



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**Diagnóstico de sistemas de ventilação industrial em
indústria alimentícia e dimensionamento de soluções
de despoeiramento**

CAIO ALMEIDA GIUGNI

Vitória
2022

CAIO ALMEIDA GIUGNI

**Diagnóstico de sistemas de ventilação industrial em
indústria alimentícia e dimensionamento de soluções
de despoeiramento**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação 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. Bruno Furieri

**Vitória
2022**

RESUMO

Os sistemas de ventilação industrial visam garantir a pureza e a qualidade do ar em ambientes de trabalho. A manutenção da qualidade do ar aumenta a capacidade de trabalho, reduzindo a ocorrência de doenças ocupacionais, aumentando a produtividade e a qualidade de vida dos trabalhadores. A escolha de um sistema de ventilação requer a análise do local a ser ventilado, das atividades executadas e das características dos poluentes gerados. A proposta deste trabalho é o diagnóstico dos sistemas de ventilação industrial em uma unidade industrial produtora de café. Ao longo do trabalho foram apontados três pontos de interesse para o controle da poluição atmosférica envolvendo a movimentação de material bruto e armazenamento do produto final. Para o armazenamento do produto final, foram feitas análises no âmbito qualitativo sobre sistemas de ventilação geral, tendo em vista as necessidades de preservação do produto. Para dois pontos de movimentação de material bruto, foram elaborados sistemas de despoeiramento compostos por captores, dutos, equipamentos de controle e ventiladores para seis cenários, considerando-se uma vazão de 16,13 m³/s para um ponto e 0,84 m³/s para o outro ponto. Comparando os resultados obtidos por cada sistema proposto com a legislação vigente e analisando a viabilidade econômica de cada cenário, concluiu-se que o emprego de sistemas equipados com ciclones, que atingiram eficiências de remoção de material particulado superiores a 99% para ambas as atividades de movimentação, atende melhor as demandas da unidade industrial.

Palavras-chave: Qualidade do ar, poluição atmosférica, material particulado, filtro de mangas, ciclone.

ABSTRACT

Industrial ventilation systems aim to ensure air purity and quality in work environments. Maintaining air quality increases work capacity, reducing the occurrence of occupational diseases, increasing workers productivity and quality of life. Choosing a ventilation system requires an analysis of the workplace to be ventilated, the activities performed and the characteristics of the pollutants generated. The purpose of this work is the diagnosis of industrial ventilation systems in an industrial unit producing coffee. Throughout the work, three points of interest were identified for the control of atmospheric pollution involving the movement of raw material and storage of the final product. For the storage of the final product, qualitative analyzes were carried out on general ventilation systems, due to preservation necessities of the product. At the two raw material movement points, dedusting systems consisting of captors, ducts, controlling equipment and fans were designed for six scenarios, considering an airflow of 16,13 m³/s at one point and 0,84 m³/s at the other point. Comparing the results obtained by each proposed system with the current legislation and analyzing the economic viability of each scenario, it was concluded that the use of systems equipped with cyclones, which reached particulate matter removal efficiencies of above 99% for both activities, better meets the demands of the industrial unit.

Keywords: Air quality, atmospheric pollution, particulate matter, bag filters, cyclone.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Distribuição de massa por diâmetro de partículas.....	10
Tabela 3.2 – Diretrizes de qualidade do ar estabelecidas pela OMS.....	13
Tabela 3.3 – Poluentes internos e seus efeitos na saúde humana.	14
Tabela 3.4 – Padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução CONAMA 491/2018.....	16
Tabela 3.5 – Padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo Decreto N° 3463-R de 2013.	17
Tabela 3.6 – Poluentes internos e possíveis medidas de correção.....	18
Tabela 3.7 – Valores de TLV em ppm para alguns poluentes.....	19
Tabela 3.8 – Limites de emissão para poluentes atmosféricos.....	20
Tabela 3.9 – Classificação da qualidade dos fatores de emissão.....	22
Tabela 3.10 – Fatores de emissão para material particulado.....	23
Tabela 3.11 – Fatores de emissão para gases.....	23
Tabela 3.12 – Composição do Método DARS para análise das estimativas das fontes emissoras.	24
Tabela 3.13 – Diretrizes para a estimativa de emissões segundo a EEA.....	25
Tabela 3.14 – Velocidade de captura conforme condições de dispersão do contaminante.....	33
Tabela 3.15 – Velocidade de transporte de partículas para diferentes densidades.....	35
Tabela 3.16 – Dimensões clássicas de um ciclone.	40
Tabela 3.17 – Recomendações para projeto de lavadores do tipo torre de spray.	53
Tabela 5.1 – Métodos de referência utilizados para cada poluente.	79
Tabela 5.2 – Inventário de emissões atmosféricas referente ao ano de 2020.	81
Tabela 5.3 – Limites de emissão para poluentes atmosféricos.....	82
Tabela 5.4 – Concentrações equivalentes e limites de emissão para poluentes atmosféricos.....	82
Tabela 5.5 – Parâmetros adotados para o dimensionamento.....	83

Tabela 5.6 – Principais características do lavador de gás dimensionado para a Caldeira Bremmer.	84
Tabela 5.7 – Principais características do lavador de gás dimensionado para o Secador de Borra.	85
Tabela 5.8 – Distribuição de massa por diâmetro de partículas.	87
Tabela 5.9 – Dados de produção referentes ao ano de 2020.	88
Tabela 5.10 – Características básicas do ciclone e ventilador projetados.	91
Tabela 5.11 – Características básicas do filtro de mangas e ventilador projetados.	92
Tabela 5.12 – Características básicas do ciclone, filtro de mangas e ventilador projetados.	93
Tabela 5.13 – Características básicas do ciclone e ventilador projetados.	95
Tabela 5.14 – Características básicas do filtro de mangas e ventilador projetados.	96
Tabela 5.15 – Características básicas do ciclone, filtro de mangas e ventilador projetados.	97
Tabela 5.16 – Custos de aquisição das tubulações e captores de cada cenário.	104
Tabela 5.17 – Custos de aquisição e implementação de cada cenário.	104
Tabela 5.18 – Custos de operação de cada cenário.	105
Tabela 5.19 – Custos de manutenção de cada cenário.	106
Tabela 5.20 – Custos de implementação e de operação anual para o Cenário 1.	107
Tabela 5.21 – Custos de implementação e de operação anual para o Cenário 2.	108
Tabela 5.22 – Concentração de material particulado na saída do sistema para cada cenário.	108
Tabela 5.23 – Valores do custo anual uniforme para o cenário 1, considerando taxa de juros de 9%.	109
Tabela 5.24 – Valores do custo anual uniforme para o cenário 2, considerando taxa de juros de 9%.	109
Tabela 8.1 – Características do ciclone e ventilador projetados.	131
Tabela 8.2 – Características do filtro de mangas e ventilador projetados.	133
Tabela 8.3 – Características dos equipamentos e ventilador projetados.	135

Tabela 8.4 – Características do ciclone e ventilador projetados.	150
Tabela 8.5 – Características do filtro de mangas e ventilador projetados.	152
Tabela 8.6 – Características dos equipamentos e ventilador projetados.	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Relação custo/confiabilidade de diferentes métodos de estimativa de emissões.	21
Figura 3.2 – Classificação geral dos sistemas de ventilação industrial	27
Figura 3.3 – Exemplo de sistemas de ventilação natural.	28
Figura 3.4 – Exemplo de sistema de ventilação diluidora	29
Figura 3.5 – Configuração básica de um sistema de ventilação local exaustora (SVLE).....	30
Figura 3.6 – Exemplo de fonte enclausurada (A) e não enclausurada (B)	32
Figura 3.7 – Exemplo de peças especiais e respectivos fatores de perda de carga (K).....	37
Figura 3.8 – Funcionamento de um Ciclone.....	39
Figura 3.9 – Relação eficiência de coleta por tamanho de partícula.	40
Figura 3.10 – Dimensões clássicas de um ciclone.....	41
Figura 3.11 – Distribuição do tamanho das partículas.	44
Figura 3.12 – Configuração básica de um filtro de mangas.	47
Figura 3.13 – Configuração básica de um lavador de gases do tipo torre de spray.	52
Figura 3.14 – Carcaça (A), rotor (B) e bocal (C) de um ventilador centrífugo ..	57
Figura 3.15 – Exemplo de ponto de operação ideal para um determinado ventilador e sistema.	58
Figura 3.16 – Exemplo de análise de viabilidade econômica com base no método CAUE.	61
Figura 4.1 – Fluxograma típico do processamento de café.....	63
Figura 4.2 – Localização da unidade industrial da Realcafé.	65
Figura 4.3 – Fluxograma simplificado do processo produtivo da unidade industrial.....	66
Figura 4.4 – Local de descarga da colheita do café e o ciclone utilizado.....	67
Figura 4.5 – Armazenamento e Triagem de Grãos.	67
Figura 4.6 – Produto final após a seleção dos grãos.	68
Figura 4.7 – Captores enclausurante e externo na seleção de grãos.	68
Figura 4.8 – Filtro de mangas do tipo jatos pulsantes.	69

Figura 4.9 – Limpeza realizada nos galpões de armazenamento.	69
Figura 5.1 – Esquema de configuração do sistema enclausurante.	89
Figura 5.2 – Visão frontal do sistema enclausurante.	89
Figura 5.3 – Esquema de configuração do sistema enclausurante.	94
Figura 5.4 – Visão frontal do sistema enclausurante.	94
Figura 5.5 – Esquema de configuração do sistema de ventilação geral natural.	99
Figura 5.6 – Esquema de configuração do sistema de ventilação geral natural através de chaminés.	100
Figura 5.7 – Esquema de configuração do sistema de ventilação geral diluidora obtida mecanicamente.	102
Figura 5.8 – Esquema de configuração do sistema de ventilação geral diluidora obtida mecanicamente e ligada a saída de ar.	103
Figura 8.1 – Esquema de configuração do sistema enclausurante.	119
Figura 8.2 – Traçado do sistema de dutos para o Cenário 1.A.	123
Figura 8.3 – Traçado do sistema de dutos para o Cenário 1.B.	126
Figura 8.4 – Traçado do sistema de dutos para o Cenário 1.C.	130
Figura 8.5 – Configuração do equipamento de controle e do sistema de dutos.	132
Figura 8.6 – Configuração do equipamento de controle e do sistema de dutos.	134
Figura 8.7 – Configuração do equipamento de controle e do sistema de dutos.	136
Figura 8.8 – Esquema de configuração do sistema enclausurante.	138
Figura 8.9 – Traçado do sistema de dutos para o Cenário 2.A.	142
Figura 8.10 – Traçado do sistema de dutos para o Cenário 2.B.	145
Figura 8.11 – Traçado do sistema de dutos para o Cenário 2.C.	149
Figura 8.12 – Configuração do equipamento de controle e do sistema de dutos.	151
Figura 8.13 – Configuração do equipamento de controle e do sistema de dutos.	153
Figura 8.14 – Configuração do equipamento de controle e do sistema de dutos.	155

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS.....	8
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
3.1. POLUENTES ATMOSFÉRICOS	9
3.1.1. Efeitos à Saúde.....	11
3.1.2. Legislação Atual.....	15
3.2. INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS	20
3.3. DIAGNÓSTICO E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA	26
3.3.1. Formas de ventilação em edificações.....	26
3.3.2. Captores	30
3.3.3. Dutos	34
3.3.4. Equipamentos de Controle	38
3.3.5. Ventiladores.....	56
3.4. ESTIMATIVA DE CUSTOS E PLANEJAMENTO DE IMPLEMENTAÇÃO DAS MELHORIAS IDENTIFICADAS.....	59
4. MATERIAIS E MÉTODOS	62
4.1. ESTUDO DE CASO.....	62
4.1.1. Processo produtivo da indústria de torrefação de café	62
4.1.2. Caracterização da unidade industrial escolhida.....	64
4.1.3. Pontos de interesse para o controle de poluição atmosférica.....	68
4.2. METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE EMISSÕES	69
4.2.1. Dimensionamento de lavadores de gases	70
4.3. METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO E DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO E EQUIPAMENTOS DE CONTROLE.....	73
4.3.1. Dimensionamento dos captores e tubulações	73
4.3.2. Dimensionamento dos ciclones	74
4.3.3. Dimensionamento dos filtros de mangas	76

4.4. METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA E PREVISÃO DE CUSTOS	77
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79
5.1. ANÁLISE DO INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS	79
5.1.1. Dimensionamento de lavadores de gases do tipo torre de spray	83
5.2. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE DE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	86
5.2.1. Dimensionamento de sistema captor enclausurante para o recebimento de material bruto	88
5.2.2. Dimensionamento de sistema captor enclausurante para a triagem de grãos.....	93
5.2.3. Análise qualitativa de sistema de ventilação geral para os galpões de armazenamento.....	98
5.3. COMPOSIÇÃO DOS SISTEMAS E CUSTOS ASSOCIADOS.....	104
5.4. ANÁLISE ECONÔMICA DOS CENÁRIOS DE DIMENSIONAMENTO .	107
6. CONCLUSÃO	111
7. REFERÊNCIAS.....	114
8. APÊNDICES	118
9. ANEXO A.....	156

1. INTRODUÇÃO

O modelo de desenvolvimento nos tempos modernos é sustentado pelo alto dinamismo de processos industriais, de geração de energia e do tráfego de veículos automotores, uma consequência dessas atividades é a emissão de poluentes atmosféricos responsáveis pela degradação da qualidade do ar. Essa preocupação foi associada a danos aos seres humanos, principalmente em termos de doenças respiratórias e até mesmo mortes associadas a combinações de clima e emissões de poluentes (VALLERO, 2008).

Pode se definir poluente atmosférico como “qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade” (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, 2018).

O material particulado é um poluente atmosférico presente em grande parte das atividades industriais e classificado com base em seu diâmetro. Foi confirmado que o material particulado tem implicações negativas para a saúde humana. (ABULUDE, 2016).

A Organização Mundial da Saúde (2014) atribuiu mais de 7 milhões de mortes ao impacto causado pelo material particulado em ambientes internos e externos. Na Índia, a poluição do ar por material particulado causa entre 10.000 a 30.000 mortes todos os anos (ABULUDE, 2016).

A preservação da qualidade do ar depende do conhecimento acerca das fontes contribuidoras e na determinação de limites de emissões (IEMA, 2019). Dessa forma, a gestão da qualidade do ar visa executar ações de prevenção, combate e redução das emissões de poluentes atmosféricos com o objetivo de beneficiar o desenvolvimento sustentável e o controle da qualidade do ar.

Uma das formas de se obter conhecimento acerca das fontes poluidoras é a elaboração de inventários de emissões atmosféricas como o inventário da Região Metropolitana da Grande Vitória realizado pelo IEMA em 2015.

A utilização do inventário de emissões atmosféricas em conjunto com o monitoramento da qualidade do ar e a implementação do plano de controle de emissões atmosféricas proporciona uma gestão mais eficiente dos recursos atmosféricos (IEMA, 2019).

Por vezes, é necessário intervir pela preservação ou regulação da qualidade do ar em ambientes industriais. A ventilação industrial é entendida como a operação realizada por meios mecânicos que visem controlar a temperatura, a distribuição de ar, a umidade e eliminar agentes poluidores do ambiente (MACINTYRE, 1990).

Muitas vezes, os sistemas de exaustão e ventilação são instalados para reduzir a exposição dos trabalhadores a um contaminante perigoso através do controle das emissões de material tóxico. A complexidade e o custo do sistema de ventilação dependerão do tamanho do sistema e da quantidade de controle de contaminantes necessária (ACGIH, 2019).

É importante ressaltar que o projeto e a operação dos sistemas de ventilação têm uma influência significativa na Qualidade do Ar Interior (QAI). Devido à substituição do ar interior viciado pelo ar exterior fresco, a ventilação cria um QAI adequado e um ambiente interior saudável (VAN TRAN; PARK; LEE, 2020).

