações, o ANSYS CFX utiliza o método *Multigrid* (MG) em conjunto com a técnica de

decomposição LU incompleta (*Incomplete Lower Upper*). A técnica Multigrid Algébrico envolve a aplicação de iterações preliminares em malhas mais finas e iterações posteriores em malhas progressivamente maiores e então, transferir os resultados da malha maior para a malha original, mais fina (ANSYS, 2013a).

O critério de convergência adotado para este trabalho foi o RMS (*root mean square* – raiz quadrada média) do residual inferior a 10^{-4}, sendo esse um valor considerado razoável para muitas aplicações de engenharia (ANSYS, 2013b). Também foram monitorados os valores de *imbalance*, que representam o balanço do escoamento em cada domínio. De acordo com Ansys (2013b), os valores de *imbalance* devem ser inferiores 1%. Além disso, os valores de velocidades em dois pontos do domínio foram monitorados durante as iterações, um na tremonha e um no *plenum* de ar limpo, de modo que a estabilização desses valores também foi considerada para a avaliação da convergência.

4.4. Analise de Alternativas

Inicialmente, analisou-se um caso referência, que consiste no filtro de mangas instalado, cuja descrição se encontra no tópico 4.1. Nele foram avaliados o comportamento do escoamento e sua distribuição no interior do filtro. Com base nos resultados originados dessa análise foram identificadas potenciais melhorias e propostas alternativas de alteração do design original, posteriormente analisadas confrontando seus resultados com aqueles obtidos no caso referência.

As alternativas propostas foram: (b) a redução da vazão para 60% da vazão de projeto, (c) a divisão do duto de entrada em dois, direcionando 40% da vazão para as duas primeiras entradas na tremonha e 60% da vazão para as três últimas entradas e (d) a instalação de duas chapas defletoras por entrada. Ressalta-se que uma premissa para a seleção de alternativas foi a exequibilidade do ponto de vista de implantação, isto é, mudanças que poderiam ser realizadas no filtro existente.

4.4.1. Caso (b) – Vazão Reduzida

No intuito de avaliar o impacto da Razão Ar-Pano no escoamento, alterou-se a vazão de entrada para 60% da vazão do caso base. Deste modo, a Razão Ar-Pano reduziria de 1,71 m/min para 1,03 m/min. A nova vazão foi escolhida para avaliar a influência da

redução da razão Ar-Pano de um valor tipicamente alto (1,71 m/min), próximo aos valores máximos destacados no tópico 3.2.2.1, para um valor conservador, seguindo uma tendência mais usada na indústria atualmente. A experiência na indústria indica que estes valores promovem equipamentos com melhor desempenho em termos de eficiência de filtração (informação verbal)[2] de modo que se optou por avaliar esta alternativa.

Além disso, a redução da vazão para esse patamar é uma prática que já foi realizada na operação do filtro implantado (informação verbal)[3]. A geometria do caso base foi mantida, alterando-se apenas a vazão.

4.4.2. Caso (c) – Chapa divisora em duto de entrada

Para avaliar a influência da distribuição do fluxo de entrada no filtro através do duto de entrada, propôs-se como caso alternativo o estudo do duto de entrada contendo uma chapa divisora do escoamento, prescrevendo uma vazão para o trecho do duto conectado às duas primeiras entradas na tremonha (40% da vazão total) e às três últimas (60% da vazão total). Assim, para a o caso (c), manteve-se a mesma vazão total do caso base, alterando apenas a geometria do duto de entrada conforme Figura 12.

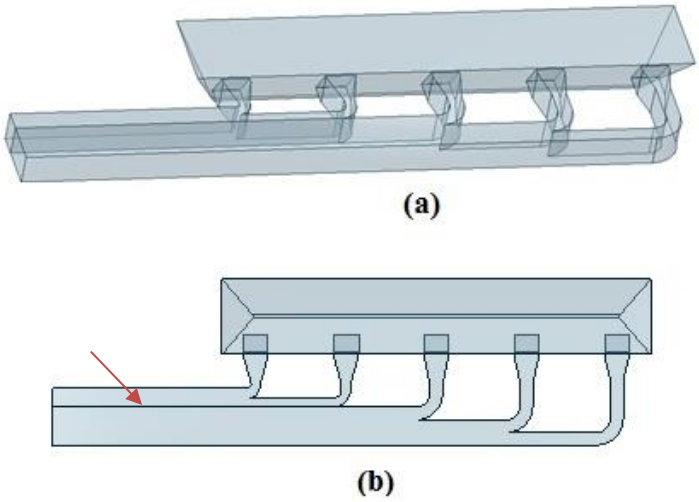

Figura 12 - Duto de entrada com chapa divisora do escoamento em (a) vista isométrica e (b) vista em planta, com seta destacando o local de implantação da chapa divisora.

4.4.3. Caso (d) –Defletoras

[2] Informado por Rafael Sartim em aula na Universidade Federal do Espírito Santo em setembro de 2014.
[3] Informação fornecida pelo Inspetor do Filtro de Mangas instalado, Douglas Bezerra, em julho de 2015.

No filtro analisado o escoamento entra pela tremonha sem dispositivos direcionadores de escoamento, como chapas defletoras. Propôs-se, nesse caso, analisar o escoamento na presença dessas chapas, instaladas em cada uma das cinco entradas. As defletoras foram desenhadas com 200 mm e instaladas nas alturas 1/3 e 2/3 da altura total do duto de entrada. A escolha do ângulo e do posicionamento das defletoras se deu após a análise dos resultados preliminares do caso base, intencionando o direcionamento do escoamento para as mangas localizadas na região central do filtro.

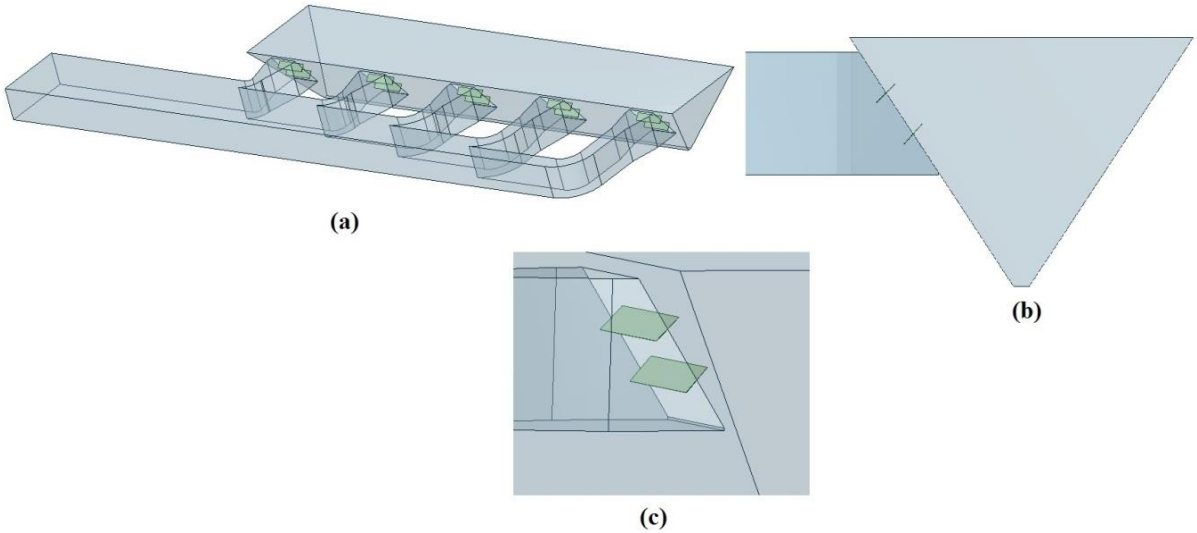

Figura 13 - Duto de entrada com chapas defletoras em (a) vista isométrica, (b) vista lateral e (c) detalhe da defletora.

5 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos por meio das simulações computacionais realizadas. No tópico 5.1 serão apresentados os resultados obtidos no caso base, o filtro de mangas existente. A análise é feita com base nas linhas de corrente, avaliação de velocidades, razão ar-pano nas mangas, distribuição da pressão e vazão mássica. Este caso será a referência comparativa para as análises feitas no tópico seguinte (5.2) que abordam as alternativas propostas no intuito de melhorar o escoamento que consideram as seguintes alterações: a redução da vazão para 60% da vazão de projeto (b), a divisão do duto de entrada em dois, direcionando 40% da vazão para as duas primeiras entradas na tremonha e 60% da vazão para as três últimas entradas (c) e a instalação de duas chapas defletoras por entrada (d). Por fim, após a análise dos resultados propôs-se a análise de duas alternativas complementares, considerando a combinação de soluções testadas. São elas: a instalação de defletoras com a redução da vazão (e) e a divisão do duto de entrada com a redução da vazão (f).

5.1. Caso Base

5.1.1. Teste de Malha

Conforme descrito no tópico 4.2.1, a malha é fundamental para a precisão dos resultados. Assim, para reduzir os erros numéricos resultantes da discretização das equações básicas por meio do método numérico, foi realizado um teste de sensibilidade de malha. Esse teste está descrito no Apêndice A. Dentre os diferentes tamanhos de malhas estudadas, escolheu-se a malha com 26,7 milhões de pontos nodais.

A simulação foi realizada em processamento paralelo dividida em 16 núcleos com 128 GB de RAM disponível, e a convergência foi alcançada após 49 horas.

5.1.2. Linhas de Corrente

Verificam-se na Figura 14 as linhas de corrente (*streamlines*) do escoamento do caso base. A partir delas observa-se uma grande quantidade de vórtices e uma intensidade maior dos níveis de turbulência na região de entrada e nas tremonhas. Esse comportamento do escoamento, além de dissipar energia por meio das tensões de cisalhamento geradas pelos vórtices, pode provocar uma resuspensão das partículas que estão depositadas nessa região e encaminhá-las novamente para as mangas.

A velocidade média indicada para escoamento em dutos de sistemas de ventilação industrial está na faixa de 17 m/s a 20 m/s (ACGIH, 2010), podendo ser adotado em algumas aplicações uma faixa de 15 m/s a 27 m/s (informação verbal)[4]. Conforme visto, a velocidade do escoamento no duto de entrada está de acordo com as recomendações citadas.

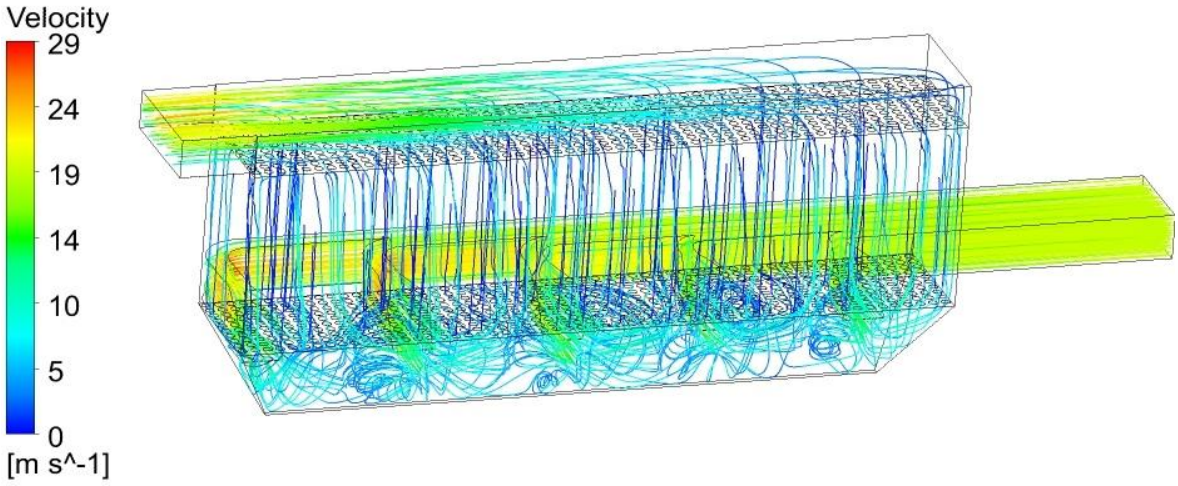

Figura 14 – Linhas de Corrente no caso base com destaque para a tremonha.