A indústria de produção de café é um exemplo de atividade industrial responsável por emissões de poluentes atmosféricos e principal objeto de estudo do presente trabalho.

O Brasil assume uma posição de destaque na produção mundial de café, sendo historicamente referenciado como um grande produtor. A produção nacional de café na safra de 2011 foi de aproximadamente 2.668.780 toneladas de café processado (W.ACCHAR; DULTRA, 2015).

Incentivado pela boa manutenção da qualidade do ar e, conseqüentemente, melhoria na qualidade de vida, este Projeto de Graduação terá como objetivo geral o estudo de uma instalação industrial com enfoque nas vertentes ambiental, no que tange os pontos de emissão de poluentes atmosféricos e proposição de medidas de controle, e ocupacional, estudando os efeitos da emissão desses poluentes na saúde do trabalhador.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é o diagnóstico dos sistemas de ventilação de uma instalação industrial, dimensionamento de soluções de despoeiramento e proposição de medidas de controle.

Assim sendo, os objetivos específicos do Projeto de Graduação serão:

- Atualizar e ampliar o inventário de emissões atmosféricas dos processos poluidores de uma indústria alimentícia de produção de café;
- Diagnosticar os processos em que há possibilidade de melhoria no controle das emissões atmosféricas;
- Elaborar projetos básicos de sistema de ventilação industrial e controle de emissões atmosféricas da captura ao lançamento à atmosfera;
- Analisar economicamente os cenários de sistemas de controle propostos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Essa seção tem como objetivo apresentar a fundamentação teórica na qual este trabalho será embasado. Serão abordados aspectos relacionados aos poluentes atmosféricos emitidos durante o processo produtivo do café além da metodologia envolvida no inventário de emissões atmosféricas.

Também serão abordados elementos teóricos relacionados a sistemas de ventilação e seus constituintes, bem como o dimensionamento do sistema de despoejamento e a estimativa de seus custos.

3.1. POLUENTES ATMOSFÉRICOS

A condição de “poluição do ar” pode ser definida como uma situação em que substâncias que resultam de atividades antrópicas estão presentes em concentrações suficientemente altas para produzir um efeito mensurável e negativo em humanos, animais, vegetações ou materiais (SEINFELD; PANDIS, 2006).

Vários estudos epidemiológicos e toxicológicos demonstraram que a exposição a poluentes atmosféricos tem efeitos nocivos à saúde humana. A exposição ambiental a material particulado (MP) tem sido amplamente estudada devido às suas características físicas e composição multi-elementar que varia dependendo da fonte de emissão (OLIVEIRA; IGNOTTI; HACON, 2011).

Por "material particulado" nos referimos a qualquer substância, exceto água pura, que existe como um líquido ou sólido na atmosfera em condições normais e é de tamanho microscópico ou submicroscópico, mas maior do que as dimensões moleculares (SEINFELD; PANDIS, 2006).

O material particulado no ar resulta não apenas das emissões diretas de partículas, mas também das emissões de certos gases que se condensam como partículas diretamente ou sofrem transformação química em uma espécie que se condensa como uma partícula. Uma descrição completa das partículas

atmosféricas requer especificação não apenas de sua concentração, mas também de seu tamanho, composição química, fase (isto é, líquido ou sólido) e morfologia (SEINFELD; PANDIS, 2006).

Ao longo da última década, a pesquisa sobre o controle da qualidade do ar começou a mudar de ambientes externos para ambientes internos, conforme observado nas mudanças no estilo de vida ligadas ao aumento dos níveis de urbanização (VAN TRAN; PARK; LEE, 2020). Alguns poluentes nocivos dentro de edifícios incluem monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (VOCs), material particulado (MP), aerossol, poluentes biológicos e outros.

Antes de tentar o projeto de qualquer dispositivo de coleta, devemos obter informações sobre as partículas, o fluxo de gás e as contribuições do processo.

Características importantes das partículas incluem tamanho, distribuição de tamanho, forma, densidade, viscosidade, corrosividade, reatividade e toxicidade. As características importantes do fluxo de gás são pressão, temperatura, viscosidade, umidade, composição química e inflamabilidade. As condições do processo incluem taxa de fluxo de gás, carregamento de partículas, requisitos de eficiência de remoção e queda de pressão permitida (DAVID COOPER; ALLEY, 2002).

Um exemplo de distribuição de massa por diâmetro de partículas para um processo poluidor qualquer pode ser observado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Distribuição de massa por diâmetro de partículas.

Faixa de Diâmetros (μm)	Porcentagem de Massa por Faixa (%)
0 – 2	1
2 – 4	9
4 – 6	10
6 – 10	30
10 – 18	30
18 – 30	14
30 – 50	5
50 – 100	1

Fonte: COOPER E ALLEY, 2002

Os principais poluentes emitidos durante o processamento do café são o material particulado (MP), compostos orgânicos voláteis (COV), óxidos de carbono (CO e CO₂), além de compostos de nitrogênio e enxofre (US EPA, 1995).

Algumas das operações responsáveis pela emissão de MP são a triagem inicial, o transporte para armazenamento, a secagem e a remoção de resíduos. A etapa de torrefação é a principal emissora de poluentes gasosos como ácidos orgânicos e compostos de nitrogênio e enxofre. Também podem ser esperados emissões de óxidos de carbono e ácidos orgânicos devido à queima de combustíveis. As operações de descafeinação e produção de café instantâneo também podem ser fontes de COV (US EPA, 1995).

Entre as medidas de controle adotadas no processamento de café, tem-se o uso de ciclones nas etapas de triagem, armazenamento, limpeza, torrefação e resfriamento para redução das emissões de MP (US EPA, 1995).

Uma alternativa para o controle das emissões de MP é o emprego de filtros de mangas. Em um filtro de mangas, o gás contendo poeira é filtrado através de sua superfície externa. Esse equipamento representa o tipo de coletor de poeira mais amplamente utilizado devido à sua alta eficiência e baixo custo (BAO et al., 2014).

3.1.1. Efeitos à Saúde

O impacto da poluição do ar é amplo. Em humanos, a deposição pulmonar e a absorção de produtos químicos inalados podem ter consequências diretas para a saúde. No entanto, a saúde pública também pode ser indiretamente afetada pela deposição de poluentes do ar em meios ambientais e absorção por plantas e animais, resultando em produtos químicos que entram na cadeia alimentar ou estão presentes na água potável e, portanto, constituindo fontes adicionais de exposição humana (WHO, 2000).

A presença de material particulado na atmosfera está associada a doenças agudas e crônicas, como asma, doenças cardíacas e outras condições, além de potencializar os efeitos de alergias comuns. Também é perceptível a relação

entre a alta exposição de uma população a material particulado e maiores admissões em hospitais por problemas respiratórios (MITCHELL et al., 2007).

Os efeitos à saúde causados pela exposição a compostos orgânicos voláteis (COV) depende da dose e duração da exposição. A exposição a curto prazo pode causar efeitos adversos à saúde humana, como dores de cabeça, alergia, irritação nos olhos, fadiga e falta de ar. A exposição por períodos longos pode causar efeitos letais, prejudicando o fígado e o sistema nervoso central de forma permanente, além de aumentar a ocorrência de câncer (CRUZ et al., 2017).

Ácidos orgânicos, gerados em processos de combustão incompleta, estão relacionados a reações fotoquímicas de formação de ozônio troposférico, um poluente tóxico à saúde humana (SANTANA et al., 2017). Alguns dos efeitos do ozônio troposférico no organismo humano incluem irritação nos olhos e vias respiratórias, redução da capacidade pulmonar, problemas cardiovasculares, além de ser considerado cancerígeno pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC).

Além disso, os efeitos diretos dos poluentes do ar nas plantas, animais e solo podem influenciar a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas, incluindo sua capacidade de autorregulação, afetando assim a qualidade de vida (WHO, 2000).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), o acesso livre a ar e água de qualidade é um direito humano fundamental, dito isso, em 2006 a organização estabeleceu diretrizes de qualidade do ar para alguns poluentes que podem ser utilizadas globalmente. As diretrizes de qualidade do ar relacionadas aos poluentes relevantes no contexto deste trabalho são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Diretrizes de qualidade do ar estabelecidas pela OMS.

Poluente	Média	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
MP_{2,5}	Anual	5
	24 horas	15
MP₁₀	Anual	15
	24 horas	45
O₃	Alta temporada ^a	60
	8 horas	100
NO₂	Anual	10
	24 horas	25
	1 hora	200
SO₂	24 horas	40
	10 minutos	500
CO₂	24 horas	4
	8 horas	10
	1 hora	35
	15 minutos	100

^a = Média das médias de 8 horas nos seis meses consecutivos com a maior concentração de O₃
Fonte: OMS, 2021

Os valores de concentração fornecidos referem-se a locais de monitoramento representativos de exposições populacionais, os níveis podem ser mais altos perto de fontes específicas, como rodovias, usinas de energia e grandes fontes estacionárias, e a proteção das populações que vivem em tais situações pode exigir medidas especiais para trazer os níveis de poluição abaixo dos valores de referência (WHO, 2006).

Além dos efeitos dos poluentes em ambientes externos, vários poluentes atmosféricos foram reconhecidos como prejudiciais sobre a qualidade do ar em ambientes internos. Os principais poluentes do ar interno incluem NO_x, compostos orgânicos voláteis (COVs), SO₂, O₃, CO, MP, radônio, metais tóxicos e microrganismos (VAN TRAN; PARK; LEE, 2020). As fontes e os efeitos na saúde de alguns poluentes comuns estão listados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Poluentes internos e seus efeitos na saúde humana.

Poluentes	Fontes	Efeitos a Saúde
MP	Ambientes externos, culinária, atividades de combustão e atividades de limpeza.	Morte prematura em pessoas com doença cardíaca ou pulmonar, ataques cardíacos não fatais, asma agravada, sintomas respiratórios aumentados.
COVs	Tintas, manchas, vernizes, pesticidas, adesivos, conservantes de madeira, ceras, polidores, produtos de limpeza, combustíveis, etc.	Irritação nos olhos, nariz e garganta; Dores de cabeça, perda de coordenação e náuseas; Danos ao fígado, rins e sistema nervoso central; Alguns produtos orgânicos podem causar câncer.
NO₂	Aparelhos de cozinha e aquecimento movidos a gás.	Reações asmáticas aumentadas; Dano respiratório levando a sintomas respiratórios.
O₃	Fontes externas, fotocópias, purificação do ar, dispositivos de desinfecção.	Danos no DNA, danos nos pulmões, asma, diminuição das funções respiratórias.
SO₂	Fogões de cozinha, lareiras, ar exterior.	Comprometimento da função respiratória; Asma, doença pulmonar obstrutiva crônica e doenças cardiovasculares.
CO_x	Fogões de cozinha, fumo de tabaco, lareiras, geradores e equipamentos movidos a gasolina.	Fadiga, dor no peito, visão prejudicada, função cerebral reduzida.

Fonte: VAN TRAN; PARK; LEE, 2020

Nas últimas décadas, vários sintomas e doenças foram associados à diminuição da qualidade do ar interno em prédios e casas. De acordo com a OMS, doenças associadas a edifícios referem-se a qualquer doença causada por fatores ambientais internos, que comumente são divididos em duas categorias: síndrome do edifício doente (SED) e doenças relacionadas a edifícios (DRE) (VAN TRAN; PARK; LEE, 2020).

SED geralmente se refere a um grupo de sintomas que estão ligados aos ambientes físicos de edifícios específicos. Os efeitos agudos do SED para a saúde e o conforto aparecerão quando os pacientes passarem uma certa quantidade ou duração de tempo em um edifício, mas os sintomas e suas causas são difíceis de identificar claramente (VAN TRAN; PARK; LEE, 2020). Alguns desses sintomas incluem:

- Irritação dos olhos, nariz e garganta;
- Dores de cabeça, fadiga mental, perda de memória, náusea, tontura, cansaço e irritabilidade;

- Asma e sintomas similares;
- Ressecamento da pele, irritação gastrointestinal, etc.

DRE descreve doenças e sintomas com um agente causador identificado diretamente relacionado à exposição à má qualidade do ar em edifícios (VAN TRAN; PARK; LEE, 2020). Algumas doenças e sintomas relacionados a edifícios são:

- Gripe;
- Pneumonia;
- Problemas pulmonares e respiratórios.

3.1.2. Legislação Atual

A resolução CONAMA 491/2018 estabelece padrão de qualidade do ar como: “um dos instrumentos de gestão da qualidade do ar, determinado como valor de concentração de um poluente específico na atmosfera, associado a um intervalo de tempo de exposição, para que o meio ambiente e a saúde da população sejam preservados em relação aos riscos de danos causados pela poluição atmosférica” (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, 2018).

A instituição de padrões de qualidade do ar não é simples, deve ser levado em consideração o equilíbrio entre os riscos à saúde, as condições econômicas, políticas e sociais, a viabilidade técnica, além do grau de desenvolvimento e da capacidade de gerenciamento da qualidade do ar.

Em nível nacional, os padrões de qualidade do ar são estabelecidos pela Resolução CONAMA 491/2018 publicada em novembro de 2018. Tal Resolução está estruturada considerando como referência os valores guia recomendados pela Organização Mundial da Saúde (IEMA, 2018).

Os padrões de qualidade do ar estabelecidos nesta resolução serão adotados sequencialmente em quatro etapas, sendo três denominadas padrões intermediários (PI-1, PI-2, PI-3) e um padrão final (PF), expressos em

microgramas por metro cúbico ou ppm. Os padrões de qualidade do ar estabelecidos são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução CONAMA 491/2018.

Poluente Atmosférico	Sigla	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	ppm
Material Particulado	MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50	-
		Anual ¹	40	35	30	20	-
Material Particulado	MP _{2,5}	24 horas	60	50	37	25	-
		Anual ¹	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre	SO ₂	24 horas	125	50	30	20	-
		Anual ¹	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio	NO ₂	1 horas ²	260	240	220	200	-
		Anual ¹	60	50	45	40	-
Partículas Totais em Suspensão	PTS	24 horas	-	-	-	240	-
		Anual ⁴	-	-	-	80	-
Fumaça	-	24 horas	120	100	75	50	-
		Anual ¹	40	35	30	20	-
Ozônio	O ₃	8 horas ³	140	130	120	100	-
Monóxido de Carbono	CO	8 horas ³	-	-	-	-	9
Chumbo	Pb ⁵	Anual ¹	-	-	-	0,5	-

1 – Média aritmética anual

2 – Média horária

3 – Máxima média móvel obtida no dia

4 – Média geométrica anual

5 – Medido nas partículas totais em suspensão

Segundo o IEMA, é importante notar que outros poluentes também podem estar presentes na atmosfera, entretanto, não constam das listas de poluentes com padrões legislados devido a:

(i) não existirem evidências científicas significativas sobre a relação entre a concentração do poluente numa dada exposição com o efeito à saúde que permitam a elaboração de um padrão de qualidade do ar;

(ii) haver dentre os poluentes com padrões legislados um poluente que seja indicador de outro poluente por fazer parte das suas transformações na atmosfera ou por ser emitido pelo mesmo tipo de fonte;

(iii) dificuldades técnicas na amostragem ou medição do poluente (IEMA, 2018).

De forma similar a resolução CONAMA 491/2018, o Decreto N° 3463-R de 2013 do Governo do Estado do Espírito Santo estabelece metas e padrões de qualidade do ar, expressos em micrograma por metro cúbico na Tabela 3.5, a serem atingidos no âmbito estadual.

Tabela 3.5 – Padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo Decreto N° 3463-R de 2013.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	MI-1	MI-2	MI-3	PF
MP_{2,5}	24 horas	-	50	37	25
	Anual ¹	-	20	15	10
MP₁₀	24 horas	120	80	60	50
	Anual	45	33	25	20
PTS	24 horas	180	170	160	150
	Anual ²	65	63	62	60
NO₂	1 horas	240	220	210	200
	Anual	50	45	42	40
SO₂	24 horas	60	40	30	20
	Anual	40	30	20	-
O₃	8 horas	140	120	110	100
CO	1 hora	-	-	-	10.000
PS	30 dias	14 ³	-	-	-

MI = Meta intermediária

PF = Padrão final

1 – Média aritmética anual após 4 anos de medição

2 – Média geométrica anual

3 – Valor expresso em g/m²

No que diz respeito a qualidade do ar interno, ainda não existem valores específicos a serem seguidos pra a concentração dos poluentes mencionados nesse trabalho em ambientes internos. No entanto, a Resolução n° 09 de 16 de janeiro de 2003 da ANVISA destaca as principais fontes em ambientes interiores e as respectivas medidas de correção a serem tomadas conforme descrito na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Poluentes internos e possíveis medidas de correção.

Poluentes	Fontes	Medidas de correção
CO	Combustão (cigarros, fogões e veículos automotores).	Manter a captação de ar exterior com baixa concentração de poluentes; restringir as fontes de combustão; Manter exaustão em áreas onde ocorre combustão; eliminar a infiltração de CO proveniente de fontes externas; restringir o tabagismo em áreas fechadas.
CO₂	Produtos de metabolismo humano e combustão.	Aumentar a renovação de ar externo; Restringir as fontes de combustão e o tabagismo em áreas fechadas.
NO₂	Combustão.	Restringir as fontes de combustão; Manter a exaustão em áreas em que ocorre a combustão; impedir a infiltração de NO ₂ proveniente de fontes externas.
O₃	Máquinas copiadoras e impressoras a laser.	Exaustão do ambiente ou enclausuramento em locais exclusivos para os equipamentos.
MP	Poeira e fibras.	Manter filtragem de acordo com a NBR 6402 da ABNT; evitar isolamento termo acústico; Higienizar as superfícies fixas e mobiliários sem o uso de vassouras, escovas ou espanadores; Selecionar materiais e construção com menor porosidade.
COV	Cera, mobiliário, produtos usados em limpeza, solventes, materiais de revestimento, tintas, colas, etc.	Selecionar materiais de construção de menor porosidade; Usar produtos de limpeza que não contenham COV ou que não apresentem alta taxa de volatilização e toxicidade.

Fonte: ANVISA

A norma reguladora NR-15 estabelece atividades que devem ser consideradas insalubres, gerando direito ao adicional de insalubridade aos trabalhadores. A norma define os limites de tolerância para agentes físicos, químicos e biológicos, quando é possível quantificar a contaminação do ambiente, listando ou mencionando situações em que o trabalho é considerado insalubre.

A ACGIH propôs limites de exposição ocupacionais chamados de TLVs. Os TLVs referem-se às concentrações das substâncias dispersas na atmosfera que representam condições sobre as quais se acredita que os trabalhadores possam estar expostos diariamente sem apresentar efeitos adversos à saúde.

O limite de exposição TLV-TWA é definido como a concentração a qual o trabalhador pode estar exposto durante 8 horas diárias sem efeitos adversos à saúde.

O TLV-STEL é um limite de exposição para uma média ponderada de 15 minutos, a qual os trabalhadores possam estar expostos por curtos períodos de tempo sem efeitos adversos à saúde.

O TLV-C é um limite que não deve ser excedido em nenhum momento de exposição durante a jornada de trabalho.

A Tabela 3.7 exibe os valores de TLV em ppm para alguns poluentes.

Tabela 3.7 – Valores de TLV em ppm para alguns poluentes.

Substância	TLV – TWA	TLV – STEL	TLV – C
Acetona	500	750	2.500
Ácido Acético	10	15	50
Ácido Fórmico	5	10	30
Ácido Nítrico	2	4	25
Amônia	25	35	300
Arsênio	0,05	-	1.400
Benzeno	0,5	2,5	500
Fosfina	0,3	1	200
Gás Carbono	5.000	30.000	40.000

A resolução CONAMA 382/2006 estabelece os limites máximos de poluentes atmosféricos por poluente, tipologia de fonte e de combustível queimado para fontes fixas (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, 2006).

O uso do limite de emissões é um dos instrumentos de controle ambiental, cuja aplicação deve ser associada a critérios de capacidade de suporte do meio ambiente, ou seja, ao grau de saturação da região onde se encontra o empreendimento (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, 2006).

Os valores de emissão provenientes de fontes fixas de um empreendimento devem ser enquadrados em uma ou mais categorias para qual a resolução estabelece limites, e os valores devem ser comparados a fim de verificar o atendimento ou não da resolução.

A Tabela 3.8 apresenta alguns limites de emissão estabelecidos pela resolução para a queima dos combustíveis gás natural e derivados de madeira.

Tabela 3.8 – Limites de emissão para poluentes atmosféricos.

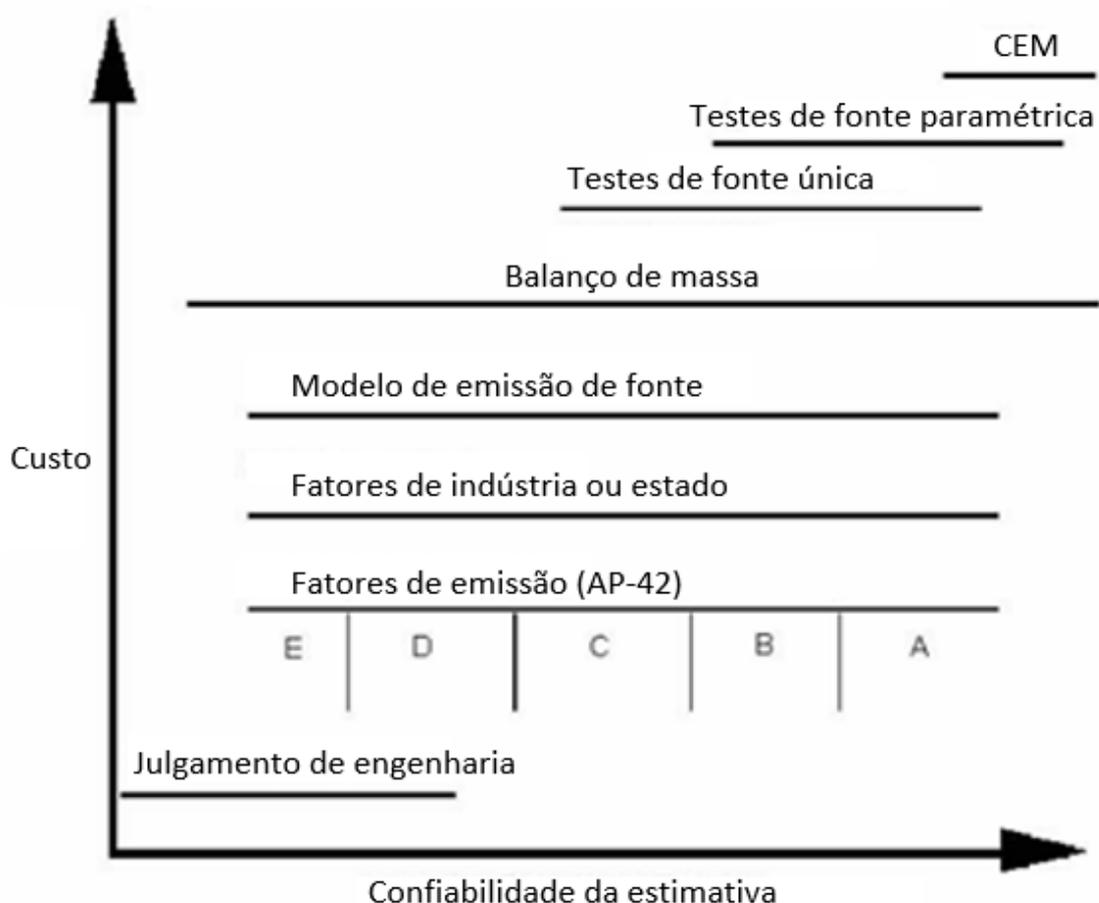
Poluente	Combustível queimado	Potência térmica nominal (MW)	Limite de emissão (mg/Nm³)
NO_x	Gás Natural	< 70	320
		>= 70	200
NO_x	Derivados de Madeira	< 10	N.A
		>= 10	650
MP	Derivados de Madeira	< 10	730
		>= 10	520
		>= 30	260
		>= 70	130

3.2. INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

O inventário de emissões atmosféricas é um importante instrumento para a gestão atmosféricas de uma região, pois permite definir qualitativa e quantitativamente as diversas atividades existentes na área de estudo com potencial de alteração da qualidade do ar (IEMA, 2019).

Um inventário de emissões atmosféricas pode ser definido como uma listagem abrangente das emissões atmosféricas causadas por determinada fonte ou grupo de fontes em uma área geográfica durante um intervalo de tempo específico.

Conforme exposto na Figura 3.1, existem algumas metodologias para se elaborar um inventário de emissões atmosféricas e a sua escolha está relacionada com os custos envolvidos e com a confiabilidade necessária para a estimativa a ser feita.



Adaptado de: EPA, 1995

Figura 3.1 – Relação custo/confiabilidade de diferentes métodos de estimativa de emissões.

O método empregado neste trabalho será a metodologia de fatores de emissão da AP 42. A classificação dos fatores de emissão é uma avaliação geral do quão bom é um fator, com base na qualidade dos testes ou informações acerca da fonte do fator e em quão bem o fator representa a fonte de emissão (EPA, 1995).

A Tabela 3.9 apresenta a descrição das possíveis classificações da qualidade dos fatores de emissão.

Tabela 3.9 – Classificação da qualidade dos fatores de emissão

Avaliação	Qualidade do fator
A	Excelente. O fator é desenvolvido a partir de dados de testes de origem de classificação A e B retirados de muitas instalações e indústrias escolhidas aleatoriamente.
B	Acima da média. O fator é desenvolvido a partir de dados de testes de classificação A ou B de um número razoável de instalações.
C	Médio. O fator é desenvolvido a partir de dados de testes de classificação A, B ou C de um número razoável de instalações.
D	Abaixo da média. O fator é desenvolvido a partir de dados de testes de classificação A, B ou C de um pequeno número de instalações, e pode haver razões para suspeitar que essas instalações não representam uma amostra aleatória da indústria.
E	Baixo. O fator é desenvolvido a partir de dados de testes de classificação C ou D e podem haver razões para suspeitar que as instalações testadas não representam uma amostra aleatória da indústria.

Fonte: EPA, 1995

Fatores de emissão e inventários de emissões atmosféricas são ferramentas fundamentais para a gestão da qualidade do ar. Através das estimativas de emissão, é possível desenvolver estratégias de controle de emissão e de mitigação, além de averiguar os efeitos das fontes e a aplicabilidade de programas de licenciamento (EPA, 1995).

Um fator de emissão é um valor representativo, usualmente expresso como o peso do poluente dividido por um peso unitário, volume, distância ou duração da atividade de emissão, que relaciona a quantidade de poluente lançado para a atmosfera com a taxa de execução da atividade poluidora investigada. Dessa forma os fatores de emissão podem ser empregados na estimativa das fontes de emissão por meio da seguinte equação geral:

$$E = A \times EF \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (3.1)$$

Onde:

- *E* corresponde à taxa de emissão;
- *A* corresponde à taxa de atividade;
- *EF* corresponde ao fator de emissão;
- *ER* corresponde à eficiência de controle das emissões.

As Tabelas 3.10 e 3.11 incluem os fatores de emissão dos poluentes MP, COV, metano, CO e CO₂ para algumas das operações envolvidas na produção de café.

Tabela 3.10 – Fatores de emissão para material particulado

Fonte de emissão	MP Filtrável (lb/ton)	MP Condensável (lb/ton)
Torrador com oxidante térmico	0,12	ND
Resfriador contínuo com ciclone	0,028	ND
Torrador contínuo	0,66	ND
Torrador contínuo com oxidante térmico	0,092	0,10
Grão de café com sistema de peneiramento, manuseio e armazenamento com filtro de tecido	0,059	ND
Separação e secagem	ND	ND
Equilibração	ND	ND

ND = não há dados
Fonte: EPA, 1995

Tabela 3.11 – Fatores de emissão para gases

Fonte de emissão	COV (lb/ton)	Metano (lb/ton)	CO (lb/ton)	CO ₂ (lb/ton)
Torrador	0,86	ND	ND	180
Torrador com oxidante térmico	0,047	ND	0,55	530
Torrador contínuo	1,4	0,26	1,5	120
Torrador contínuo com oxidante térmico	0,16	0,15	0,098	200
Descafeinação: solvente ou extração de CO ₂ supercrítico	ND	ND	ND	ND
Secagem a vapor ou ar quente	ND	ND	ND	ND
Secagem por spray	ND	ND	ND	ND
Secagem por congelamento	ND	ND	ND	ND

ND = não há dados
Fonte: EPA, 1995

Através de extensa revisão literatura, nota-se a existência de diversos estudos acerca das emissões de gases do efeito estufa pela indústria de café, principalmente monóxido e dióxido de carbono. (LEBOUF; ALDRIDGE, 2019) (RUIZ; REISER; KRANERT, 2021) (JARAMILLO OTÁLVARO; OSORIO SARAZ; CORREA LONDOÑO, 2017).

Por outro lado, destaca-se dificuldade de se encontrar estudos similares que tratem da emissão de material particulado pela indústria de café.

Na elaboração de um inventário de emissões atmosféricas, a falta de dados pode ser um empecilho para a estimativa confiável das fontes inventariadas. A

avaliação da qualidade das estimativas pode ser realizada através da metodologia DARS (*Data Attribute Rating System*), proposto pela US EPA (1996).

O DARS distingue a estimativa de emissões em fatores de emissão e dados de atividade, para, assim, atribuir um valor numérico para cada um dos atributos avaliados. Os pesos são atribuídos a partir do que é conhecido dos parâmetros fator e atividade, como: medição ou método empregado para estimativa, especificidade da categoria da fonte, congruência espacial e congruência temporal (IEMA, 2019).

Os pesos de cada atributo relacionados ao fator de emissão ou a atividade são combinadas de forma a criar uma nota que representa a confiança do inventário, conforme a Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Composição do Método DARS para análise das estimativas das fontes emissoras.

Atributo	Fator	Atividade	Emissão
Medição/Método	e_1	a_1	$e_1 * a_1$
Especificidade da Fonte	e_2	a_2	$e_2 * a_2$
Congruência Espacial	e_3	a_3	$e_3 * a_3$
Congruência Temporal	e_4	a_4	$e_4 * a_4$
Composição	$\sum_{i=1}^4 \frac{e_i}{4}$	$\sum_{i=1}^4 \frac{a_i}{4}$	$\sum_{i=1}^4 \frac{e_i * a_i}{4}$

e_i – peso do fator de emissão relacionado ao atributo avaliado;

a_i – peso referente à informação da atividade relacionado ao atributo avaliado;

Fonte: IEMA, 2019

O inventário de emissões atmosféricas da Região da Grande Vitória (RGV) foi feito com base na metodologia de fatores de emissão da USEPA. Foram inventariadas duas empresas produtoras de café: A Real Café e a Café Número Um.

Devido a magnitude do inventário, foram adotadas diferentes abordagens para a quantificação de emissões com base nas informações disponíveis para cada atividade inventariada. Dessa forma, a metodologia DARS foi aplicada para qualificar os fatores de emissão e dados de atividade utilizados, além da estimativa de emissão do poluente calculada.

Apesar da metodologia de fatores de emissão da AP42 seja reconhecida internacionalmente como um método válido, autores como R.A. Noponen (2012), R. F. Lebouf & M. Aldridge (2019), indicam que as estimativas mais precisas devem ser feitas com base em fatores de emissão desenvolvidos regionalmente (NOPONEN et al., 2012), (LEBOUF; ALDRIDGE, 2019).