5.1.3. Avaliação das velocidades

Inicialmente, realizou-se a análise das velocidades médias do escoamento em cada uma das entradas do filtro, conforme visto na Figura 15. Observa-se a diferença considerável na distribuição da velocidade média em cada uma das cinco entradas, de modo que as velocidades na Entrada 1 e 2 são inferiores às outras três. É importante ressaltar que, para uma melhor distribuição do escoamento no interior do filtro, o que afeta diretamente a eficiência do mesmo, é fundamental uma distribuição uniforme das velocidades de entrada. Portanto, com base nos resultados da Figura 15, pode-se concluir que tal parâmetro é deficiente no filtro de mangas em estudo.

[4] Informação passada por Rafael Sartim em aula na Universidade Federal do Espírito Santo em setembro de 2014.

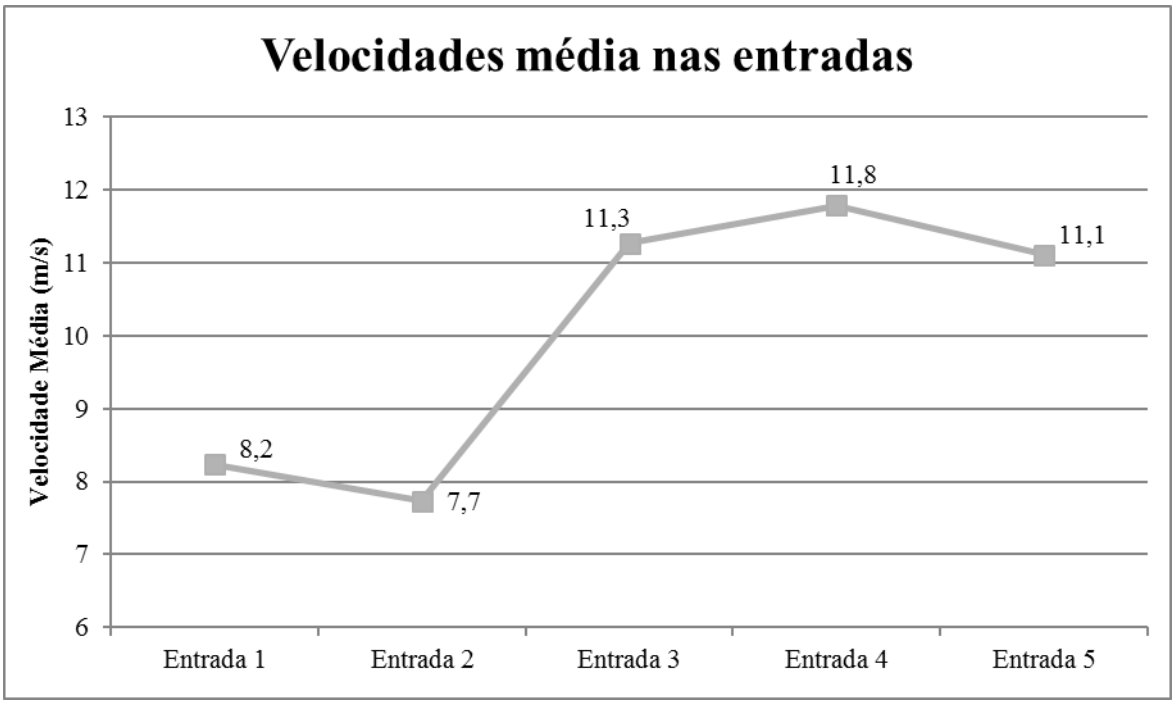

Figura 15 - Velocidade média em cada entrada do filtro estudado.

A distribuição de velocidades na entrada do filtro também pode ser observada na Figura 16, que mostra o campo de velocidades em um plano horizontal situado na metade da altura do duto de entrada. Observa-se que, apesar das diferenças nas velocidades médias exibidas na Figura 15, os perfis de velocidades nas entradas da tremonha são similares.

Nota-se que, após a curva, o escoamento se descola na lateral interna gerando uma zona de recirculação e uma consequente aceleração na região lateral, onde as velocidades chegam a valores superiores a 15 m/s quando as velocidades médias exibidas na Figura 15 são da ordem de 7 a 12 m/s. No lado interno das três últimas curvas pode-se observar um aumento demasiado da velocidade, com valores da ordem de 25 m/s, que possui reflexos na região próxima ao cone de entrada. Tais regiões são, normalmente, pontos que necessitam atenção em termos de manutenção uma vez que, devido a essas velocidades altas, há um maior atrito das partículas contidas no fluxo com a parede e, consequentemente, um maior risco de danos, tais quais furos na estrutura. A distribuição apresentada evidencia que o perfil de velocidades na entrada da tremonha não é uniforme, conforme geralmente considerado durante o dimensionamento.

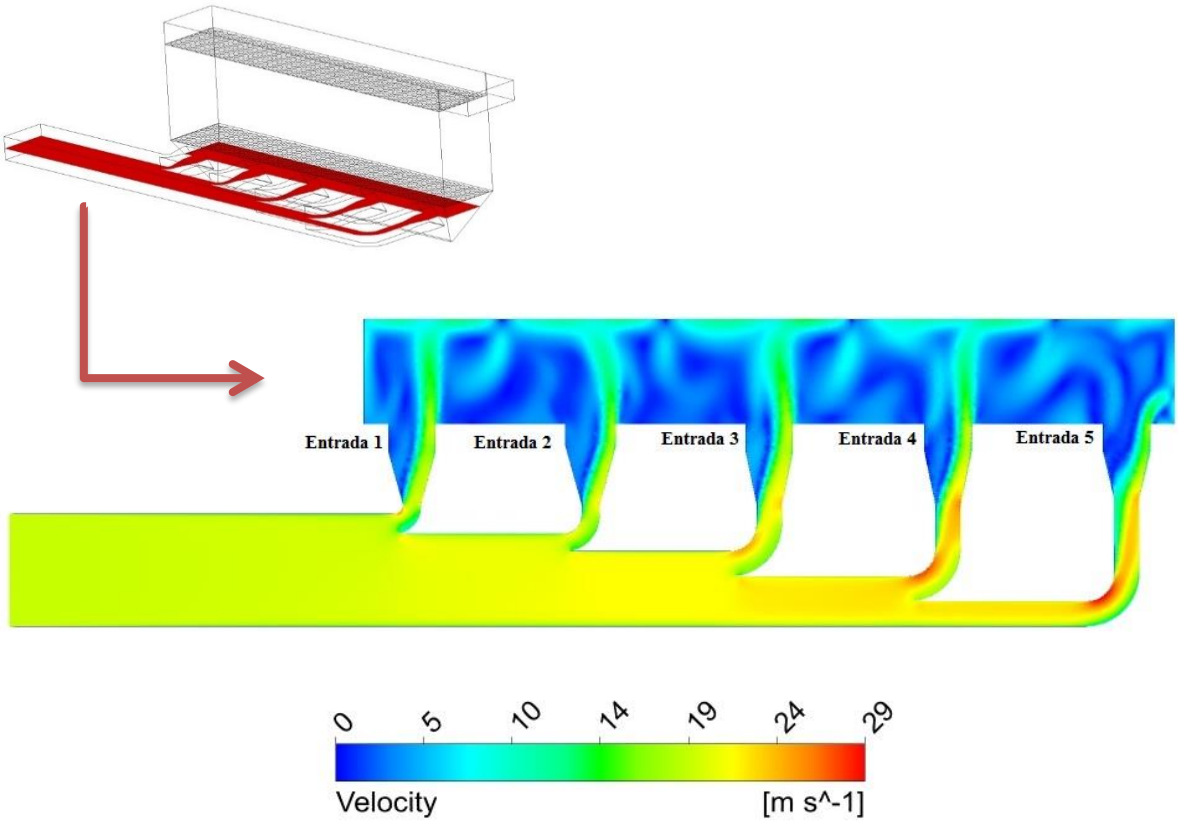

Figura 16 - Velocidades no plano horizontal à metade da altura do duto de entrada.

No intuito de aprofundar a análise da entrada na tremonha, os vetores velocidade no plano vertical no centro da entrada 4, de maior velocidade média, são exibidos na Figura 17. É possível observar a formação de vórtices na região inferior da tremonha, alcançando valores de até 10 m/s, suficiente para resuspender o particulado já depositado. Além disso, observa-se que o escoamento se direciona para a parede posterior da tremonha, direcionando o fluxo para cima, junto à parede lateral do filtro.

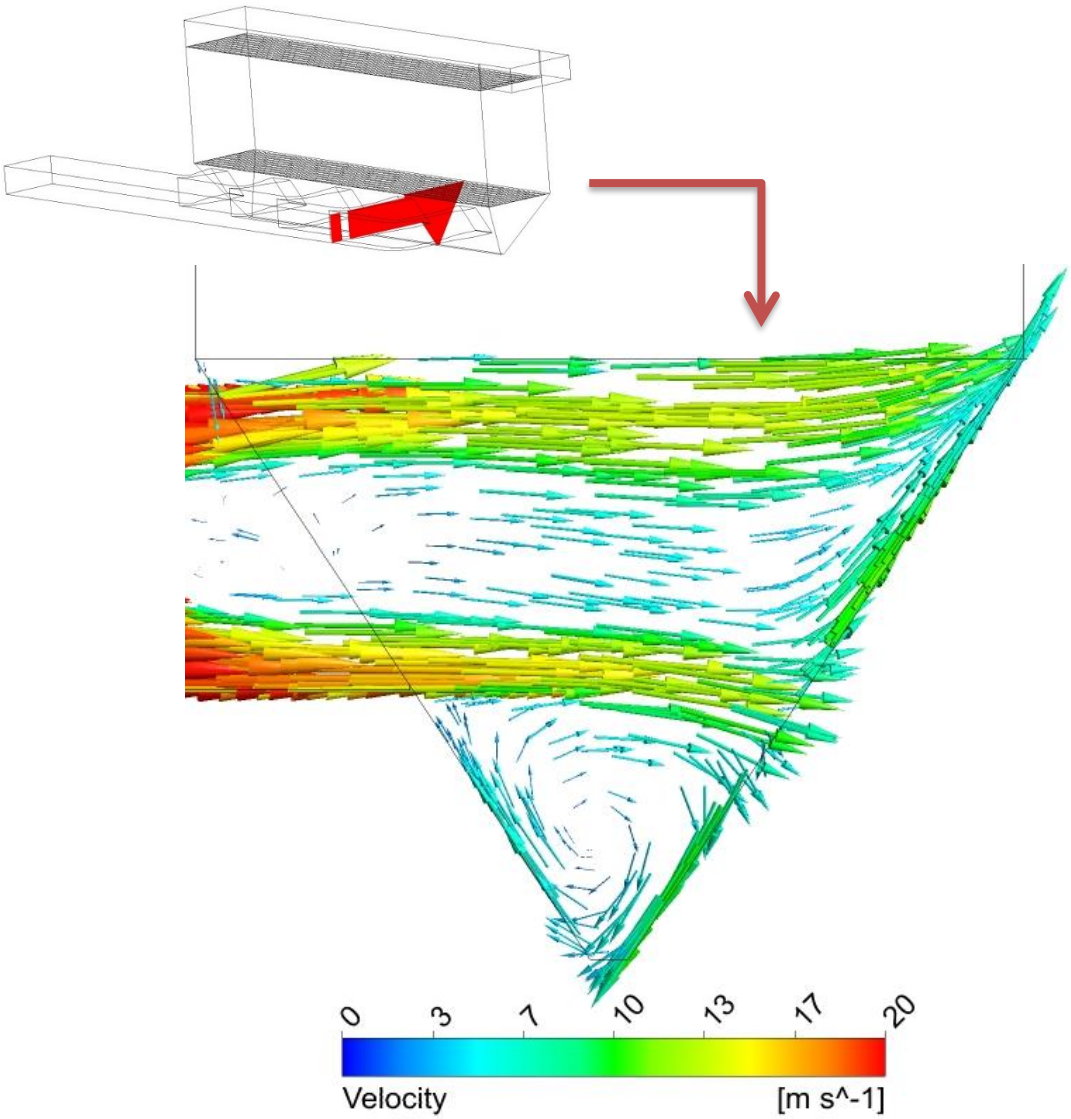

Figura 17 - Vetores Velocidade no plano vertical localizado na Entrada 4.