A Agência Europeia de Meio Ambiente apresenta diretrizes para a estimativa de emissões em diferentes níveis de detalhamento (EEA, 2019). Na Tabela 3.13, são descritos três níveis:

Tabela 3.13 – Diretrizes para a estimativa de emissões segundo a EEA

Diretrizes	
Menor nível	É assumido uma relação linear entre a taxa de atividade, obtido através de dados estatísticos relacionados ao processo inventariado, e os fatores de emissão.
Nível médio	São usados os mesmos dados estatísticos de taxa de atividade do nível anterior, porém são aplicados fatores de emissão específicos do país, desenvolvidos com base em informações específicas do país a respeito do processo inventariado.
Maior nível	São utilizados dados obtidos em nível de operação ou modelos sofisticados. Exemplos podem incluir dados de emissão de poluentes ou dados de comércio de emissões entre indústrias.

O Banco Mundial estabelece metodologias de inventário de emissões com base em fatores de emissão de diferentes agências internacionais (EPA, IEA, IPCC), e em dados de atividade de diversos países para diferentes fontes de emissão (WBG, 2015). Algumas das fontes de emissão para as quais são desenvolvidos métodos são: Fontes estacionárias, emissões provenientes de refrigeração, fontes móveis, geração de eletricidade, entre outras.

Para levantamento dos dados de atividade são realizadas pesquisas anuais envolvendo os diferentes setores industriais. Quando não existem dados de atividade disponíveis, são feitas estimativas com base no número de empregados ou área ocupada por determinada indústria.

Outros autores sugerem métodos alternativos para o monitoramento da torrefação de café, como as técnicas de espectrometria iônica ou espectrometria

de massa (GLOESS et al., 2018) ou amostragem ativa e cromatografia gasosa bidimensional (NOVAES et al., 2019).

3.3. DIAGNÓSTICO E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA

A importância de ar limpo e não contaminado no ambiente de trabalho industrial é bem conhecido. A indústria moderna, com sua complexidade de operações e processos, usa um número crescente de compostos e substâncias químicas, muitos dos quais são altamente tóxicos. O uso de tais materiais pode resultar em partículas, gases e vapores no ar do ambiente de trabalho que excedem os níveis de segurança (ACGIH, 1998).

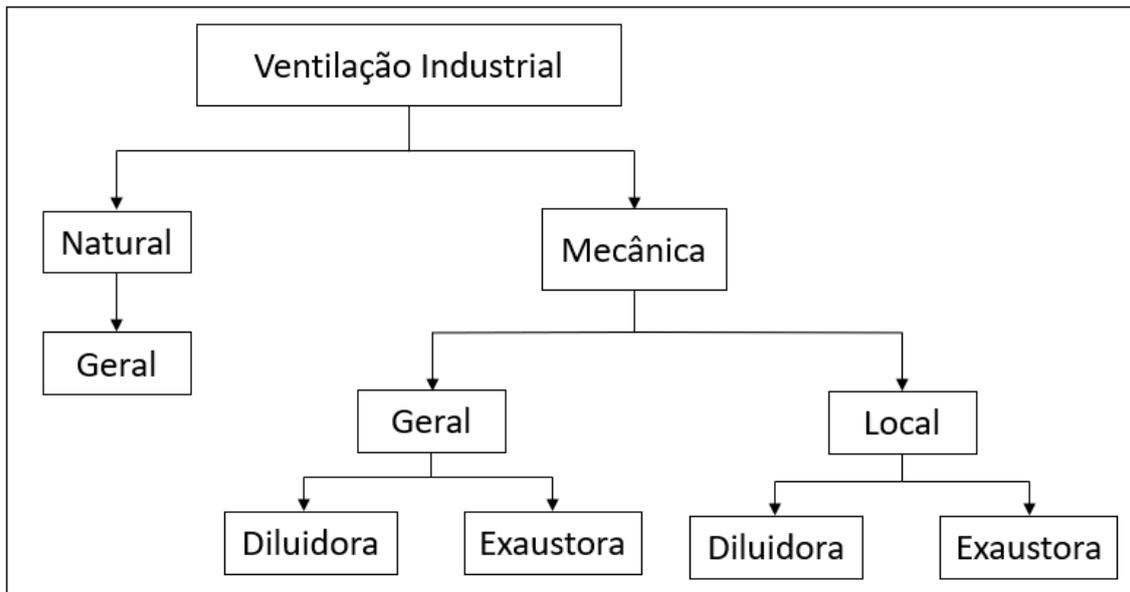
O controle de emissões atmosféricas e o uso de equipamentos para essa finalidade contribuem para o meio ambiente e para a preservação da qualidade do ar. Neste trabalho serão discutidas alternativas de dimensionamento envolvendo equipamentos de controle inseridos em um sistema de ventilação industrial ou sistema de despoejamento.

3.3.1. Formas de ventilação em edificações

A ventilação industrial, adequadamente projetada e operada, consegue eliminar agentes nocivos à saúde humana, ou no mínimo consegue uma redução na intensidade e na concentração dos agentes contaminantes a níveis de quase total inocuidade e evita que esses agentes se dispersem na atmosfera (MACINTYRE, 1990).

Quando o sistema de ventilação é utilizado para o controle de contaminantes, ar externo deve ser misturado com o contaminante para que a concentração média seja reduzida a um nível seguro, enquanto o ar contaminado é descarregado na atmosfera (ACGIH, 1998).

Um sistema de ventilação industrial pode ser dividido em duas subdivisões, a Figura 3.2 indica a classificação geral dos sistemas de ventilação industrial.



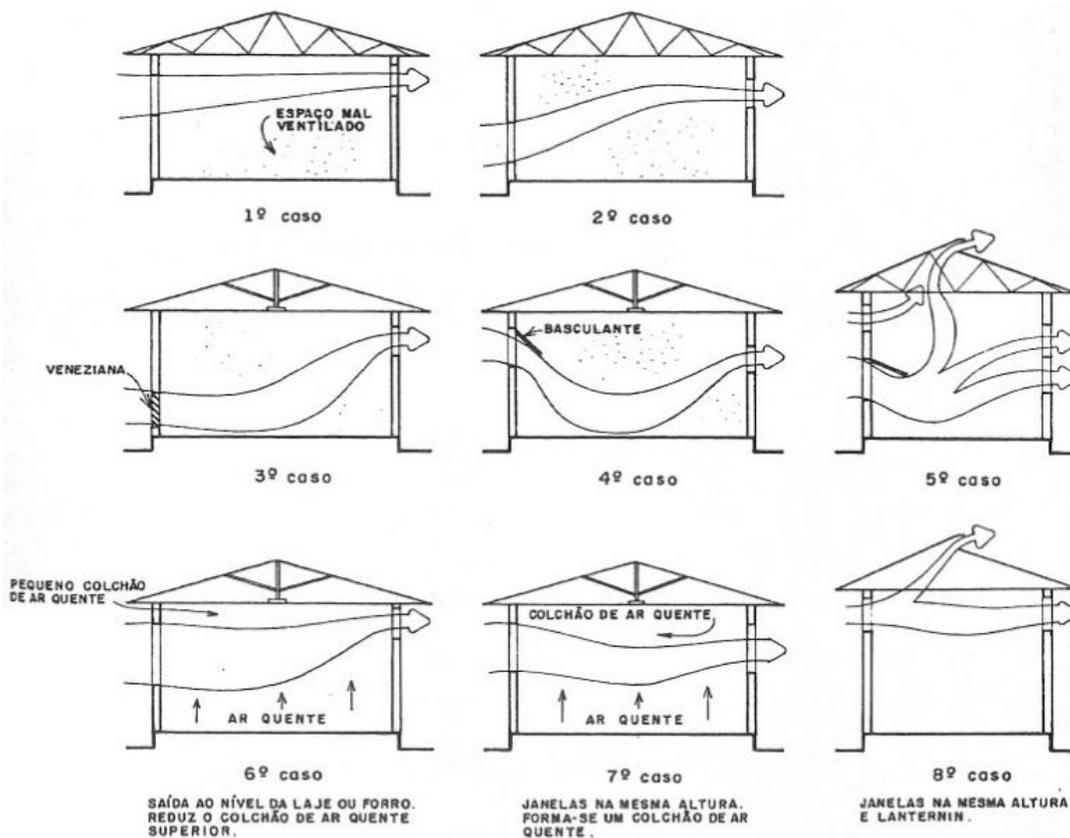
Fonte: (FURIERI; CASTILHO, 2009)

Figura 3.2 – Classificação geral dos sistemas de ventilação industrial

3.3.1.1. Sistema de ventilação natural

A ventilação natural pode ser ocasionada pela ação dos ventos, que embora intermitente, pode provocar variações horizontais das pressões permitindo a movimentação das massas de ar. Em muitas situações não são conseguidos resultados satisfatórios somente através da utilização de sistema de ventilação natural (FURIERI; CASTILHO, 2009).

A ventilação natural consiste em proporcionar a entrada e a saída de ar de um ambiente sob uma forma controlada e intencional graças a aberturas existentes para esse fim, como é o caso de janelas, portas e lanternins (MACINTYRE, 1990). A Figura 3.3 exibe exemplos de sistemas de ventilação natural.



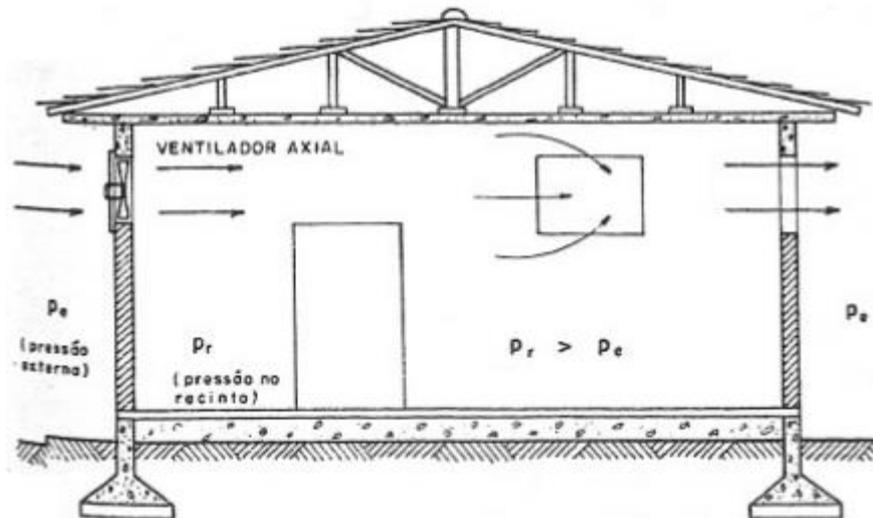
Fonte: MACINTYRE, 1990

Figura 3.3 – Exemplo de sistemas de ventilação natural.

Em casos onde um sistema de ventilação natural não produza resultados satisfatórios deve se adotar um sistema de ventilação mecânica, quando se empregam equipamentos mecânicos (ventiladores) para a ventilação do recinto (MACINTYRE, 1990).

3.3.1.2. Sistema de ventilação diluidora

Na ventilação geral diluidora, um ou mais ventiladores enviam ar exterior para o interior do recinto. Como a pressão no recinto se torna maior que a pressão no exterior, o ar insuflado sai por outras aberturas existentes, produzindo os efeitos desejados de diluição dos contaminantes, de abaixamento da temperatura e de arejamento (MACINTYRE, 1990). A Figura 3.4 exibe um exemplo de sistema de ventilação diluidora.



Fonte: MACINTYRE, 1990

Figura 3.4 – Exemplo de sistema de ventilação diluidora

O uso de ventiladores para insuflar ar dentro de um recinto permite um maior controle da incidência de ar e da pureza do ar insuflado, ao contrário da ventilação natural. Dessa forma é possível evitar a entrada de ar contaminado exaurido de outro recinto.

No entanto, o sistema de ventilação geral diluidora apresenta quatro fatores limitantes: A quantidade de contaminante gerado não deve ser muito grande, ou a quantidade de ar insuflado requerida seria impraticável; Trabalhadores devem estar longe o suficiente da fonte de contaminação ou as concentrações de contaminante devem ser baixas o suficiente para não causar exposições perigosas; A toxicidade do contaminante deve ser baixa; A evolução da concentração de contaminantes deve ser razoavelmente uniforme (ACGIH, 1998).

3.3.1.3. Sistema de ventilação local exaustora

Neste trabalho serão abordados, principalmente, sistemas de ventilação local exaustora com a finalidade de prover o despoeiramento necessário ao bom funcionamento e manutenção da qualidade do ar do empreendimento estudado.

A instalação de sistemas de ventilação tem como finalidade:

- Manter o conforto e a produtividade do ser humano;
- A saúde e a segurança do homem;
- Conservar em bom estado materiais e equipamentos.

De acordo com Macintyre (1980), um sistema de ventilação local exaustora é essencialmente composto de quatro partes:

- Captor, dispositivo de captação do ar contaminado, posicionada no local onde este se origina;
- Rede de dutos ou tubulações, responsáveis pela condução do ar contaminado do captor ao ventilador e do ventilador para o exterior ou equipamento de controle;
- Equipamentos de controle, dispositivo capaz de reter os contaminantes do ar, sejam eles partículas ou gases;
- Ventilador, capaz de produzir a pressão positiva que causa o movimento do ar para a atmosfera exterior.

A Figura 3.5 apresenta a configuração básica de um sistema de ventilação local exaustora (SVLE).

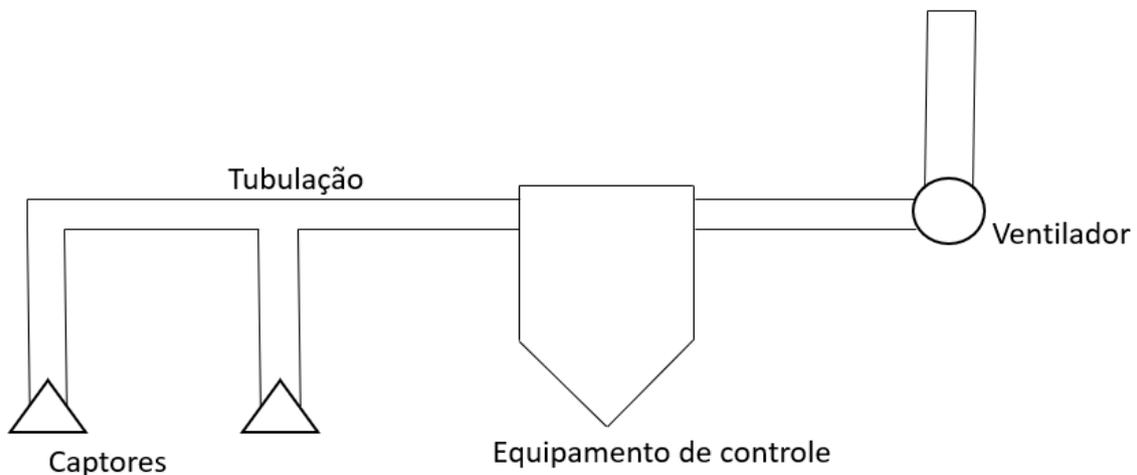


Figura 3.5 – Configuração básica de um sistema de ventilação local exaustora (SVLE)

3.3.2. Captores

O captor é uma peça ou dispositivo no qual, pela diferença de pressões entre o ar ambiente e o existente no captor, estabelece-se uma corrente para o interior

do mesmo (MACINTYRE, 1990). Os tipos de captosres existentes podem ser divididos entre enclausurantes, cabines e exteriores.

Captosres enclausurantes são aqueles que envolvem totalmente ou parcialmente o processo ou o ponto de geração de contaminantes. A exaustão dentro do captor contém o contaminante dentro do enclausuramento e evita o escape para o ambiente de trabalho. O captor enclausurante é preferido sempre que a configuração e operação do processo permitirem (ACGIH, 1998).