Percebe-se também a existência de recirculação na região central do cone de entrada, como pode ser visto na Figura 18, que mostra a distribuição dos vetores no plano da entrada 4. Além disso, velocidades da ordem de 15 m/s são verificadas no plano, enquanto valores típicos de projeto usados atualmente para a velocidade de entrada em filtros de mangas estão entre 3 m/s a 5 m/s (informação verbal)[5] em aplicações semelhantes.

[5] Informado por Rafael Sartim em setembro de 2015.

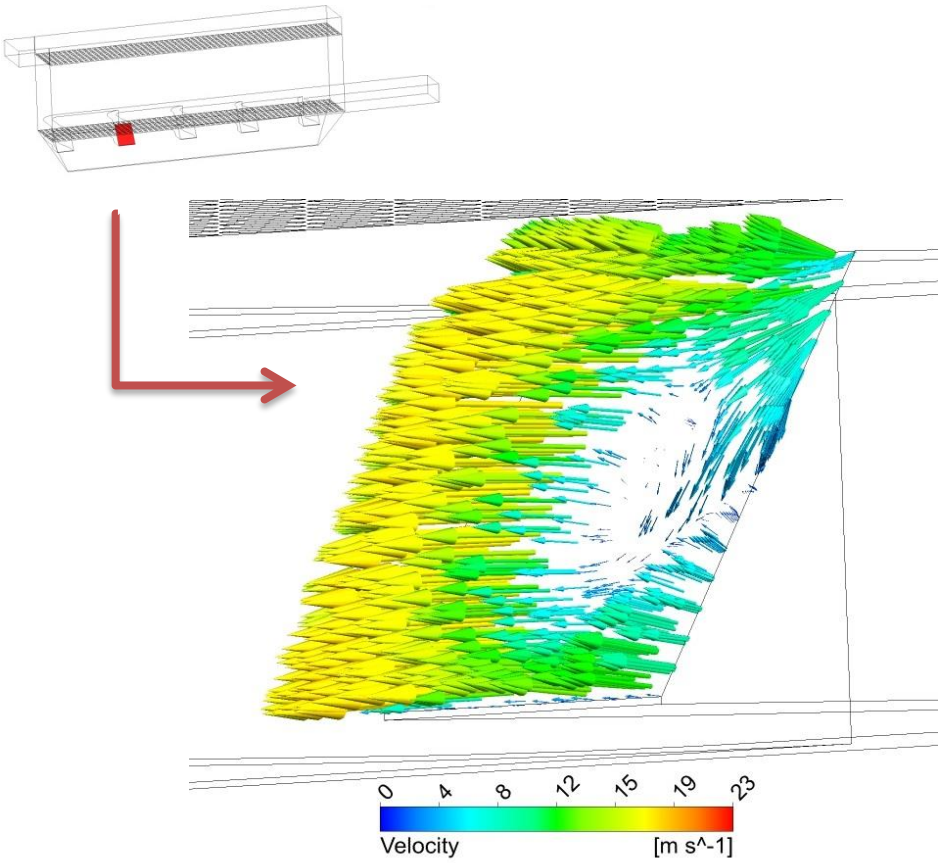

Figura 18 - Vetores Velocidade no plano localizado na entrada 4 da tremonha.

Uma consequência das altas velocidades na entrada da tremonha são as altas velocidades com as quais o fluxo se aproxima das mangas. Percebe-se que quando a superfície da manga é atingida com velocidades muito mais altas que a velocidade média na superfície do meio filtrante (0,068 m/s), o fluxo atravessa a região oposta da manga, conforme destacado pelo círculo na Figura 19. Além disso, as altas velocidades podem desgastar o material da manga pelo aumento do atrito com a gaiola.

É preciso destacar que este comportamento pode variar quando há presença de material particulado. A formação da torta de filtração e a perda de carga associada a ela podem alterar as regiões de fluxo preferencial e reduzir esse efeito. Ainda assim, esta análise indica regiões propensas à existência de altas velocidades.

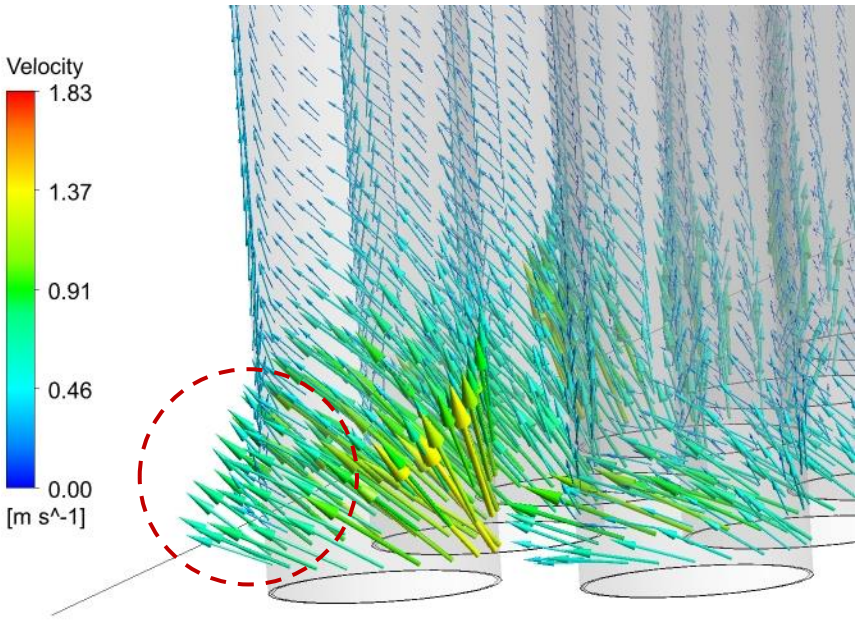

Figura 19 - Detalhe de região da manga atingida por altas velocidades.

A existência de regiões do meio filtrante em que o escoamento ocorre para fora das mangas, ao contrário do que se espera para a operação de filtração, será melhor abordada no tópico 5.1.6.

5.1.4. Razão Ar-Pano

Conforme discutido no tópico 3.2.2.1, a razão Ar-Pano ou velocidade de filtração é um importante parâmetro de projeto em um filtro de mangas. Na Figura 20 plotou-se esta variável na superfície da manga.

A velocidade de filtração de projeto do filtro estudado é 1,71 m/min, equivalente a 0,029 m/s. É possível observar na Figura 20 que poucas regiões possuem valores próximos a essa referência. Nesta figura, o intervalo de valores foi escolhido excluindo os extremos da razão ar-pano, para que os resultados da distribuição pudessem ser melhor visualizados. A região com os valores máximos é exibida posteriormente na Figura 21.

Como verificado nas análises anteriores, o escoamento entra com uma velocidade demasiadamente alta se direcionando para a parede posterior da tremonha, este comportamento dificulta a passagem do fluido pela região central do filtro. Verifica-se que a região das mangas mais próxima ao espelho está sujeita a velocidades de filtração mais altas. Como elas estão mais próximas ao *plenum* de ar limpo e à saída, as pressões do fluido interno às mangas são mais baixas, estimulando a existência de velocidades mais

altas nessa área. Regiões de fluxo de massa, cuja distribuição é análoga à razão ar-pano, com valores mais altos no topo das mangas também foram verificadas por Pereira *et al.* (2016) quando os autores analisaram filtros com entrada localizada na tremonha, similar ao caso estudado no presente trabalho.

Na região posterior do filtro (Figura 20-b) percebem-se mais regiões de altas velocidades de filtração (maiores que 0,10 m/s), o que se deve justamente aos altos valores de velocidades de ascensão do fluido nessa região.

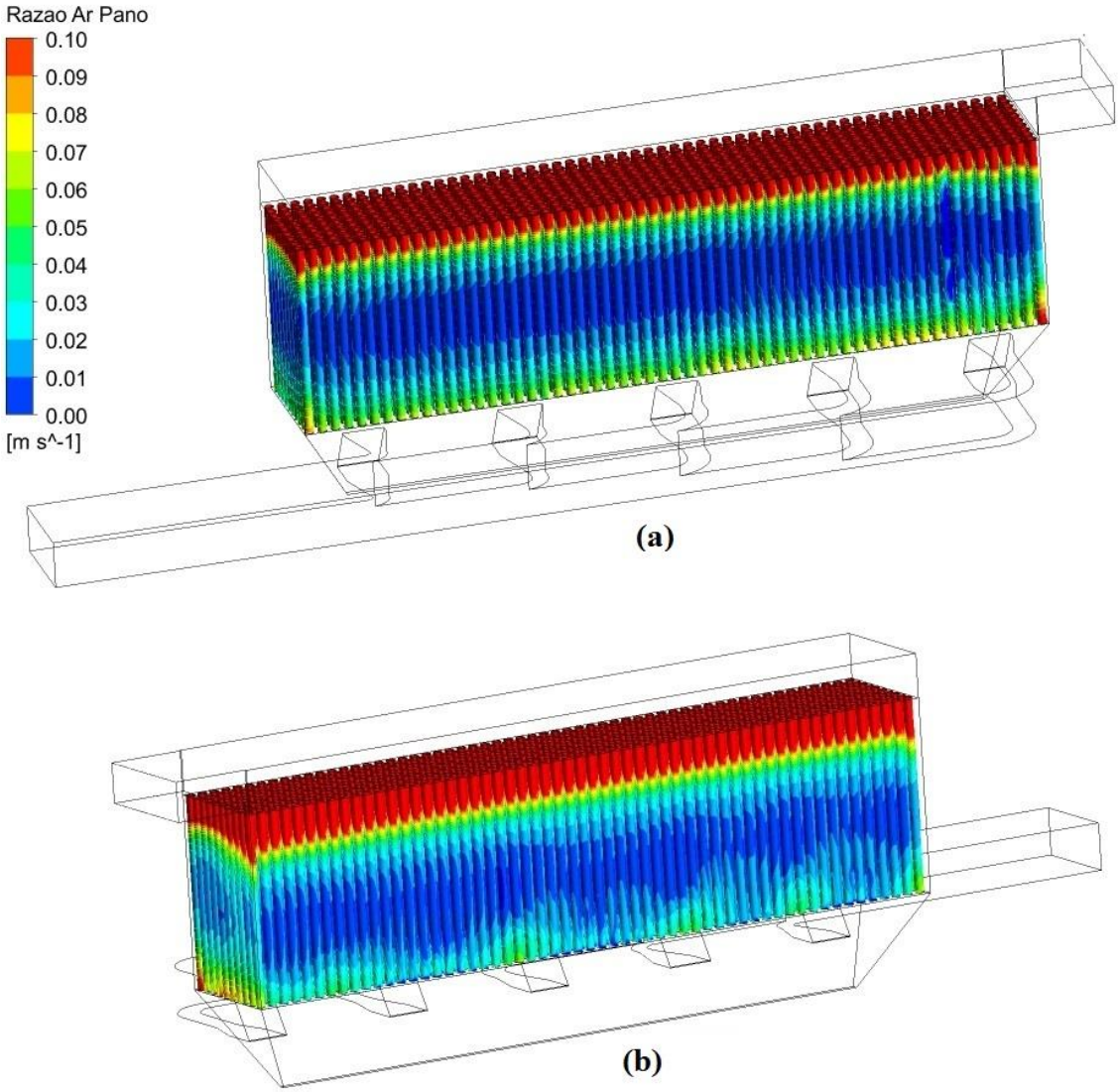

Figura 20 - Velocidade de Filtração no Filtro de Mangas na região (a) frontal e (b) posterior.

Na Figura 21 é possível verificar mais claramente o impacto das altas velocidades de direcionadas à região posterior do filtro. A velocidade de filtração máxima, verificada na região mais próxima ao espelho, é de 0,71 m/s, aproximadamente 25 vezes superior à

velocidade de filtração de projeto. Conforme visto anteriormente, velocidades de filtração muito altas reduzem o tempo de filtração, porém, favorecem a penetração de partículas no tecido dificultando a remoção da torta e provocam maiores perdas de carga, já que podem aumentar a resistência do meio filtrante ao ar (TOGNETTI, 2007; ROCHA, 2010).

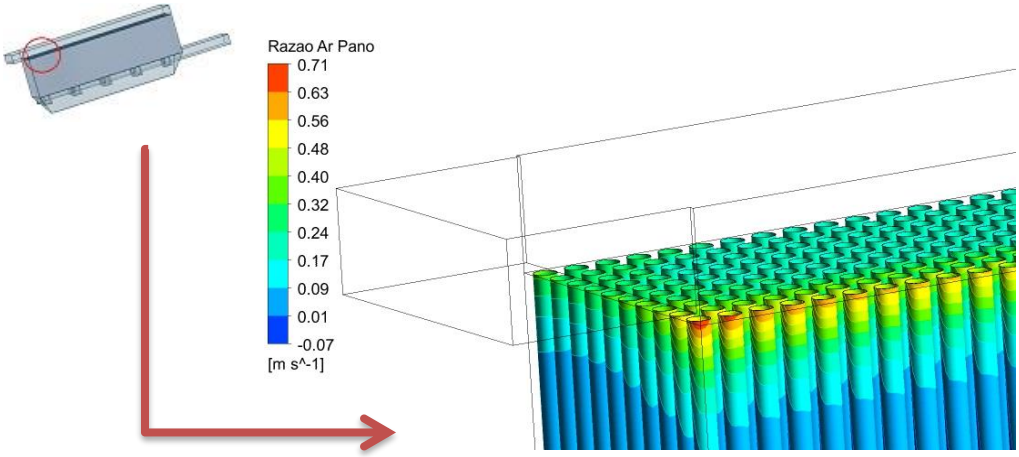

Figura 21 - Região de maiores valores de razão ar-pano, na região posterior do filtro de mangas.

Com a formação da torta de filtração é possível que a distribuição aqui apresentada seja alterada. Apesar disso, os resultados são factíveis e revelam a não uniformidade da distribuição, encontrada também em trabalhos anteriores como Pereira *et al.* (2016) e Rocha *et al.* (2014).

5.1.5. Distribuição da pressão

O valor do ΔP do filtro, calculado pela simulação, resultou em 1017 Pa (104 mmca). A perda de carga média do filtro de mangas existente fica entre 150 a 180 mmca em condições normais de operação (informação verbal)[6]. Além disso, a experiência da indústria indica que no início da operação (*start-up*) de filtros de mangas semelhantes, com mangas novas e apenas uma camada de particulado sobre elas para proteção, a perda de carga varia em torno de 80 a 110 mmca (informação verbal)[7] Sendo assim, considerando que a perda de carga devido à torta de filtração não foi contabilizada nessa simulação pela ausência de partículas, o valor encontrado para ΔP está dentro da faixa esperada.

[6] Informado pelo Inspetor do Filtro de Mangas instalado, Douglas Bezerra, em consulta verbal em junho de 2016.
[7] Informado por Rafael Sartim, em maio de 2016.

Analisando a Figura 22, que apresenta a distribuição da pressão na superfície da manga, observa-se que as regiões de menor pressão se localizam nas proximidades da saída do filtro, cuja condição de contorno adotada foi de abertura para a atmosfera. A pressão é maior nas mangas mais próximas às primeiras entradas e à tremonha, e vai diminuindo à medida que se aproxima da região da saída. Regiões de valores de pressão máximos se localizam nas mangas na região posterior do filtro, nos pontos mais próximos à tremonha.

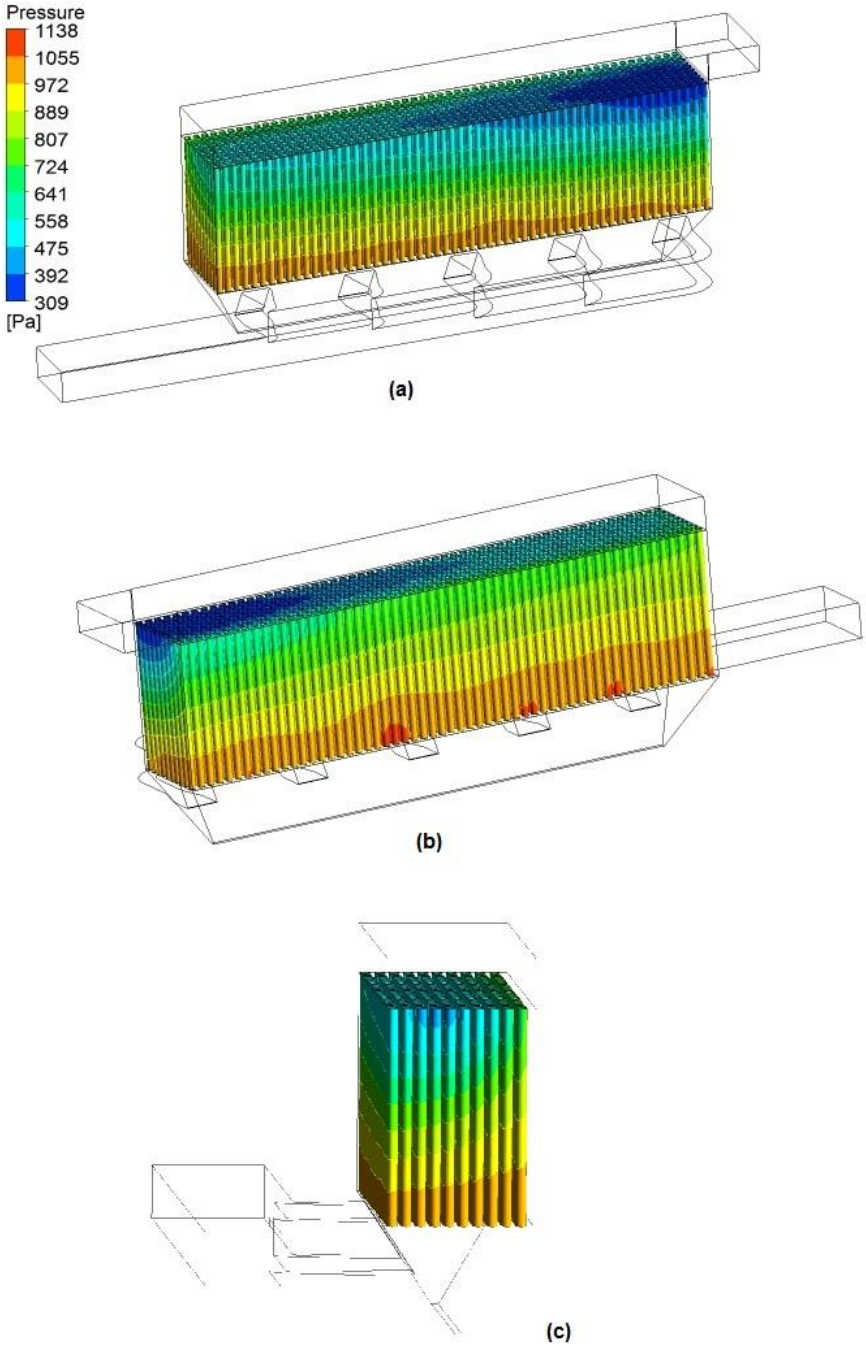

Figura 22 - Distribuição da pressão nas mangas no Caso Base na região (a) frontal, (b) posterior e (c) central.

5.1.6. Vazão mássica

A análise da distribuição da vazão mássica é análoga à distribuição da razão ar-pano, no entanto, destaca-se aqui uma informação importante dos resultados. Observou-se a presença de vazão mássica nula ou negativa, ou seja, regiões que o escoamento não atravessa ou que o fluxo sai da manga quando o mesmo deveria ser no sentido de fora para dentro da mesma. Estas regiões são destacadas em vermelho na Figura 23, e se localizam principalmente na região central das mangas.

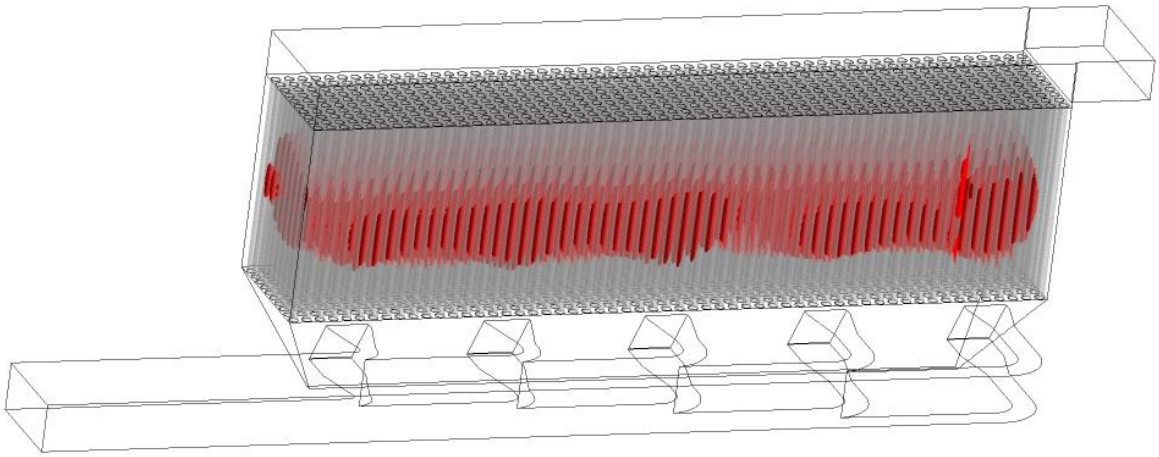

Figura 23 – Regiões destacadas em vermelho com vazão mássica igual ou menor que zero nas mangas.