Os captosres do tipo cabine são similares aos enclausurantes, porém com uma das faces abertas para permitir o acesso a operação ou o processo poluidor.

Captosres externos são aqueles localizados ao lado de uma fonte de emissão, sem envolvê-la. Quando o contaminante é um gás, vapor ou partículas finas e não é emitido com nenhuma velocidade significativa, a orientação do captor não é crítica. No entanto, se o contaminante contiver partículas grandes que são emitidas com uma velocidade significativa, a coifa deve estar localizada no caminho da emissão (ACGIH, 1998).

Durante a atuação de um captor, as partículas contaminantes devem ser deslocadas para o captor a uma certa velocidade, denominada de velocidade de captura.

A velocidade de captura corresponde a velocidade mínima induzida pelo captor necessária para capturar e transportar o contaminante para o interior do exaustor. Essa velocidade será resultado da taxa de fluxo do ar e da configuração do exaustor (ACGIH, 1998).

Para o dimensionamento de um captor, deve-se determinar o valor da vazão de exaustão a partir da área aberta e da velocidade de captura, conforme:

$$Q = v_c \cdot A \tag{3.2}$$

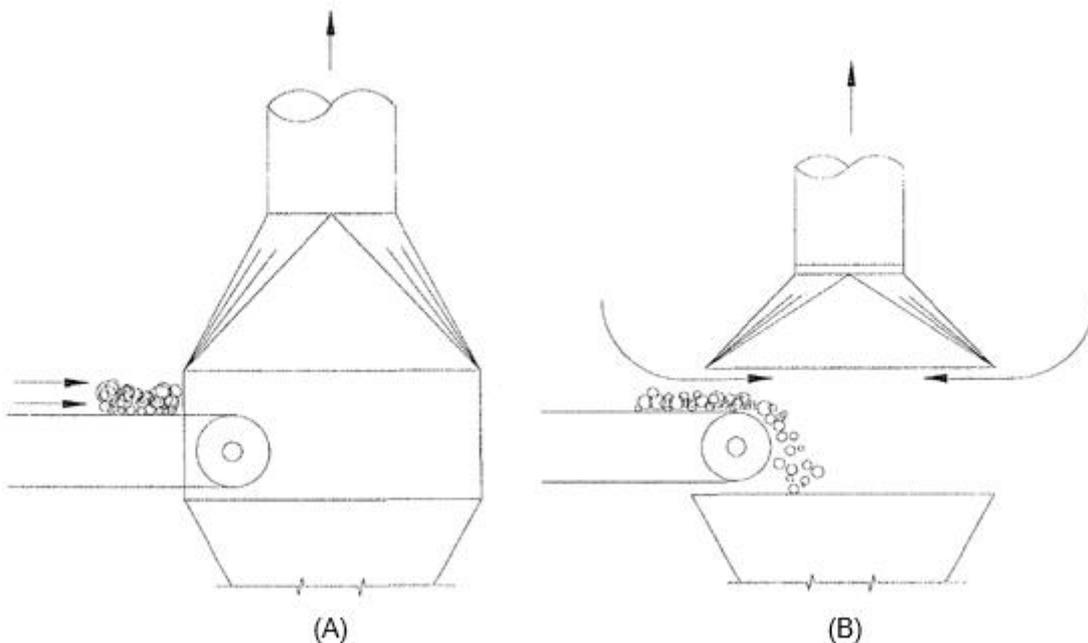
Onde:

- Q corresponde a vazão de exaustão (m³/s);
- v_c corresponde à velocidade de captura (m/s);
- A corresponde à área aberta do captor (m²).

A vazão de exaustão representa o volume de ar movimentado para captar um determinado volume de contaminantes emitidos por uma fonte poluidora. Uma vez que o custo da maioria dos sistemas de controle de poluição é proporcional à taxa de fluxo volumétrico total, o tipo, tamanho e localização do captor são importantes (DAVID COOPER; ALLEY, 2002).

Quando é possível o enclausuramento da fonte, ou seja, quando o captor envolve completamente o equipamento gerador de particulado, a velocidade de captura será o valor que impeça suficientemente a fuga destes contaminantes pelas aberturas do captor, sejam elas frestas ou pequenas aberturas indispensáveis para a operação do sistema (FURIERI; CASTILHO, 2009). O enclausuramento de uma fonte é um fator importante para reduzir a vazão de exaustão como também para melhorar a eficiência de captação.

A Figura 3.6 exibe um exemplo de fonte enclausurada e não enclausurada.



Fonte: ACGIH, 1998

Figura 3.6 – Exemplo de fonte enclausurada (A) e não enclausurada (B)

A velocidade de captura deve ser adotada conforme referências da literatura envolvendo processos similares ao que se deseja aplicar o controle. A ACGIH recomenda velocidades de captura a partir das condições de dispersão do contaminante conforme a Tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Velocidade de captura conforme condições de dispersão do contaminante

Condições de dispersão do contaminante	Exemplos	Velocidade de Captura (fpm)	Velocidade de Captura (m/s)
Liberado praticamente sem velocidade	Evaporação em tanques, desengorduramento, etc.	50 – 100	0,25 – 0,50
Liberado em baixa velocidade no ar moderadamente parado	Cabines de pintura, enchimento intermitente de recipientes; transferências de esteira de baixa velocidade, etc.	100 – 200	0,50 – 1,00
Geração ativa em zona de movimento rápido do ar	Pintura por spray em cabines rasas; enchimento de barril; carregamento do transportador; trituradores, etc.	200 – 500	1,00 – 2,50
Liberado em alta velocidade na zona de movimento de ar muito rápido	Esmerilhamento; jateamento abrasivo.	500 - 2000	2,50 – 10,00

Fonte: ACGIH, 1998

À medida que o fluido escoar para dentro do captor, ocorre a perda de carga devido a conversão da pressão estática em energia cinética ou pressão dinâmica. Em razão das perdas de carga devidas à conversão de pressão ocorre uma redução na vazão no captor, e esta redução é caracterizada por um coeficiente C_e denominado coeficiente de entrada (MACINTYRE, 1990).

O coeficiente de entrada representa a razão entre a vazão real e a vazão teórica e pode ser calculado conforme a equação a seguir:

$$C_e = \frac{Q_{real}}{Q_{teórica}} = \sqrt{\frac{h_v \gamma}{p_e}} \quad (3.3)$$

Onde:

- Q_{real} corresponde a vazão real (m³/s);
- $Q_{teórica}$ corresponde a vazão teórica (m³/s);
- h_v corresponde à pressão dinâmica no duto (Pa);
- γ corresponde ao peso específico do fluido (N/m³);
- p_e corresponde à pressão estática no duto (Pa).

A perda de carga na entrada do duto é denominada Δp . A pressão estática (em valor absoluto) é a soma da pressão dinâmica h_v com a perda de carga Δp , ou seja, a energia de pressão se transforma em pressão dinâmica h_v e em pressão para vencer perdas de carga Δp (MACINTYRE, 1990). A perda de carga pode ser calculada conforme as equações a seguir:

$$p_e = h_v \cdot \gamma + \Delta P \tag{3.4}$$

$$\Delta P = F \cdot h_v \tag{3.5}$$

Onde:

- ΔP corresponde à perda de carga (m);
- F corresponde ao coeficiente de atrito;
- h_v corresponde à pressão dinâmica no duto (Pa);
- γ corresponde ao peso específico do fluido (N/m³);
- p_e corresponde à pressão estática no duto (Pa).

3.3.3. Dutos

O sistema de dutos de ventilação vem a ser uma disposição de tubulações para a condução do ar sobre pressão pouco elevada, onde, portanto, a compressibilidade do ar pode ser desprezada, não ocorrendo no escoamento os fenômenos termodinâmicos que se verificam, por exemplo, nas linhas de ar comprimido e de vapor (MACINTYRE, 1990).

As principais partes de um sistema de ventilação local exaustora são conectados através de um sistema de dutos ou tubulação. Esses dutos conduzem o ar graças à energia que é comunicada ao mesmo ou à rarefação, provocadas por um ventilador localizado, em geral, em local separado e até a razoável distância do recinto a ventilar (MACINTYRE, 1990).

A velocidade do ar nas canalizações de ventilação local exaustora deve possuir magnitude suficiente para transportar as partículas dos contaminantes e para mantê-las em suspensão.

A velocidade mínima necessária para o transporte dos contaminantes varia de acordo com a densidade e granulometria das partículas. A Tabela 3.15 apresenta alguns valores usuais de velocidade para diferentes densidades de partículas.

Tabela 3.15 – Velocidade de transporte de partículas para diferentes densidades

Tipo de partícula	Velocidade Mínima (m/s)
1 – Partículas de densidade baixa Ex: Fumaça, fumos de óxido de zinco, fumos de óxido de alumínio, pó de algodão	10
2 – Partículas de densidade média Ex: Cereais, pós de madeira, pó de plástico, pó de borracha	15
3 – Partículas de densidade média/alta Ex: Fumos metálicos, poeira de jateamento de areia e de esmerilhamento	20
4 – Partículas de densidade alta Ex: Fumos de chumbo, poeiras de fundição de ferro	25

Fonte: LISBOA, 2007

A velocidade no duto tem também influência na perda de carga no sistema, ou seja, na energia requerida para o fluido percorrer o sistema de dutos. Quanto maior a velocidade, maior será a perda de carga e a potência exigida do ventilador, de forma que é conveniente que a velocidade seja o mais próximo o possível da velocidade mínima de transporte para o caso em específico.

A perda de carga em um sistema de dutos é determinada através da soma entre a perda de carga distribuída e a perda de carga localizada conforme a equação a seguir.

$$\Delta P = \Delta P_{Distribuida} + \Delta P_{Localizada} \quad (3.6)$$

A perda de carga distribuída ocorre ao longo dos trechos de um sistema de dutos, enquanto a perda de carga localizada é decorrente dos acessórios presentes no sistema, tais como curvas, joelhos ou contrações.

Conhecendo-se a rugosidade do material do duto, o peso específico e a viscosidade da mistura gasosa o cálculo da perda de carga distribuída pode ser feito conforme a seguinte equação.

$$\Delta P = \left(F \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \right) \cdot \gamma \quad (3.7)$$

Onde:

- ΔP corresponde à perda de carga distribuída (m);
- F corresponde ao coeficiente de atrito;
- γ corresponde ao peso específico do fluido (N/m³);
- L corresponde ao comprimento dos dutos (m);
- D corresponde ao diâmetro do duto (m).

Para o cálculo da perda de carga total em um sistema de dutos deve-se considerar as perdas de carga localizadas em decorrência das peças especiais utilizadas. As principais peças especiais nas tubulações são: bocas de captação ou tomadas de ar, bocas de saída, grelha de insuflamento sem registros ou com registros de regulagem de vazão, curvas e cotovelos, alargamentos graduais u expansões, reduções e filtros (FURIERI; CASTILHO, 2009).

Para calcular a perda de carga localizada, basta multiplicar o valor K tabelado para a respectiva peça pela pressão dinâmica h_v conforme a seguinte equação.

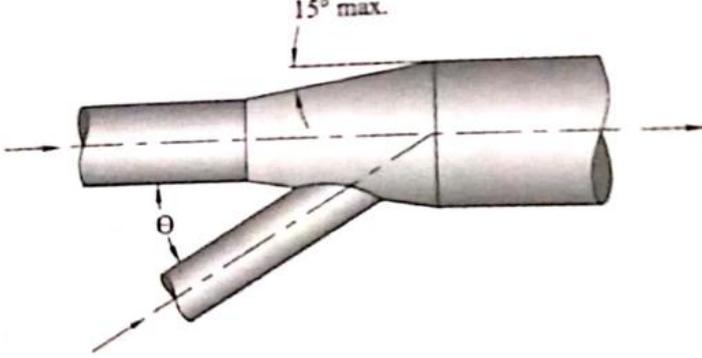
$$\Delta P = K \cdot h_v \quad \rightarrow \quad h_v = \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.8)$$

Onde:

- ΔP corresponde à perda de carga localizada (m);
- K corresponde ao fator de perda de carga;
- h_v corresponde à pressão dinâmica (Pa);
- ρ corresponde a massa específica do fluido (Kg/m³);
- v corresponde a velocidade do ar (m/s).

A Figura 3.7 exhibe exemplos de peças especiais empregadas em dutos e os respectivos fatores de perda de carga.

	α	Circular	Retangular
	90	0,85	1,25
	60	0,65	0,95
	45	0,44	0,63
	30	0,22	0,30

	θ	Fator de Perda de Carga
	10	0,06
	15	0,09
	20	0,12
	25	0,15
	30	0,18
	35	0,21
	40	0,25
	45	0,28
	50	0,32
60	0,44	
90	1,00	

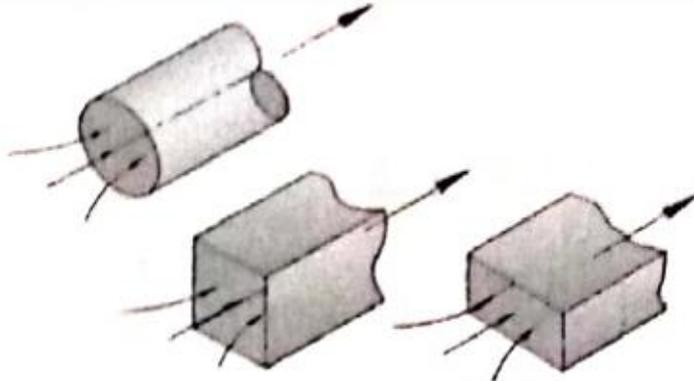
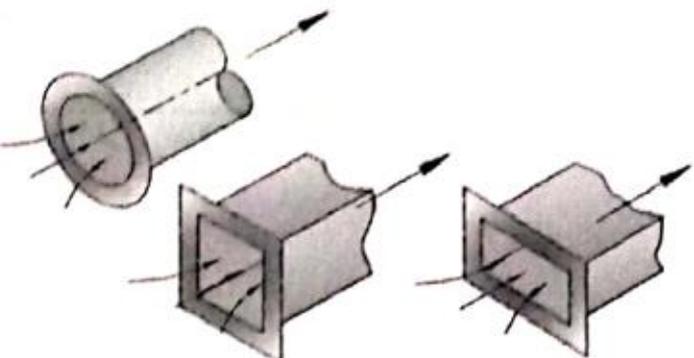
Peças	Fator de Perda de Carga
	0,93
	0,60

Figura 3.7 – Exemplo de peças especiais e respectivos fatores de perda de carga (K).

3.3.4. Equipamentos de Controle

Equipamentos de controle da poluição do ar são equipamentos destinados a remoção de contaminantes do ar ou de um fluxo de gás. O grau de remoção necessário, a quantidade e as características do contaminante a ser removido e as condições do fluxo de ar ou gás terão uma influência no dispositivo selecionado para qualquer aplicação (ACGIH, 1998).

Para a escolha do equipamento deve-se levar em conta o tipo de particulado e de gás, e também os custos e eficiência de cada coletor para o dado problema. Além disso, devem ser analisados os benefícios propiciados, muitas vezes exigidos pela lei (FURIERI; CASTILHO, 2009).