Tal efeito também foi encontrado por Pereira *et al.* (2016), que destacam que esse fenômeno reduz a área de filtração efetiva e é prejudicial para o equipamento como um todo. Os autores propõem o cálculo de ums porcentagem da área filtração efetiva como a porcentagem da área filtrante em que o fluxo de massa é superior a zero. Ressalta-se que esse conceito é diferente da eficiência de coleta, que é a razão da concentração de material particulado na entrada e na saída do filtro, conforme discutido no item 3.2.2.4.

Reitera-se, novamente, que a formação da torta pode alterar esse comportamento. No entanto, tendo em vista que este trabalho tem por fim avaliar o escoamento do fluido, adota-se a porcentagem da área de filtração efetiva como critério de avaliação. No caso base, tal porcentagem é igual a 79,86%.

5.2. Análise das alternativas

Após as avaliações realizadas no caso base, foram propostas e estudadas alternativas no intuito de melhorar o escoamento do ponto de vista de uniformidade das velocidades na entrada e de filtração, distribuição de pressão e do fluxo de massa e área de filtração efetiva. As alternativas analisadas foram: (b) a redução da vazão para 60% da vazão de projeto, para verificar a influência da redução das velocidades de entrada bem como a redução da razão ar-pano para um valor mais conservador, já que as velocidades da entrada no caso base se mostraram demasiadamente altas. O caso (c) propõe a divisão do duto de entrada em dois, direcionando 40% da vazão para as duas primeiras entradas na tremonha e 60% da vazão para as três últimas para verificar influência de uma distribuição mais uniforme das vazões em cada cone de entrada, uma vez que as velocidades médias em cada entrada se mostraram bastante diferentes na análise do caso base. E no caso (d) propôs-se a instalação de duas chapas defletoras em cada uma das cinco entradas, no intuito de melhorar o direcionamento do fluxo para a região central do filtro e reduzir os vórtices na tremonha, fatores deficientes do caso base.

5.2.1. Linhas de Corrente

As linhas de corrente do caso base e das alternativas analisadas, exibidas na Figura 24, indicam pouca variação da presença de vórtices nas alternativas propostas. O caso da vazão reduzida (b) apresenta uma redução das velocidades na tremonha justamente pela redução da velocidade de entrada. Na alternativa com o duto dividido (c) e com as defletoras (d), os vórtices são menos presentes na região inferior da tremonha, onde as partículas são depositadas.

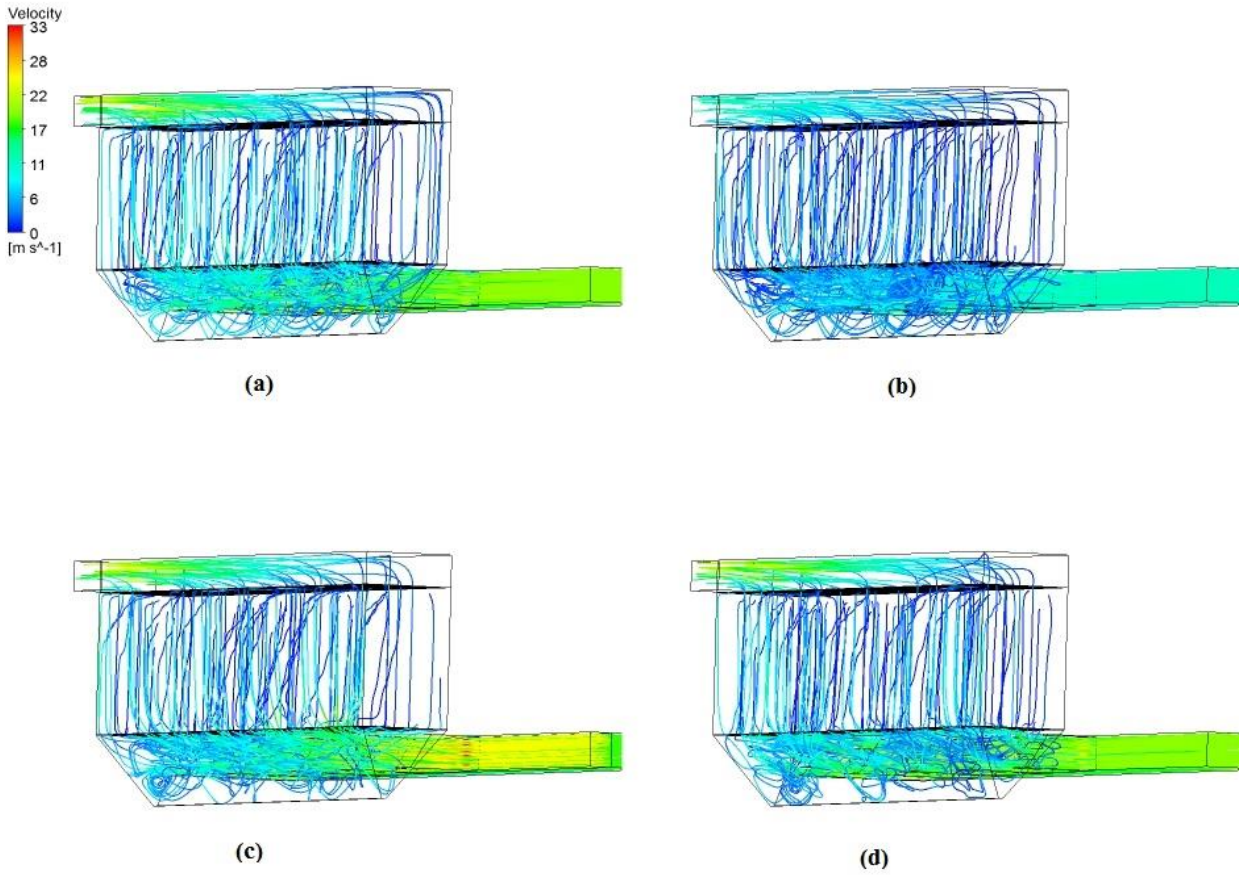

Figura 24 - Linhas de corrente das alternativas analisadas: (a) Caso base, (b) Vazão Reduzida, (c) Duto Dividido e (d) Defletoras.

5.2.2. Avaliação das velocidades

Na Figura 25 é possível verificar o campo de velocidades no plano posicionado na metade da altura do duto. Conforme esperado, o caso com redução da vazão (b) provoca uma redução nas velocidades no duto de entrada e na tremonha, de modo a se verificar a redução do choque do escoamento na parede posterior da tremonha. É importante destacar que a velocidade média do duto de entrada nesta alternativa se encontra abaixo do recomendado (15 m/s), podendo promover a deposição de partículas no duto.

Observa-se que o duto dividido (c) provoca um aumento excessivo da velocidade de entrada na tremonha aumentando o choque com a parede posterior, sendo, portanto, negativo em relação ao caso base deste ponto de vista. Com a instalação das defletoras (d) observa-se uma sutil melhoria na distribuição das velocidades na tremonha e a redução do choque na parede posterior da tremonha quando comparado ao caso base.

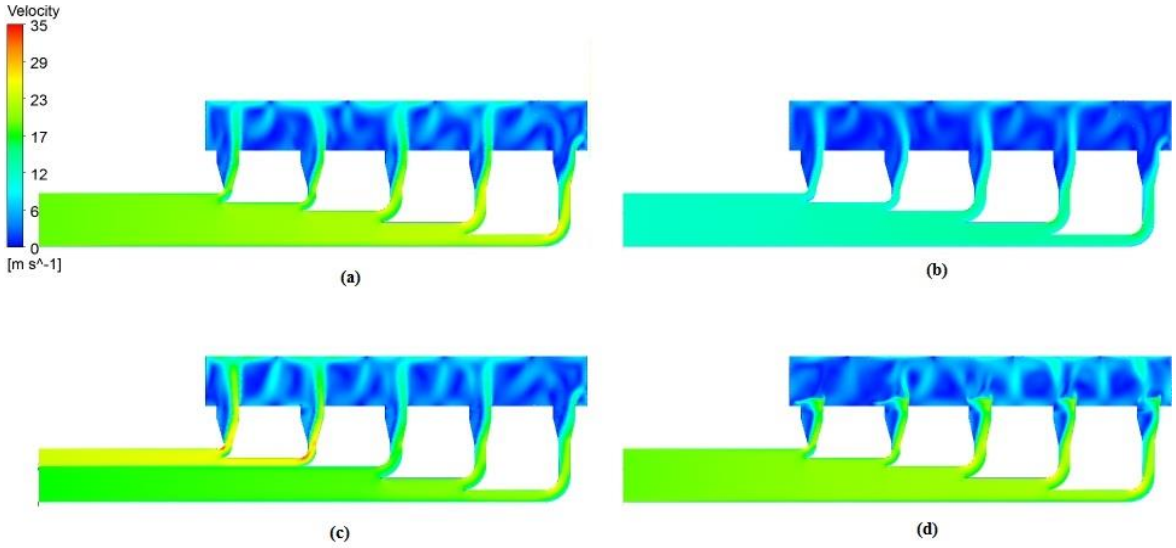

Figura 25 - Distribuição de velocidades no duto de entrada: (a) Caso base, (b) Vazão Reduzida, (c) Duto Dividido e (d) Defletoras.

5.2.3. Razão Ar-Pano

A Figura 26 exibe os valores de razão ar-pano nas mangas filtrantes dos casos analisados. Observa-se que o caso da redução da vazão (b) provocou o maior impacto na redução de picos de velocidades de filtração e melhoria na distribuição da mesma por todas as mangas. As ações de divisão do duto de entrada (c) e instalação de defletoras (d) provocaram pouca alteração na distribuição do fluxo nas mangas.

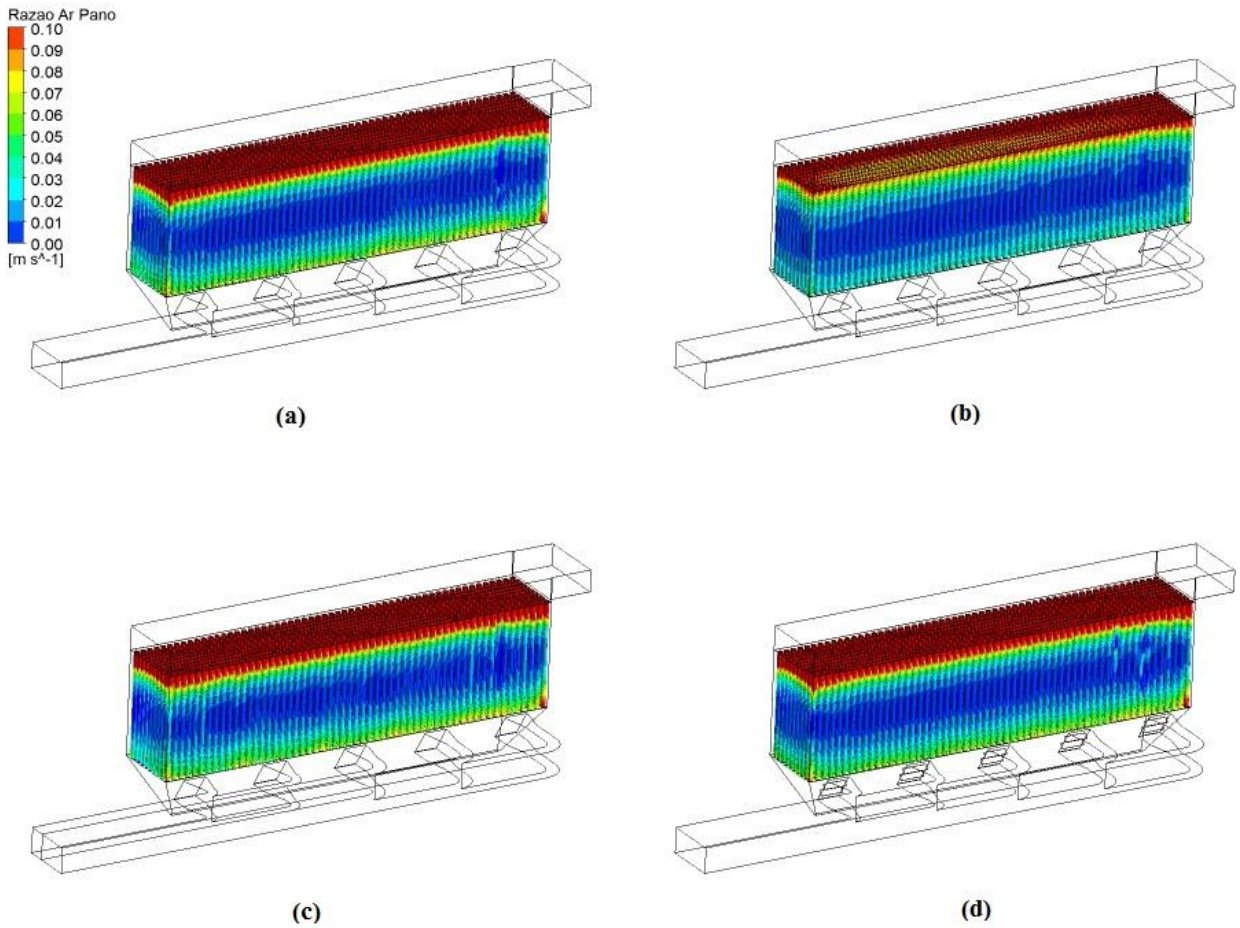

Figura 26 – Velocidades de filtração das alternativas analisadas: (a) Caso base, (b) Vazão Reduzida, (c) Duto Dividido e (d) Defletoras.

A melhoria na uniformidade observada com a redução da vazão (b) indica que as mangas estão sendo submetidas a velocidades mais próximas do valor de velocidade de filtração estabelecido em projeto. Com a vazão reduzida, uma região maior da área filtrante está operando próximo ao seu valor de velocidade de filtração estabelecido (1,03 m/min equivalente a 0,017 m/s).

5.2.4. Distribuição da pressão

Nas Figura 27 é possível observar a distribuição das pressões na superfície do meio filtrante em cada uma das alternativas. Percebe-se que a redução da vazão, além de reduzir os valores da pressão, como esperado, auxilia na melhoria da distribuição das pressões ao longo de todas as mangas. No caso da divisão do duto de entrada (c), nota-se que a mesma favorece a existência de regiões de alta pressão na parte inferior das mangas do lado oposto à entrada. Além disso, a alternativa apresenta promove valores mais altos da pressão nas

mangas próximas às duas primeiras entradas, na região oposta a elas. A alternativa de instalação das defletoras (d) apresentou distribuição muito similar ao caso base, com variação mínima na distribuição na região inferior das mangas próximas à última entrada.

A melhoria na distribuição da pressão auxilia na melhor distribuição do escoamento pelas mangas, formando uma torta de filtração mais homogênea de modo que a perda de carga total do filtro aumente de forma mais lenta.

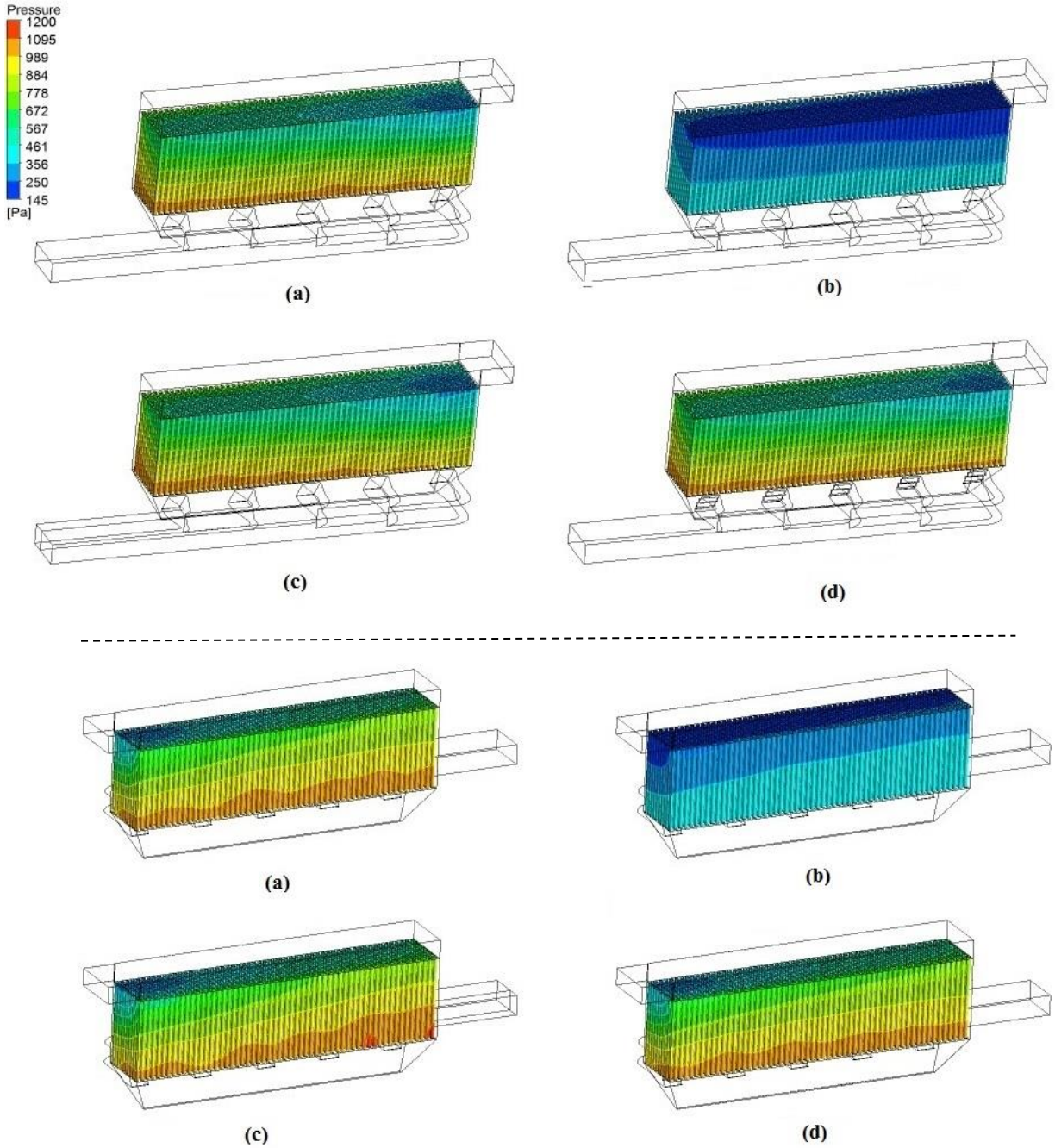

Figura 27 - Distribuição das pressões nas mangas da região frontal (acima) e posterior (abaixo) nas alternativas analisadas: (a) Caso base, (b) Vazão Reduzida, (c) Duto Dividido e (d) Defletoras.

A queda de pressão no filtro é um importante parâmetro de controle, de modo que na Tabela 5 verifica-se o valor deste parâmetro para cada uma das alternativas analisadas no presente estudo. A menor queda de pressão está associada a menor vazão. As alternativas (c) e (d) provocam um aumento na queda de pressão do filtro.

Tabela 5 - Valores de queda de pressão para as alternativas analisadas.

	ΔP (Pa)
(a) Caso Base	1017
(b) Vazão Reduzida	418
(c) Duto dividido	1045
(d) Defletoras	1029

5.2.5. Vazão Mássica

Conforme descrito no tópico 5.1.6, o parâmetro denominado área de filtração efetiva, ou porcentagem da área das mangas em que a vazão mássica é positiva é considerada no presente trabalho como parâmetro de comparação. Os valores encontrados para os casos analisados são mostrados na Tabela 6, na qual se observa que o maior impacto na área de filtração efetiva foi com a redução da vazão (b). As alternativas (c) e (d) resultam em eficiências de filtração muito próximas ao caso base, com variações mínimas.

Tabela 6 - Área de filtração efetiva dos casos analisados.

	Área de Filtração Efetiva	**% da Área de Filtração Efetiva**
(a) Caso Base	932,1	79,9%
(b) Vazão Reduzida	993,5	85,1%
(c) Duto dividido	928,2	79,5%
(d) Defletoras	931,8	79,8%

Para fins de comparação, ao utilizar a mesma metodologia, Marques (2013) encontrou valores entre 74,5% e 84,1% para os casos analisados em seu trabalho. Rocha *et al.* encontraram valores entre 78,5% e 87,4%, enquanto Pereira *et al.* (2016) encontraram valores entre 66,7% e 77,5%.

5.3. Alternativas complementares

Dada as discussões do item anterior, verificou-se que, possivelmente, o pouco efeito das defletoras e do duto dividido na melhoria da distribuição do escoamento, segundo os critérios analisados, tenham sido em função dos altos valores de velocidade nas entradas na tremonha. Verificou-se também que a redução da vazão, que provocou uma redução da velocidade de entrada na tremonha, gerou resultados positivos em termos de distribuição de pressão e aumento da área de filtração efetiva. Assim, no intuito de investigar o efeito da redução da vazão nas outras alternativas (c) e (d), foram propostas alternativas complementares: a instalação de defletoras com a redução da vazão (e) e a divisão do duto de entrada com a redução da vazão (f).

Os resultados da distribuição da razão ar-pano das duas alternativas complementares e do caso com vazão reduzida podem ser visualizados na Figura 28. Nota-se que o caso (e) possui uma distribuição muito próxima do caso com vazão reduzida (b). Já o caso com o duto dividido e a vazão reduzida (f) favorece a existência de regiões de razão ar-pano mais altas na região mais próxima às duas primeiras entradas, que passaram a receber uma vazão maior do que no caso (b).