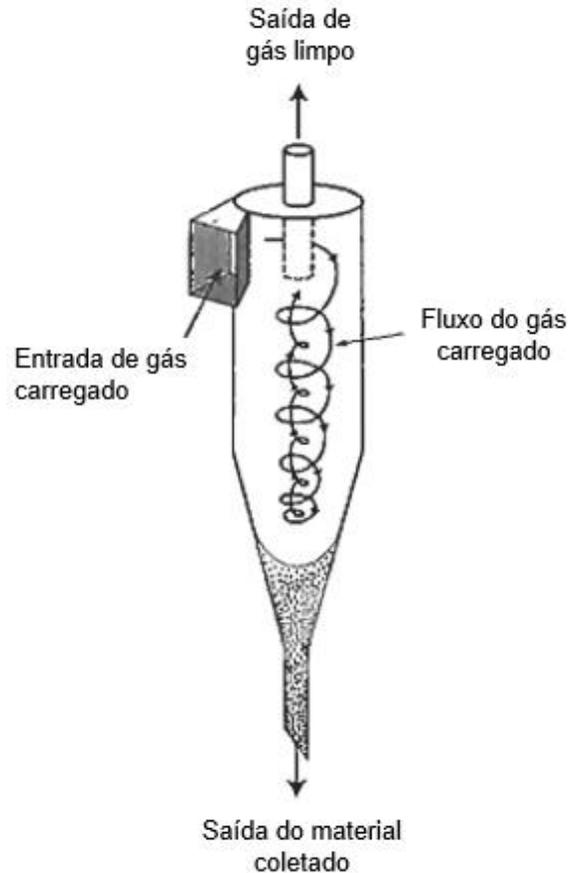
Nas próximas seções serão abordados a utilização e os detalhes de dois equipamentos de controle da poluição do ar: ciclones e filtros de manga.

3.3.4.1. Ciclones

Ciclones estão entre os equipamentos de controle mais amplamente utilizados na indústria. As principais razões para o uso generalizado de ciclones se devem ao seu baixo custo, ausência de peças móveis e podem ser construídos para resistir a condições operacionais adversas (DAVID COOPER; ALLEY, 2002).

Os ciclones por si só podem não ser suficientes para atender às rígidas regulamentações de poluição do ar, no entanto, eles servem um propósito importante na indústria, podendo ser empregado em conjunto com outras soluções de engenharia no controle da poluição atmosférica.

Em um ciclone, o fluxo gasoso é forçado a atravessar uma espiral de forma que, devido a inércia, as partículas se chocam contra as suas paredes. As partículas que colidiram caem até a base onde são coletadas enquanto o ar limpo pode escapar pela saída superior. A Figura 3.8 ilustra o funcionamento de um ciclone.



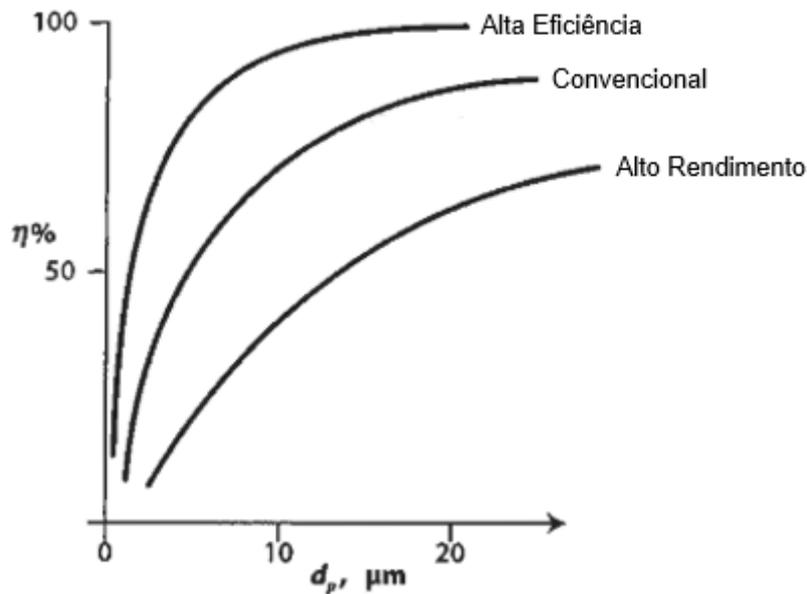
Fonte: COOPER E ALLEY, 2002

Figura 3.8 – Funcionamento de um Ciclone.

Entre as vantagens dos Ciclone estão o baixo custo de investimento, a capacidade de operação em altas temperaturas, a manutenção de baixo custo, necessidade de pequeno espaço para instalação, etc.

Algumas das desvantagens do uso de ciclones incluem menor eficiência de controle e maior perda de carga, no entanto, seu baixo custo e sua operação quase livre de manutenção os tornam ideais para uso como pré-limpadores para dispositivos de controle final mais caros, como filtros de manga (DAVID COOPER; ALLEY, 2002). O uso de ciclones como pré-limpadores resulta em economia dos recursos empregados no controle da poluição, visto que a manutenção neste equipamento é de baixo custo.

A eficiência de remoção de material particulado pelos ciclones varia muito de acordo com o seu design e com o diâmetro das partículas. A Figura 3.9 relaciona o tamanho das partículas (μm) com a eficiência de coleta (%).



Fonte: COOPER E ALLEY, 2002

Figura 3.9 – Relação eficiência de coleta por tamanho de partícula.

A Tabela 3.16 resume as dimensões clássicas dos três tipos de designs de ciclones: alta eficiência, convencional e alto rendimento. A Figura 3.10 ilustra as várias dimensões de um ciclone.

Tabela 3.16 – Dimensões clássicas de um ciclone.

	Alta Eficiência		Convencional		Alto Rendimento	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
D/D	1	1	1	1	1	1
H/D	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
W/D	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
De/D	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
Dc/D	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
Lb/D	1.5	1.4	2.0	1.75	1.5	1.7
Lc/D	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0
Dd/D	0.375	0.4	0.25	0.4	0.375	0.4

Fonte: COOPER E ALLEY, 2002

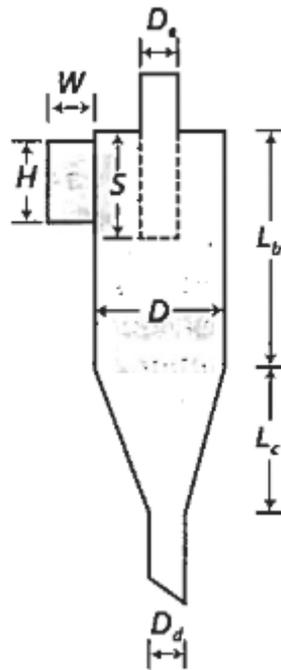


Figura 3.10 – Dimensões clássicas de um ciclone.

Um modelo de número efetivo de revoluções (N_e) pode ser usado para determinar os efeitos do projeto e da operação do ciclone na eficiência da coleta. O número efetivo de revoluções pode ser calculado conforme a seguinte equação:

$$N_e = \frac{1}{H} \cdot \left(L_b + \frac{L_c}{2} \right) \quad (3.9)$$

Onde:

- N_e corresponde ao número efetivo de revoluções;
- H corresponde à altura do duto de entrada (m);
- L_b corresponde ao comprimento do corpo do ciclone (m);
- L_c corresponde ao comprimento do cone do ciclone (m).

Para serem coletadas, as partículas devem ser chocar contra a parede dentro da quantidade de tempo que o gás viaja no vórtice externo. O tempo de residência do gás pode ser calculado conforme:

$$\Delta t = 2\pi \cdot R \cdot \frac{N_e}{V_i} \quad (3.10)$$

Onde:

- Δt corresponde ao tempo de residência do gás (s);
- R corresponde ao raio do corpo do ciclone (m);
- V_i corresponde à velocidade de entrada do gás (m/s).

A distância radial máxima trafegada por qualquer partícula corresponde a largura do duto de entrada (W). Sabendo-se que a força centrífuga acelera a partícula até sua velocidade terminal, quando a força de arraste se iguala a força centrífuga, a velocidade terminal que permite que as partículas sejam coletadas no tempo de residência do gás é:

$$V_t = \frac{W}{\Delta t} \quad (3.11)$$

Onde:

- Δt corresponde ao tempo de residência do gás (s);
- W corresponde à largura do duto de entrada (m);
- V_t corresponde à velocidade terminal da partícula (m/s).

A velocidade terminal é uma função do tamanho da partícula (DAVID COOPER; ALLEY, 2002). Assumindo-se regime de escoamento de Stokes e partículas esféricas, a velocidade terminal da partícula em função de seu tamanho pode ser calculada:

$$V_t = \frac{d_p^2 \cdot (p_p - p_g) \cdot V_i^2}{18 \cdot \mu \cdot R} \quad (3.12)$$

Onde:

- d_p corresponde ao diâmetro da partícula (μm);
- p_p corresponde à massa específica da partícula (kg/m^3);
- p_g corresponde à massa específica do gás (kg/m^3);
- R corresponde ao raio do corpo do ciclone (m);
- μ corresponde à viscosidade do gás ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$);
- V_t corresponde à velocidade terminal da partícula (m/s);
- V_i corresponde à velocidade de entrada do gás (m/s).

Para se calcular o diâmetro das partículas coletadas com 50% de eficiência pode se utilizar a relação semi-empírica desenvolvida por Lapple (1951):

$$d_{pc} = \left(\frac{9 \cdot \mu \cdot W}{2\pi \cdot N_e \cdot V_i \cdot (p_p - p_g)} \right)^{1/2} \quad (3.13)$$

Onde:

- d_{pc} corresponde ao diâmetro da partícula coletada com 50% de eficiência (μm);
- p_p corresponde à massa específica da partícula (kg/m^3);
- p_g corresponde à massa específica do gás (kg/m^3);
- W corresponde à largura do duto de entrada (m);
- N_e corresponde ao número efetivo de revoluções;
- μ corresponde à viscosidade do gás ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$);
- V_i corresponde à velocidade de entrada do gás (m/s).

Supondo-se que a distribuição do tamanho das partículas é conhecida, a eficiência geral de um ciclone pode ser prevista conforme a Figura 3.11. Por outro lado, a eficiência da coleta de partículas de qualquer tamanho pode ser calculada conforme as equações a seguir:

$$n_j = \frac{1}{1 + (d_{pc}/d_{pj})^2} \quad (3.14)$$

$$n_o = \sum n_j m_j \quad (3.15)$$

Onde:

- d_{pc} corresponde ao diâmetro da partícula coletada com 50% de eficiência (μm);
- d_{pj} corresponde ao diâmetro característico da faixa de diâmetro “j” (μm);
- n_j corresponde à eficiência de coleta para o tamanho de diâmetro “j” (%);
- n_o corresponde à eficiência total do ciclone (%);
- m_j corresponde a fração de massa de partículas com diâmetro “j”;

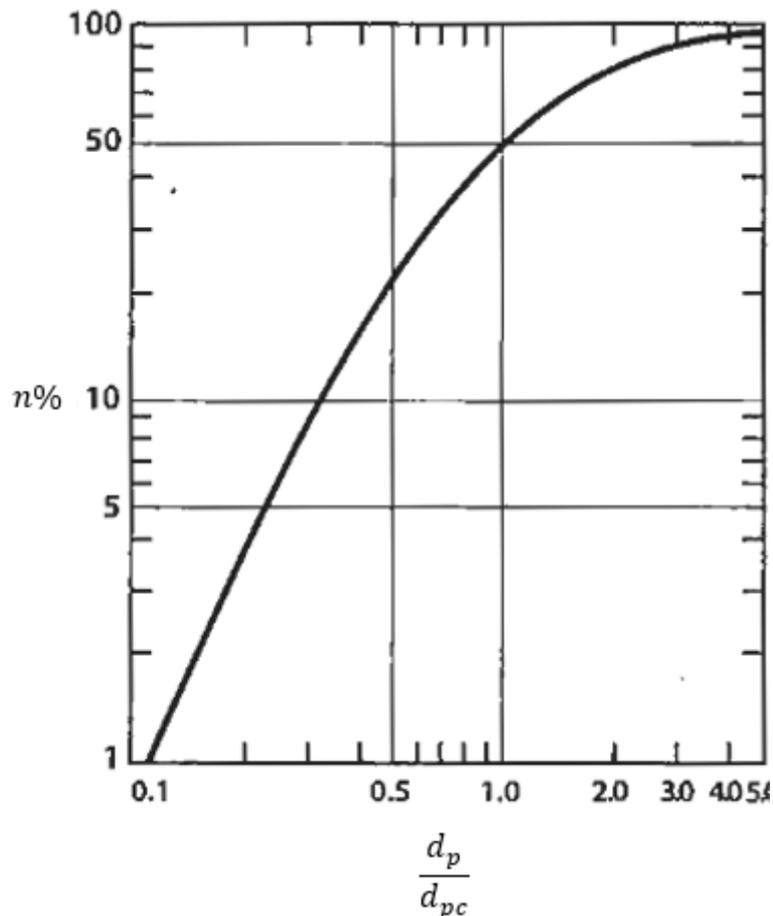


Figura 3.11 – Distribuição do tamanho das partículas.

Os efeitos das mudanças nas condições de operação, como na vazão ou viscosidade do gás, na diferença de densidade ou na carga de poeira, causam mudanças na fração de particulado coletada. A fração não coletada pelo equipamento ou fração penetrante é calculada conforme a seguinte equação:

$$P_t = 1 - n_o \quad (3.16)$$

Onde:

- n_o corresponde à eficiência total do ciclone (%);
- P_t corresponde à fração penetrante.

Geralmente, maiores eficiências são obtidas ao se forçar a passagem do gás a altas velocidades, devido à influência sobre a força centrífuga (FURIERI; CASTILHO, 2009). Forçar a passagem do gás em alta velocidade resulta em um

aumento da perda de carga, que por consequência, exige maior trabalho do ventilador do sistema.

Embora existam vários modelos de queda de pressão, a abordagem de Shephard e Lapple é a mais simples de usar e sua precisão é comparável à dos outros métodos (DAVID COOPER; ALLEY, 2002). A equação de Shephard e Lapple é:

$$H_v = K \frac{H \cdot W}{D_e^2} \quad (3.17)$$

Onde:

- H_v corresponde à queda de pressão expressa em termos da velocidade de entrada;
- W corresponde à largura do duto de entrada (m);
- H corresponde à altura do duto de entrada (m);
- D_e corresponde ao diâmetro de saída do ciclone (m);
- K corresponde a uma constante que depende da configuração do ciclone das condições de operação.

A partir da queda de pressão calculada através da equação de Shephard e Lapple, pode se calcular a perda de carga conforme:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot p_g \cdot V_i^2 \cdot H_v \quad (3.18)$$

Onde:

- p_g corresponde à massa específica do gás (kg/m^3);
- ΔP corresponde à perda de carga (N/m^2);
- V_i corresponde à velocidade de entrada do gás (m/s).

Teoricamente K pode variar consideravelmente, no entanto, quando se trabalha com ciclones padrões os valores de K estão usualmente entre 12 e 18.

Conhecendo-se a perda de carga do ciclone, pode-se determinar a potência requerida através da seguinte equação:

$$w_f = Q \cdot \Delta P \quad (3.19)$$

Onde:

- w_f corresponde à potência requerida (W);
- ΔP corresponde à perda de carga (N/m²);
- Q corresponde à vazão (m³/s).

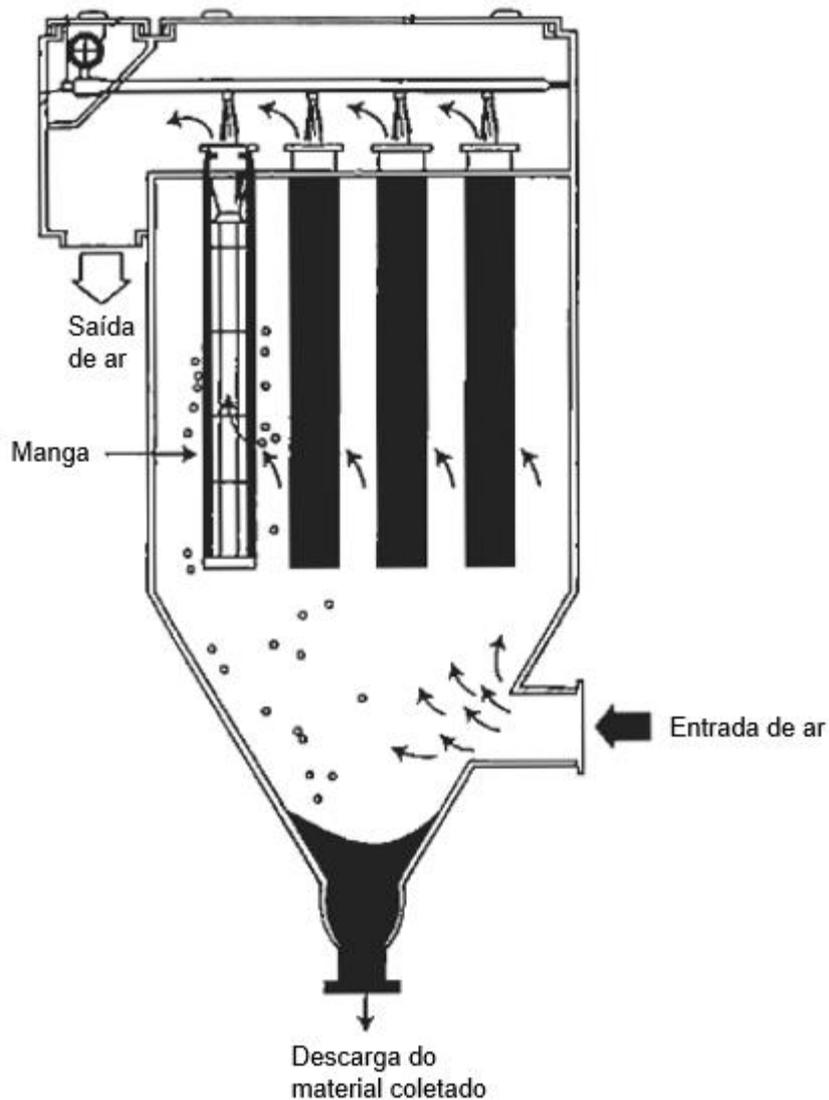
3.3.4.2. Filtro de mangas

A filtração por filtro de mangas é um método bem conhecido e aceito para separar partículas secas de um fluxo de gás. Em um filtro de mangas, o gás empoeirado flui para dentro e através de várias bolsas filtrantes colocadas em paralelo, deixando a poeira retida pelo tecido (DAVID COOPER; ALLEY, 2002).

O próprio tecido retém partículas, no entanto, a maior importância do tecido está no seu papel de meio de suporte para a camada de poeira que se acumula sobre ele. Essa camada de poeira é responsável pela filtração altamente eficiente de pequenas partículas (DAVID COOPER; ALLEY, 2002).

A operação de um filtro de mangas requer que a camada de poeira na superfície do tecido seja limpa periodicamente, caso contrário, podem ocorrer interrupções no funcionamento ou prejuízos no sistema. Os três tipos mais comuns de filtro de mangas são: filtros de ar reverso, jato pulsante e por sacudimento mecânico (FURIERI; CASTILHO, 2009).

Existem diversas configurações possíveis para um filtro de mangas, diferentes tipos de tecidos e diferentes sentidos de fluxo de ar. A Figura 3.12 exibe um exemplo de filtro de mangas.



Fonte: COOPER E ALLEY, 2002

Figura 3.12 – Configuração básica de um filtro de mangas.

Nos casos onde são usados filtros de ar reverso ou por sacudimento mecânico, um dos compartimentos é isolado para receber a limpeza enquanto os outros compartimentos continuam a receber a vazão a ser tratada.

Em um sistema de ar reverso, ar limpo é soprado pelas mangas isoladas na direção oposta ao fluxo normal de forma a desalojar a camada de partículas que aderiu à superfície do tecido. Nos filtros por agitação, as mangas são sacudidas mecanicamente de forma a desalojar a camada de partículas.

No método de jato pulsante, o ar é filtrado através das mangas de fora para dentro. As mangas contêm uma estrutura cilíndrica que impedem a sua

deformação. As mangas são fechadas na base e presas na saída de ar limpo no topo, dessa forma, curtos assopros de ar de 30 a 100 m/s e com pressão de 90 a 100 psi são direcionadas através de um tubo Venturi, causando uma onda de choque capaz de deslocar a camada de partículas agregada.

Uma grande vantagem do método de jato pulsante é que este permite a limpeza de algumas mangas enquanto o ar carregado continua a fluir através das mangas, além disso, não há compartimentos e mangas extras, o que reduz o tamanho e o custo do filtro de mangas.

A eficiência de coleta de cada manga é prejudicada imediatamente após a limpeza dos tecidos, isso ocorre, pois, grande parte do material particulado agregado ao tecido é removida pelos processos de limpeza. No entanto, com o passar do fluxo de poeira carregado, rapidamente o material particulado se acumula nos tecidos, favorecendo o aumento da eficiência de filtração das mangas.

Entre as vantagens do uso do filtro de mangas estão:

- Alta eficiência de coleta mesmo para partículas muito pequenas;
- Podem operar sobre uma variedade de tipos de material particulado;
- Podem ser projetados em módulos, facilitando a montagem;
- Podem operar sobre uma variedade de taxas de vazões;
- Requer quedas de pressão razoavelmente baixas, causando baixa perda de carga;

Entre as desvantagens estão:

- A instalação requer um grande espaço;
- Os tecidos podem ser danificados por alta temperatura ou químicos corrosivos;
- Não podem operar em ambientes úmidos;
- Potencial de fogo ou explosão;
- Não é adequado para cargas de poeira muito altas.

A camada de particulado é um filtro muito eficiente, porém, como pode ser esperado, provoca o aumento na resistência ao fluido (DAVID COOPER; ALLEY,

2002). A perda de carga em um filtro de manga devido a uma taxa de fluido pode ser calculada conforme:

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_p + \Delta P_s \quad (3.20)$$

Onde:

- ΔP corresponde à perda de carga total (N/m²);
- ΔP_f corresponde à perda de carga causada pelo tecido (N/m²);
- ΔP_p corresponde à perda de carga causada pelo agregado de material particulado (N/m²);
- ΔP_s corresponde à perda de carga causada pela estrutura do compartimento de filtros (N/m²).

A perda de carga causada pela estrutura do filtro de mangas é baixa e será desconsiderada. As perdas de cargas causadas em decorrência do tecido e do agregado de material particulado estão relacionadas com a velocidade de filtração, com a viscosidade do fluido, da permeabilidade e da espessura do filtro e do agregado de particulado.

Visto que a eficiência de coleta de um filtro de manga não é uma grande preocupação, o dimensionamento desse equipamento está direcionado a velocidade de filtração e aos custos de instalação.

A velocidade de filtração, ou razão ar/pano, pode ser calculada conforme:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (3.21)$$

Onde:

- V corresponde à velocidade de filtração (m/min);
- Q corresponde ao fluxo volumétrico (m³/min);
- A corresponde à área do tecido (m²).

Durante a operação do filtro, a espessura da camada de particulado aumenta de acordo com a velocidade de filtração e da massa de poeira que atravessa o filtro, impactando na eficiência de coleta e na rotina de limpeza.

Conhecendo-se a velocidade de filtração e a vazão de projeto, pode-se determinar a área total dos tecidos das mangas. Dessa forma, basta conhecer as medidas da manga a ser utilizado conforme disponibilidade do mercado, podendo-se calcular o número total de mangas necessárias conforme:

$$N = \frac{\hat{A}rea_t}{\hat{A}rea_{manga}} \quad (3.22)$$

Onde:

- N corresponde ao número de mangas no filtro;
- $\hat{A}rea_t$ corresponde à área total dos tecidos filtrantes (m²);
- $\hat{A}rea_{manga}$ corresponde à área de uma manga (m²).

Uso de ar comprimido é um dos principais custos de operação de um filtro de mangas do tipo jato pulsante. A vazão de ar comprimido é, geralmente, entre 0,2% e 0,8% da vazão de ar filtrado quando ambos estão corrigidos para a mesma temperatura e pressão. O custo do trabalho de compressão pode ser igualado ao do trabalho do ventilador e pode ser calculado da seguinte forma:

$$w = \frac{1}{n} \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot P_1 \cdot Q_1 \cdot \left[\frac{P_2}{P_1}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (3.23)$$

Onde:

- w corresponde a potência do compressor (kW);
- n corresponde a eficiência do compressor (%);
- γ corresponde a razão entre as capacidades caloríficas do gás comprimido (= 1,4 para o ar);
- P_1 e P_2 correspondem as pressões inicial e final (kPa);
- Q_1 corresponde a vazão do compressor (m³/s).

A queda de pressão através de um filtro de mangas está empiricamente relacionada à velocidade de filtração, pressão de pulso e densidade de poeira depositada durante um ciclo de filtração (Leith and First 1977). Um modelo

desenvolvido para coleta de cinzas em mangas de poliéster é representado pela seguinte equação:

$$\Delta P = 2,72 \Delta W^{0,45} \cdot P^{-1,38} \cdot V^{2,34} \quad (3.24)$$

Onde:

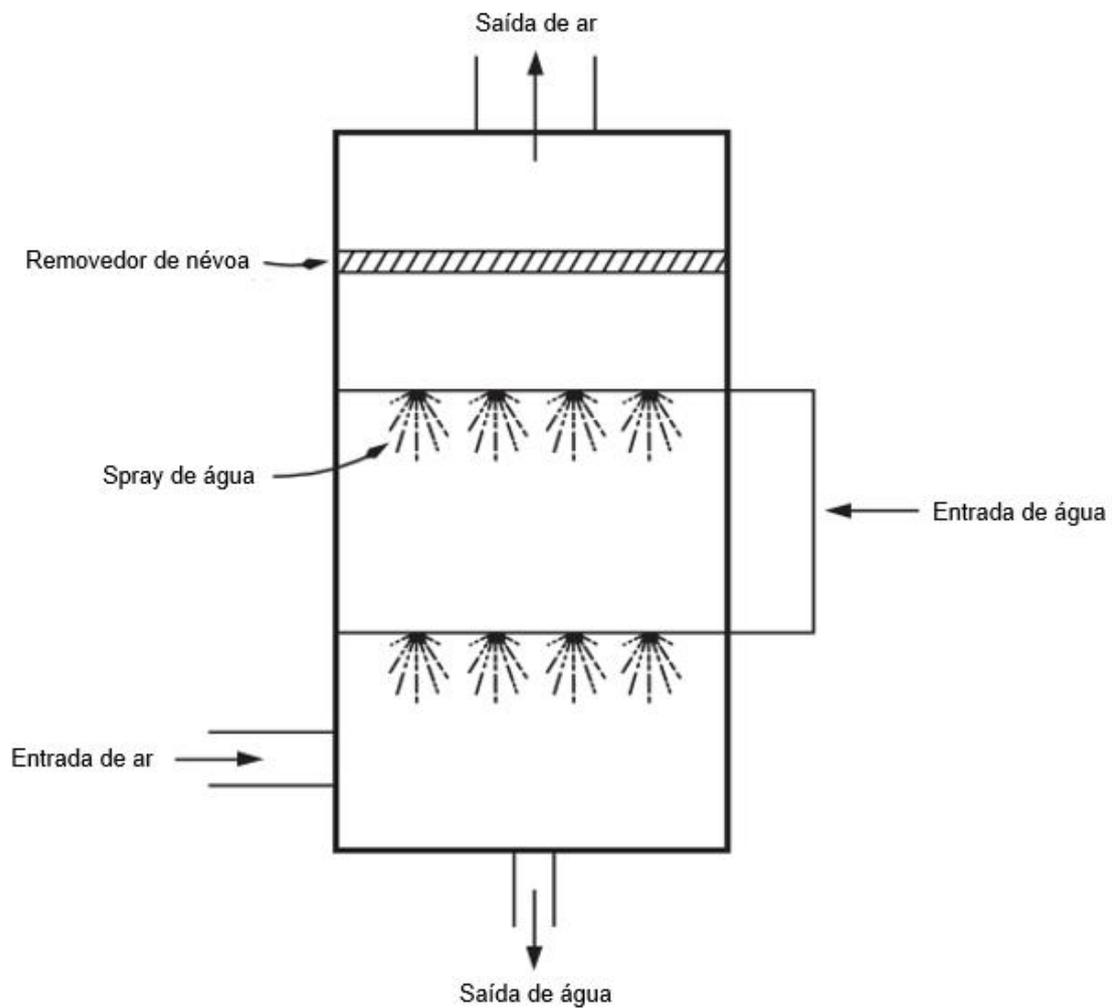
- ΔP corresponde à perda de carga através do tecido e da camada de poeira agregada (cm H₂O);
- ΔW corresponde à densidade superficial de poeira agregada entre duas limpezas consecutivas (mg/cm²);
- P corresponde à pressão do pulso (atm);
- V corresponde à velocidade de filtragem (cm/s).

3.3.4.3. Lavador de gases do tipo torre de spray

O lavador de gás é um dispositivo empregado no controle da poluição atmosférica, na recuperação de materiais, no resfriamento e na adição de líquido ou vapor nas correntes gasosas (FERREIRA, 2018).

Tem o seu princípio de funcionamento baseado na coleta de partículas sólidas presentes em um fluxo de gás através do contato direto com um líquido atomizado, geralmente a água (FERREIRA, 2018).

O tipo mais simples de lavador de gases é a torre de spray. Em uma torre de spray, o ar carregado de partículas passa para uma câmara onde entra em contato com um spray líquido produzido por bicos de pulverização. As torres podem ser construídas para o fluxo de gases de forma vertical ou horizontal (US EPA, 2002). A Figura 3.13 exibe um exemplo de lavador de gases do tipo torre de spray.



Adaptado de: USEPA, 2002

Figura 3.13 – Configuração básica de um lavador de gases do tipo torre de spray.

Entre as vantagens do uso de um lavador de gases do tipo torre de spray estão:

- A coleta de material particulado e absorção de gases pode ser realizada simultaneamente;
- Altas eficiências de coleta podem ser obtidas, desde que seja aplicada a energia necessária;
- Efluentes gasosos em altas temperaturas podem ser tratados sem problemas;
- Poeiras e gases inflamáveis ou corrosivos podem ser coletadas e neutralizados, evitando maiores riscos de explosão;
- Pequeno tamanho e custo relativamente baixo.

Entre as desvantagens estão:

- Requer grande quantidade de energia para a coleta de partículas de pequeno tamanho;
- O equipamento está sujeito a problemas de corrosão e abrasão decorrentes do material tratado;
- Vaporização excessiva do líquido ao tratar gases quentes;
- Gera resíduos líquidos;
- Consumo de água;
- Partículas de pequenas dimensões são coletadas com baixa eficiência, assim como partículas não molháveis.

O projeto de um lavador de gases do tipo torre de spray requer uma variedade de informações de difícil acesso, a Tabela 3.17 apresenta uma série de recomendações.

Tabela 3.17 – Recomendações para projeto de lavadores do tipo torre de spray.

Parâmetro	Recomendações
Velocidade do gás ($V_{gás}$)	$V_{gás}$ deve estar entre 0,60 e 1,00 m/s. Deve ser menor que a velocidade terminal da gota.
Razão líquido/gás ($R_{L/G}$)	Deve estar entre 0,001 a 0,003 m ³ água/m ³ gás. Quanto menor, mais econômico e menor a eficiência de coleta.
Altura útil do lavador (H_L)	A altura útil do lavador não deve ultrapassar 7,00 metros, para evitar problemas de montagem e manutenção. No entanto, quanto maior a altura, maior a eficiência de coleta.
Diâmetro da gota (D_{gota})	O diâmetro da gota deve ser estipulado pelo projeto com base no líquido utilizado.
Densidade da gota (ρ_p)	A densidade da gota pode ser adotada como a mesma densidade do líquido utilizado.

Conhecendo-se a vazão de entrada e a velocidade do gás, pode-se calcular o diâmetro do lavador de tal forma:

$$D_L = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V_{gás}}} \quad (3.25)$$

Onde:

- D_L corresponde ao diâmetro do lavador (m);
- $V_{gás}$ corresponde à velocidade do gás (m/s);
- Q corresponde ao fluxo volumétrico (m³/s).