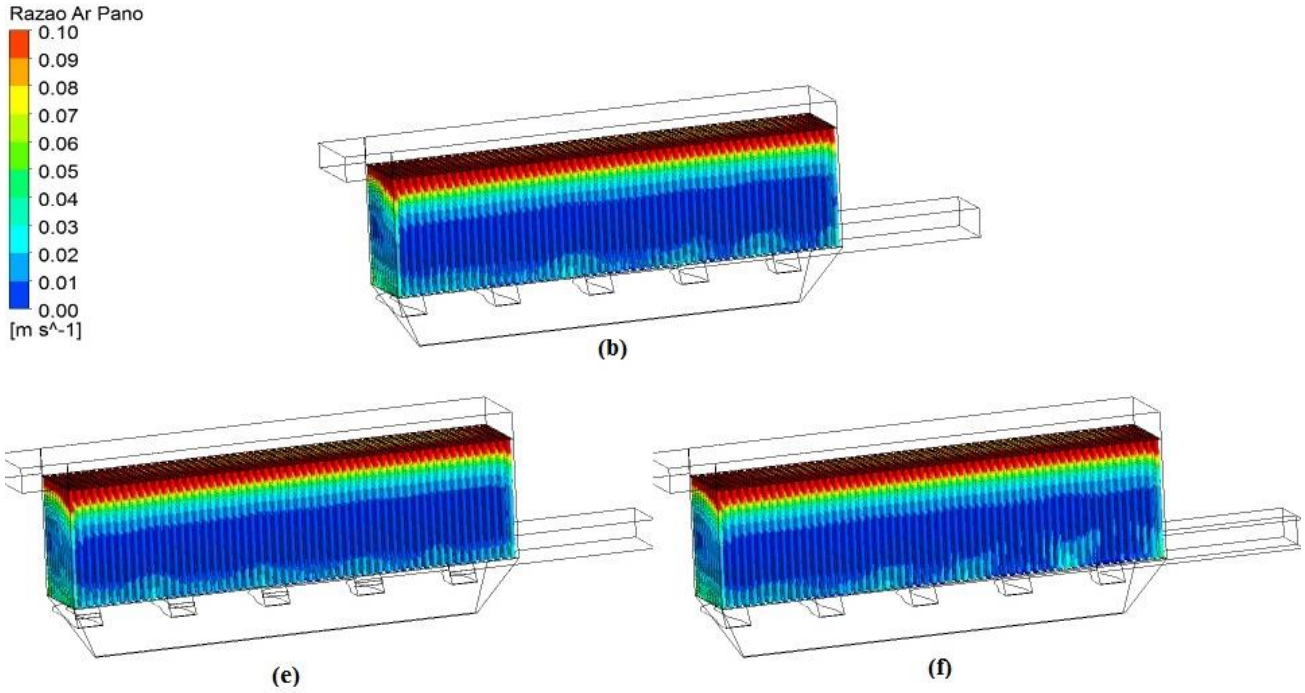

Figura 28 - Distribuição da razão ar-pano nas alternativas complementares: (b) Vazão Reduzida, (e) Defletoras com vazão reduzida e (f) Duto dividido com vazão reduzida.

Na Tabela 7 verifica-se que a queda de pressão do caso (e) foi de 414 Pa e para o caso (f) foi de 413 Pa, uma variação mínima comparada com os 418 Pa encontrados para a vazão reduzida, caso (b). Também na Tabela 7 encontram-se os valores da área de filtração efetiva, mostrando que os resultados são bastante similares para todas as alternativas com vazão reduzida.

Tabela 7 - Área de filtração efetiva e queda de pressão das alternativas complementares.

	Área de Filtração Efetiva (m^2)	**% da Área de Filtração Efetiva**	**ΔP (Pa)**
(b) Vazão Reduzida	993,5	85,1%	418
(e) Defletoras com vazão reduzida	992,5	85,0%	414
(f) Duto dividido com vazão reduzida	997,9	85,5%	413

Na Figura 29 observam-se as linhas de corrente das alternativas (b) Vazão Reduzida, (e) defletoras com vazão reduzida e (f) duto dividido com vazão reduzida, em vista lateral, de modo a destacar a fluidodinâmica na tremonha. Os vórtices na parte inferior da tremonha são significativamente reduzidos nas duas alternativas complementares (e) e (f), além disso, as linhas de corrente que alcançam a região próxima ao fundo estão associadas a velocidades inferiores a 5 m/s, enquanto no caso (b) os valores de velocidade no fundo chegam a 10 m/s. Tais fatores diminuem a possibilidade de resuspensão do material já depositado nesta região, representando um fator positivo para as alternativas complementares analisadas.

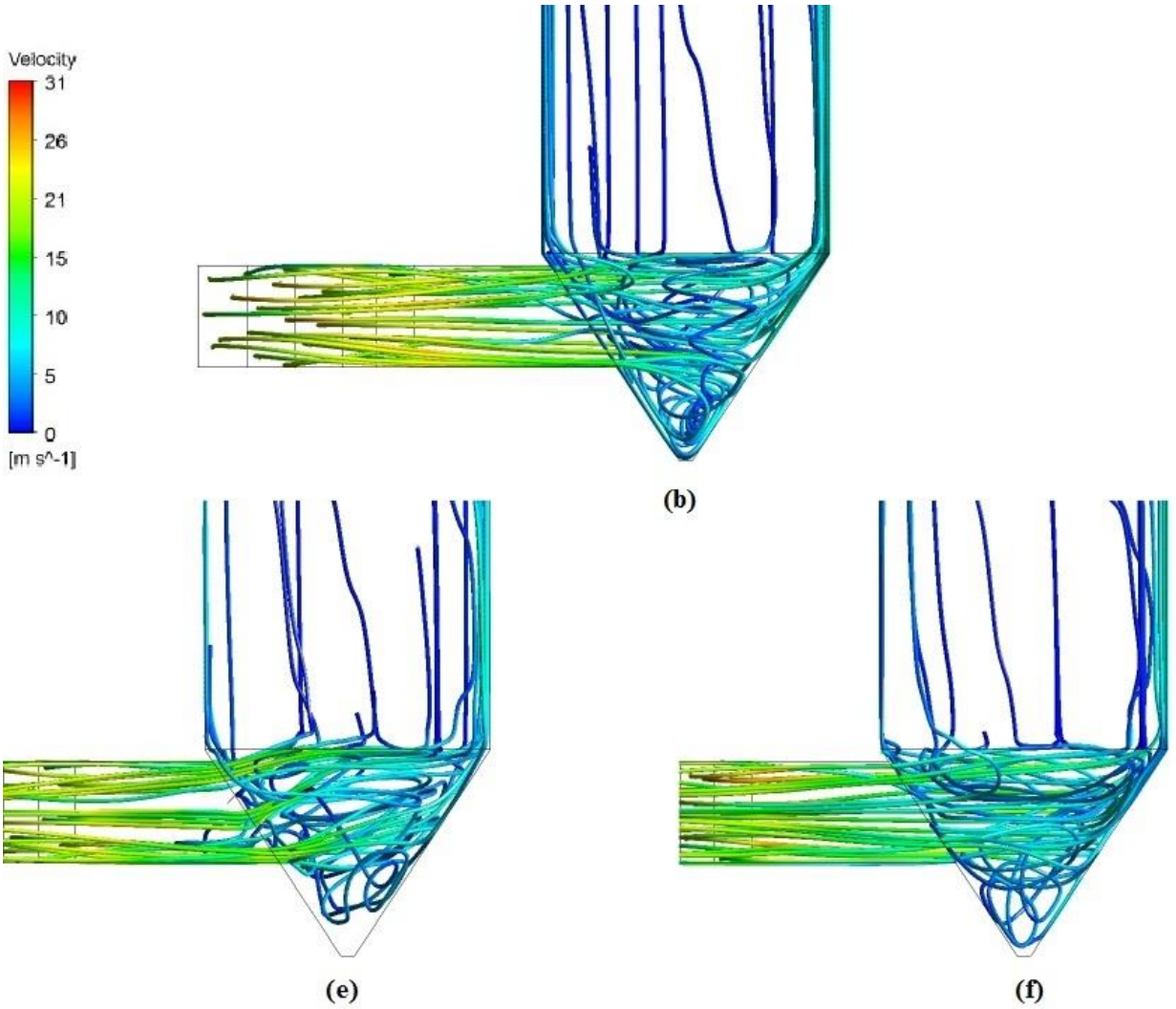

Figura 29 - Fluidodinâmica das alternativas complementares: (b) Vazão Reduzida, (e) Defletoras com vazão reduzida e (f) Duto dividido com vazão reduzida.

Considerando as alternativas complementares analisadas, o caso (e) com as defletoras e a vazão reduzida se mostra o mais vantajoso por conta da redução de vórtices na região inferior da tremonha.

6 CONCLUSÕES

Ao simular o escoamento do caso base do filtro, observou-se a não uniformidade em sua distribuição ao longo das mangas. Durante o projeto de filtros assume-se que a razão ar-pano é uniforme pelas mangas, o que é contestado pelos resultados, uma vez que é notória a diferença entre os valores encontrados no meio filtrante e a razão ar-pano estabelecida no projeto. Verificou-se, também, a presença de vórtices na tremonha e a ocorrência do choque do escoamento de entrada na parede posterior da tremonha, sendo que a velocidade de entrada se mostrou fator determinante para o escoamento ao longo do equipamento.

Observando os fenômenos no caso base foram propostas três alternativas. Propôs-se o caso (b), a redução da vazão para 60% da vazão de projeto, no intuito de verificar a redução das velocidades de entrada bem como a redução da razão ar-pano para um valor mais conservador, já que as velocidades da entrada no caso base se mostraram demasiadamente altas. Propôs-se no caso (c) a divisão do duto de entrada em dois, direcionando 40% da vazão para as duas primeiras entradas na tremonha e 60% da vazão para as três últimas para verificar a resposta do filtro a uma distribuição mais uniforme das vazões em cada cone de entrada, uma vez que as velocidades médias em cada entrada no caso base se mostraram bastante diferentes. Finalmente, propôs-se o caso (d) a instalação de duas chapas defletoras por entrada, no intuito de melhorar o direcionamento do fluxo para a região central do filtro e reduzir os vórtices na tremonha, fatores deficientes do caso base. Das alternativas analisadas, a redução da vazão (b) foi a mais efetiva em termos de aumento da área de filtração efetiva, promovendo uma melhoria de 79,86% do caso base para 85,12%. Em relação à queda de pressão, as alternativas de divisão do duto de entrada e instalação das defletoras aumentaram ligeiramente esse valor de 104 Pa no caso base para 107 Pa e 105 Pa, respectivamente. A queda de pressão do caso com a vazão reduzida diminuiu, mas não é passível de comparação justamente por se tratar de uma vazão diferente.

Tendo em vista as conclusões tiradas destas três alternativas, foram propostas duas alternativas complementares para de verificar as melhorias decorrentes da redução da vazão nas propostas de instalação de defletoras (e) e divisão do duto de entrada (f). A partir delas, verificou-se que há pouca alteração em termos de área de filtração efetiva e perda de carga quando comparadas ao caso com a vazão reduzida. No entanto, observa-se que na

alternativa (e), com as defletoras e a vazão reduzida, os vórtices na região inferior da tremonha são significativamente reduzidos, diminuindo a possibilidade de resuspensão do material já depositado nesta região. Assim, essa alternativa se mostrou com maiores impactos positivos em relação ao caso base.

Uma importante conclusão da pesquisa foi mostrar que muitas das hipóteses consideradas no projeto de filtro de mangas, tais quais a uniformidade da razão ar-pano e da distribuição do fluido no equipamento, são contestadas pelos resultados encontrados. A CFD permitiu a visualização do comportamento do fluido no filtro, o que não é uma prática comum na indústria para projetos de novos equipamentos e de *retrofit* de equipamentos existentes. Assim, o trabalho reforça o potencial da aplicação da CFD para o desenvolvimento de projetos de filtros de mangas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Validar a simulação qualitativamente, realizando levantamentos em campo das condições de pressão e velocidades no filtro;
- Realizar as simulações de diferentes tipos de entrada e posicionamento de chapas defletoras;
- Avaliar a influência da manga no escoamento, simulando mangas de diferentes tamanhos, tecidos e modelos;
- Realizar a simulação considerando também as partículas presentes no fluido, levando em conta sua distribuição granulométrica e a dinâmica da formação da torta de filtração.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists. **Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design.** 27th edition, 2010.

ANSYS. **ANSYS CFX Tutorials.** ANSYS, Inc, 2012. 610 p.

ANSYS. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide.** Canonsburg: ANSYS, Inc, 2013a. 372 p.

ANSYS. **ANSYS CFX-Solver Modeling Guide.** Canonsburg: ANSYS, Inc, 2013b. 658 p.

BONELLI, R. **Solicitação de informação sobre Star-Bag** *[mensagem pessoal]*, 2015. Mensagem recebida por <ana.bernabe@arcelormittal.com.br> em 20 de outubro de 2015.

BONELLI, R. **Solicitação de Informações** *[mensagem pessoal]*, 2014. Mensagem recebida por <anaclarabernabe@gmail.com> em 27 de novembro 2014.

BRASIL. Resolução nº 3, de 28 de junho de 1990. **Resolução**. Brasília: Dou, 22 ago. 1990. Seção 1, p. 15937-15939.

BRASIL. Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006. **Resolução**. Brasília: Dou, 2 jan. 2007. Seção 1, p. 131-137.

BRASIL. Resolução nº 436, de 22 de dezembro de 2011. **Resolução**. Brasília: Dou, 26 dez. 2011. Seção 1, p. 304-311.

CHEREMISINOFF, Nicholas P.. **Handbook of Air Pollution Prevention and Control.** Elsevier Inc., 2002. 562 p. ISBN: 978-0-7506-7499-7.

COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. **Air Pollution Control: A design Approach**.4 ed. Waveland Press: 2011.

DAMIAN, Ricardo Barbosa *et al.* Desenvolvimento de um sistema de filtragem compacto para usinas de asfalto. In: Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering -- ENCIT 2004, 10., 2004, Rio de Janeiro. **Proceedings... .** Rio de Janeiro: Braz. Soc. Of Mechanical Sciences And Engineering -- Abcm, 2004a.

DAMIAN, Ricardo Barbosa *et al.* Improving the performance of asphalt plant components using CFD. In: Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering -- ENCIT 2004, 10., 2004, Rio de Janeiro. **Proceedings... .** Rio de Janeiro: Braz. Soc. Of Mechanical Sciences And Engineering -- Abcm, 2004b.

DEWAN, Anupam. **Tackling turbulent flows in Engineering.** Berlin: Springer, 2011.

FELDKAMP, M.; DICKAMP, M.; MOSER, C.. CFD simulation of Electrostatic Precipitators and Fabric Filters: State of the Art and Applications. In: ICESP, 21., 2009, Hangzhou. **Proceedings... .** Hangzhou: Icesp, 2008. p. 141 - 150.

FERZIGER, J. H.; PÉRIC, M.. **Computational Methods for Fluid Dynamics.** 3. ed. Berlin: Springer, 2002. 431 p.

FOX, Robert W.; McDONALD, Alan T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: LTC, 1998. 5. ed. 504 p.

iESSS. **Introdução à dinâmica dos fluidos computacional:** Dos fundamentos às aplicações industriais. s.l.: iESSS – Instituto ESSS de Pesquisa e Desenvolvimento, 2010. 52 p. Apostila.

LEMOS, Maria Carmen de Mello. The politics of pollution control in Brazil: State actors and social movements cleaning up Cubatão. **World Development,** Arizona, v. 26, n. 1, p.75-87, 1998.

LORA, Electo Eduardo Silva. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

MALISKA, Clovis R.. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 453 p.

MARQUES, Felipe Bezerra. **Aplicação das Técnicas de CFD no Projeto de Filtro de Mangas**. 2013. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2013.

MENDES, Rafael. **Análise do Acoplamento Pressão-Velocidade nas Equações de Navier-Stokes utilizando o Método dos Volumes Finitos Baseado em Elementos e**

Solução Acoplada. 2007. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

NIELSEN, Niels Finderup; SKRIVER, Kasper G.; CASTAÑO, Luis J.. Fabric Filter Optimization using Computational Fluid Dynamics. In: ICESP, 2011, Nuernberg.**Proceedings... .** Nuernberg: Icesp, 2011.

NIELSEN, Peter V.. Fifty years of CFD for room air distribution. **Building And Environment,** [s.l.], v. 91, p.78-90, set. 2015. Elsevier BV.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide:** Global update 2005. OMS, 2006. (Summary of risk assessment).

PEREIRA, Thomas Wilis Cândido et al. The influence of the fabric filter layout of in a flow mass filtrate. **Journal Of Cleaner Production,** [s.l.], v. 111, p.117-124, jan. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.070.

PIRES, Fernanda. **"Vale da Morte" foi o símbolo de Cubatão.** 2012. Disponível em: <http://www.valor.com.br/brasil/2570976/vale-da-morte-foi-o-simbolo-de-cubatao>. Acesso em: 12 jan. 2016.

ROCHA, Sandra Mara S. *et al.* Applications of CFD Techniques in the Design of Fabric Filters. **Chemical Engineering Transactions,** v. 39, p.1369-1374, ago. 2014.

ROCHA, Sandra Mara Santana. **Estudo da influência da velocidade e dos ciclos de filtração na formação da torta na limpeza de gases em filtros de mangas.** 2010. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

RODRIGUES, Karina Bassan. **Filtração de Gases: Estudo da deposição de diferentes tortas de filtração em diferentes meios filtrantes.** 2006. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Ufscar, São Carlos, 2006.

ROSA, Paula de Freitas. **Avaliação dos efeitos de suspensões de nanopartículas de prata (AgNP) na erradicação de bactérias e fungos encontrados em material**

particulado. 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Centro de Ciências e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

SOLAFT. **SOLAFT® StarBag®.** Disponível em: <http://www.solaft.com/uploads/65743/ufiles/Brochures/SOLAFT_StarBag_Flyer_Iss_3_Jul14.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2015.

SOLAFT. **Solaft Filtration Solutions.** Disponível em: <http://www.solaft.com.br/>. Acesso em: 01 maio 2016.

THEODORE, Louis. **Air pollution equipment control calculations.** Wiley, 2008. 574 p.

TOGNETTI, Érica Rodrigues. **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.

US-EPA- Environmental Protection Agency. **Lesson 1 - Electrostatic Precipitator Operation**. 1998.

US-EPA. **Particulate Matter (PM).** 2013. Disponível em: <http://www.epa.gov/airquality/particlepollution/index.html>. Acesso em: 22 jun. 2015.

VALLERO, Daniel. **Fundamentals of Air Pollution Control.** 4. ed. S.l: Elsevier, 2008. 967 p.

VERARDI, Marcelo. **Análise do escoamento e da geração de ruído no sistema de ventilação externo de um motor de indução trifásico.** 2008. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

VERTEEG, H K; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics:** The Finite Volume Method. 2. ed. Essex: Pearson Prentice Hall, 2007. 503 p.

VIANA, F. L. E.; ROCHA, R. E. V. **Benchmarking Interno: aplicação na manufatura de uma organização do setor de transformação de plásticos.** Santa Maria, p.34-45, 2009. Disponível em: <http://www.ingepro.com.br/index.php/ingepro/articcle/viewFile/114/100>Acesso em: 20 ago. 2015.

VIEIRA, Luiz G. M. *et al.* A study of the fluid dynamic behaviour of filtering hydrocyclones. **Separation And Purification Technology,** S.l., n. 58, p.282-287, 2007.

WANG, Lawrence K.; PEREIRA, Norman C.; HUNG, Yung-tse (Ed.). **Air Pollution Control Engineering.** New Jersey: Human Press, 2004. 504 p. (Handbook of Environmental Engineering, v. 1).

APÊNDICE A

Uma malha básica inicial foi feita com os devidos refinamentos em regiões de maiores gradientes e com a camada de prismas para captar os efeitos da camada limite (*inflation*). A partir dela, variou-se o número total de nós na malha.

O parâmetro utilizado nesse teste foi o perfil de velocidades em uma linha traçada na região da saída do filtro, mostrada na Figura 30.

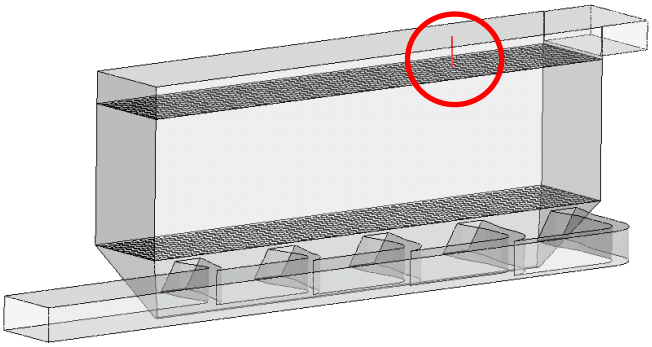

Figura 30 - Localização da linha traçada para a realização do teste de malhas.

Além disso, observou-se o parâmetro y^+, a distância adimensional da parede (VERARDI, 2007). O modelo $k - \varepsilon$ em geral evita a integração das equações junto à parede, modelando o comportamento típico do escoamento nas proximidades da parede. Verteeg e Malalasekera (2007) indicam que para valores $30 < y^+ < 500$, a modelagem nas proximidades da parede é satisfatória. Se o valor não se encaixar nesse intervalo, um maior refinamento na parede é necessário. Tal parâmetro indica, portanto, se o número de nós existentes na camada limite é suficiente para representar os efeitos da mesma. Avaliando os critérios supracitados, escolheu-se a malha. A avaliação da velocidade u na linha vertical na saída do filtro indicou pouca variação nas diferentes malhas, conforme verificado na Figura 31.

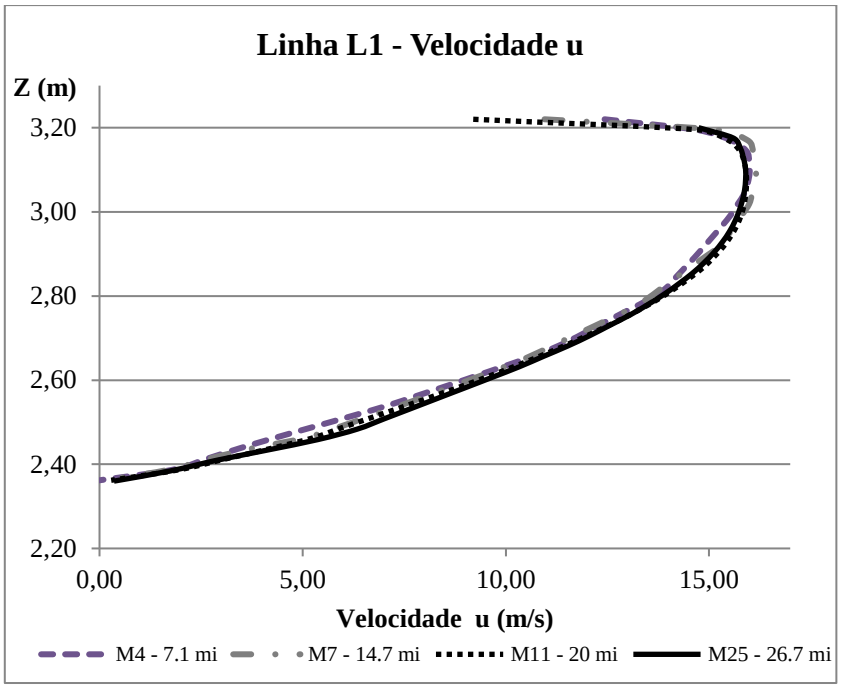

Figura 31 - Comparação entre velocidades encontradas na linha L1 com diferentes malhas.

Os valores de *imbalance* e RMS foram considerados satisfatórios na maioria das malhas analisadas. O fator determinante para a escolha da malha foi o valor de $y+$. O intervalo indicado foi extrapolado em muitas regiões na maioria dos casos, exceto pela malha de 26,7 milhões de nós que, por ser mais refinada nas paredes, apresentou os melhores resultados em relação a esse parâmetro. Assim, a malha de 26,7 milhões de nós foi a escolhida.