A área da seção transversal do lavador é calculada através de:

$$A = \frac{\pi \cdot D_L^2}{4} \quad (3.26)$$

Onde:

- D_L corresponde ao diâmetro do lavador (m);
- A corresponde à área da seção transversal (m²).

A vazão de líquido de lavagem requerida pelo lavador pode ser calculada da seguinte forma:

$$Q_L = R_{L/Q} \cdot Q \quad (3.27)$$

Onde:

- Q_L corresponde a vazão de líquido de lavagem requerida (m³/s);
- $R_{L/Q}$ corresponde a razão líquido/gás (m³água/m³gás);
- Q corresponde ao fluxo volumétrico (m³/s).

Conhecendo-se as características físicas do gás e do líquido utilizado para lavagem, deve-se calcular a velocidade terminal da gota, conforme:

$$V_{t,gota} = \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{(p_{gota} - p_{gás})}{\rho_{gás} \cdot C_D} \cdot g \cdot D_{gota} \right)^{0,5} \quad (3.28)$$

Onde:

- $V_{t,gota}$ corresponde à velocidade terminal das gotas do líquido (m/s);
- ρ_{gota} corresponde à densidade da gota (Kg/m³);
- $\rho_{gás}$ corresponde à densidade do gás (Kg/m³);
- g corresponde à aceleração da gravidade (m/s²);
- C_D corresponde à constante calculada com base no número de Arquimedes, adotado como 0,95;
- D_{gota} corresponde ao diâmetro da gota (m).

Supondo-se que a distribuição do tamanho das partículas é conhecida, a eficiência da coleta de partículas de qualquer tamanho pode ser calculada conforme as equações a seguir:

$$n_i = 1 - \exp\left(\frac{-3}{2} \cdot 0,2 \cdot R_{L/G} \cdot \frac{V_{t,gota} \cdot H_L \cdot n_i^*}{D_{gota} \cdot (V_{t,gota} - V_{gás})}\right) \quad (3.29)$$

$$n_i^* = \left(\frac{K_{pi}}{K_{pi} + 0,7}\right)^2 \quad (3.30)$$

$$K_{pi} = \frac{\rho_p \cdot d_{pi}^2 \cdot V_{gás}}{9 \cdot \mu_{gás} \cdot D_{gota}} \quad (3.31)$$

Onde:

- n_i corresponde a eficiência de coleta para um diâmetro "i" (%);
- n_i^* corresponde a eficiência de coleta para uma única gota (%);
- $R_{L/Q}$ corresponde a razão líquido/gás (m³água/m³gás);
- K_{pi} corresponde ao parâmetro de impactação para cada tamanho de partícula;
- d_{pi} corresponde ao diâmetro de partícula (m);
- H_L corresponde a altura útil do lavador (m);
- $V_{gás}$ corresponde à velocidade do gás (m/s);
- $\mu_{gás}$ corresponde à viscosidade do gás (Pa.s);
- $V_{t,gota}$ corresponde à velocidade terminal das gotas do líquido (m/s);
- ρ_p corresponde a densidade da partícula (Kg/m³);

- D_{gota} corresponde ao diâmetro das gotas do líquido (m).

A perda de carga pode ser calculada através da seguinte equação:

$$\Delta P = \frac{Q \cdot \rho_{gota} \cdot g \cdot H_L}{(V_{t,gota} - V_{gás}) \cdot A} \quad (3.32)$$

Onde:

- ΔP corresponde à perda de carga (N/m²);
- H_L corresponde à altura útil do lavador (m);
- Q corresponde ao fluxo volumétrico (m³/s);
- ρ_p corresponde a densidade da partícula (Kg/m³);
- $V_{t,gota}$ corresponde à velocidade terminal das gotas do líquido (m/s);
- $V_{gás}$ corresponde à velocidade do gás (m/s);
- g corresponde à aceleração da gravidade (m/s²);
- A corresponde à área da seção transversal (m²).

3.3.5. Ventiladores

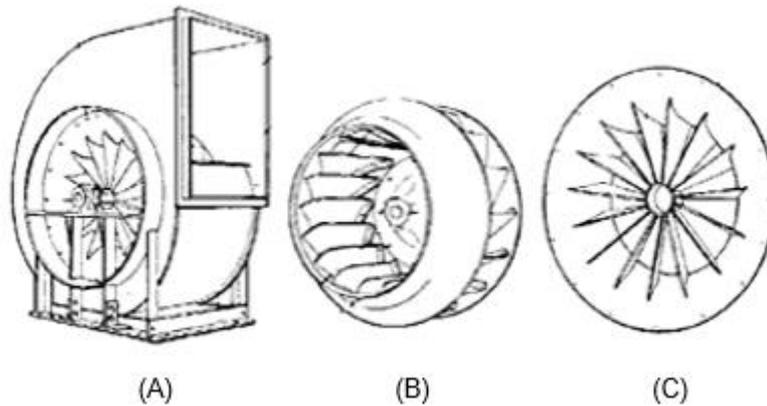
Para mover o ar em um sistema de ventilação ou sistema de exaustão, é necessária energia para superar as perdas deste sistema (ACGIH, 1998).

Os ventiladores fornecem a energia necessária para mover o ar através de captosres, dutos e equipamentos de controle. Os ventiladores movem o ar e fornecem ganho de pressão total para superar as perdas de pressão criadas quando o ar flui através dos dutos e dispositivos de controle (DAVID COOPER; ALLEY, 2002).

Os tipos existentes de ventiladores podem ser divididos em três categorias construtivas básicas:

- Axiais;
- Helicoidais;
- Centrífugos.

Segundo Macintyre (1990), os ventiladores centrífugos de pás são considerados os mais interessantes para sistemas de ventilação local exaustora. A Figura 3.14 ilustra as principais peças de um ventilador centrífugo.



Fonte: (PASQUALI, 2018)

Figura 3.14 – Carcaça (A), rotor (B) e bocal (C) de um ventilador centrífugo

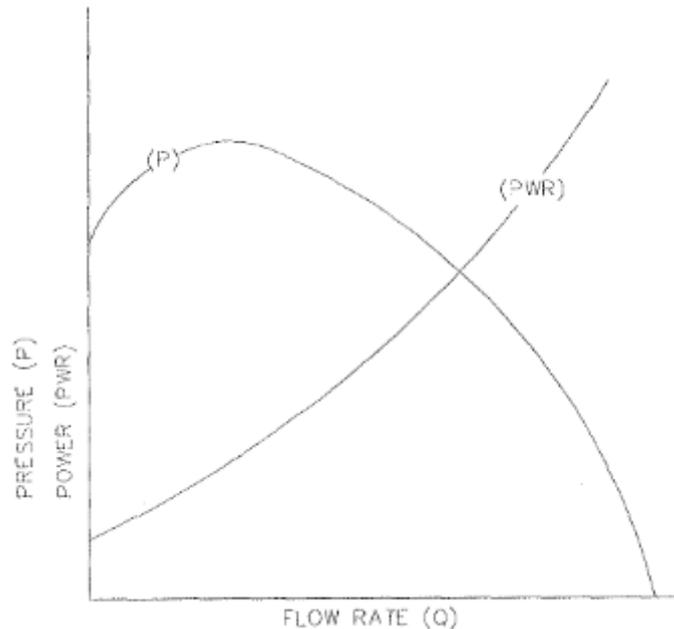
Existem três tipos básicos de ventiladores centrífugos: Curvado para frente, radiais e inclinado ou curvado para trás.

O tipo curvado para frente ocupa pouco espaço, operam sobre baixas velocidades e são silenciosos e geralmente são empregados em projetos sobre baixa ou moderada pressão estática de condicionamento térmico ou reposição de ar, não sendo recomendado quando há presença de poeira ou partículas que possam aderir as lâminas (ACGIH, 1998).

O tipo radial possui lâminas formatadas para resistir ao acúmulo de material e, portanto, é utilizado para a maioria das aplicações de sistemas de exaustão onde partículas atravessam o ventilador (ACGIH, 1998).

O tipo curvado ou inclinado para trás fornece alta eficiência do ventilador e ruídos relativamente baixos quando não opera em sobrecarga. A potência máxima ocorre perto do ponto de operação ideal, portanto, qualquer variação a partir desse ponto devido a uma mudança na resistência do sistema resultará em uma redução na potência operacional (ACGIH, 1998).

O ponto de operação ideal é representado pelo ponto na interseção entre a curva de performance do ventilador e a curva de pressão e vazão exigida pelo sistema, um exemplo pode ser observado na Figura 3.15.



Fonte: (ACGIH, 1998)

Figura 3.15 – Exemplo de ponto de operação ideal para um determinado ventilador e sistema.

O ponto de operação ideal representa o valor de vazão e de pressão estática requerida pelo sistema para o qual o ventilador tem o melhor desempenho, ou seja, onde o rendimento total do ventilador é maior.

A função do ventilador será de prover energia ao sistema, dessa forma, é necessário determinar o trabalho efetuado ou energia cedida por unidade de tempo, ou seja, a potência do ventilador.

Para se determinar a potência útil do ventilador utiliza-se o conceito de altura útil de elevação que é a energia total ganha pelo fluido em sua passagem pelo ventilador (FURIERI; CASTILHO, 2009). A altura útil de elevação representa a energia total ganha pelo fluido em sua passagem pelo ventilador.

Segundo Macintyre (1990), a potência útil representa a potência ganha pelo fluido em sua passagem pelo ventilador e pode ser calculada pela seguinte equação.

$$N_u = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_u}{n} \quad (3.33)$$

- N_u corresponde à potência útil do ventilador (kW);
- γ corresponde ao peso específico do fluido (N/m³);
- Q corresponde a vazão (m³/s);
- H_u corresponde a altura útil de elevação do sistema (mH₂O);
- n corresponde ao rendimento do ventilador (%).

3.4. ESTIMATIVA DE CUSTOS E PLANEJAMENTO DE IMPLEMENTAÇÃO DAS MELHORIAS IDENTIFICADAS

A seleção de um projeto, entre uma gama de projetos possíveis, é realizada através da comparação entre suas viabilidades. Essa operação exige a operacionalização de regras para que o ordenamento do projeto seja feito de acordo com critérios que satisfaça as preferências dos vários agentes (LANG, 2007). Nesta seção, discutiremos a viabilidade econômica das opções para o projeto de despoeiramento.

Para a avaliação econômica de um projeto de engenharia, devem ser identificados conforme:

- Custos de implementação;
- Custos de operação e manutenção;
- Os benefícios decorrentes da sua execução.

Os custos de implementação de projeto estão relacionados aos custos iniciais de instalação do sistema, ou seja, aquisição de tubulações, ventiladores, equipamentos de controle bem como da obra em si, além de gastos como fiscalização da obra e consultoria.

Os custos de operação anuais incluem os custos com energia dos sistemas de ventiladores, bombas e outros sistemas elétricos ou mecânicos, os custos referentes a manutenção prevista para o sistema, e também custos com a mão de obra e insumos.

Os benefícios diretos estão constituídos pelos resultados imediatos do projeto enquanto os benefícios indiretos são proporcionados, de maneira não intencional, pelos resultados do projeto (GOMES, 2014).

O método de avaliação econômica abordado no desenvolver deste trabalho será o método do Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

O Custo Anual Uniforme Equivalente consiste em encontrar uma série anual uniforme que se equipare aos fluxos de caixa dos investimentos descontados a taxa mínima de atratividade (DUARTE, 2007). O melhor projeto é aquele que tiver o maior saldo positivo. O CAUE pode ser calculado conforme a seguinte equação:

$$V = P \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3.34)$$

Onde:

- V corresponde ao valor das parcelas;
- P corresponde ao custo de investimento do projeto;
- n corresponde ao número de parcelas;
- i corresponde ao valor de juros aplicado.

Os investimentos por parte da indústria em sistemas ou melhorias visam diminuir o impacto ambiental decorrente das atividades performadas. Os sistemas de despoejamento a serem analisados se encaixam nessa categoria de investimento por promoverem benefícios ambientais intangíveis.

Dessa forma, a análise econômica se restringe aos custos do projeto, enquanto que a justificativa para o investimento deve estar relacionada as exigências ambientais ou legislativas, obtenção de licença ambiental e obtenção de certificados e selos ambientais benéficos a imagem do empreendimento.

A escolha do projeto pode variar conforme o tempo de vida útil esperado para o projeto. Uma análise de viabilidade econômica que só leva em conta um horizonte de poucos anos confere maior peso aos custos de implementação de um projeto.

A Figura 3.16 apresenta um exemplo de análise de viabilidade econômica considerando os projetos P1 e P2, com valores de custos iniciais de R\$50.000,00

e R\$100.000,00 e custos operacionais de R\$2.200,00 e R\$900,00, respectivamente, com taxa de juros de 2% ao mês.

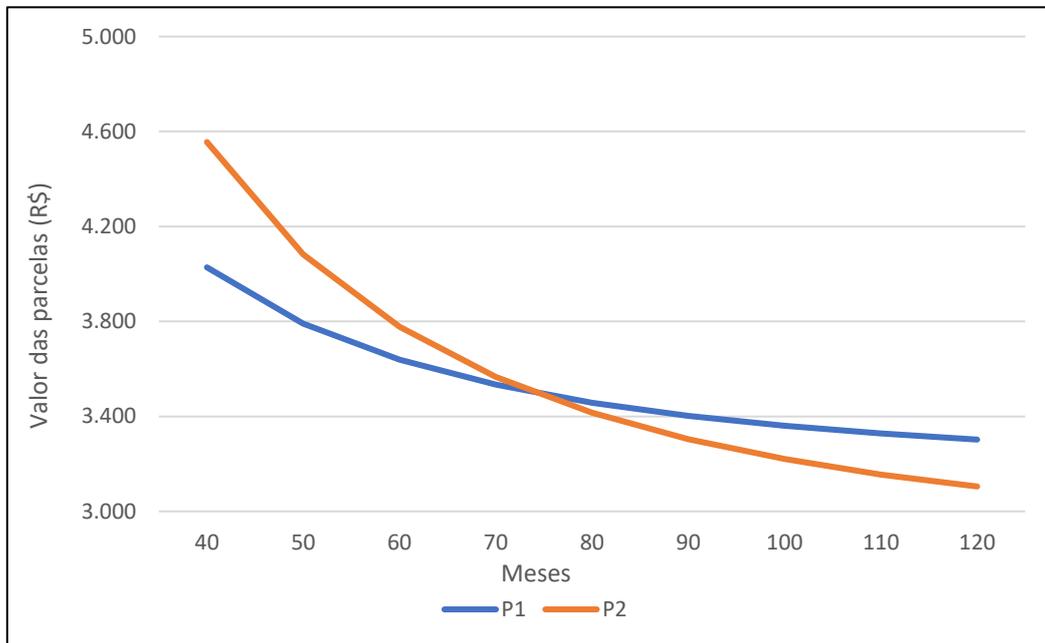


Figura 3.16 – Exemplo de análise de viabilidade econômica com base no método CAUE.

O exemplo abrange o período de 120 meses ou 10 anos. Se considerarmos o período de 5 anos, as parcelas mensais seriam de R\$3.638,00 para P1 e R\$3.777,00 para P2, no entanto, se considerarmos o período de 10 anos, as parcelas mensais seriam de R\$3.302,00 para P1 e R\$3.105,00 para P2, indicando P2 como a melhor alternativa.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Após a fundamentação teórica discutida ao longo do capítulo anterior, o presente capítulo tem a finalidade de detalhar a metodologia que será aplicada no desenvolvimento do trabalho bem como o estudo de caso objeto deste trabalho.

4.1. ESTUDO DE CASO

Esta seção tem como propósito a apresentação da unidade industrial escolhida para estudo, o funcionamento do processo produtivo posto em prática na fábrica e os dados obtidos através de contato com a empresa.

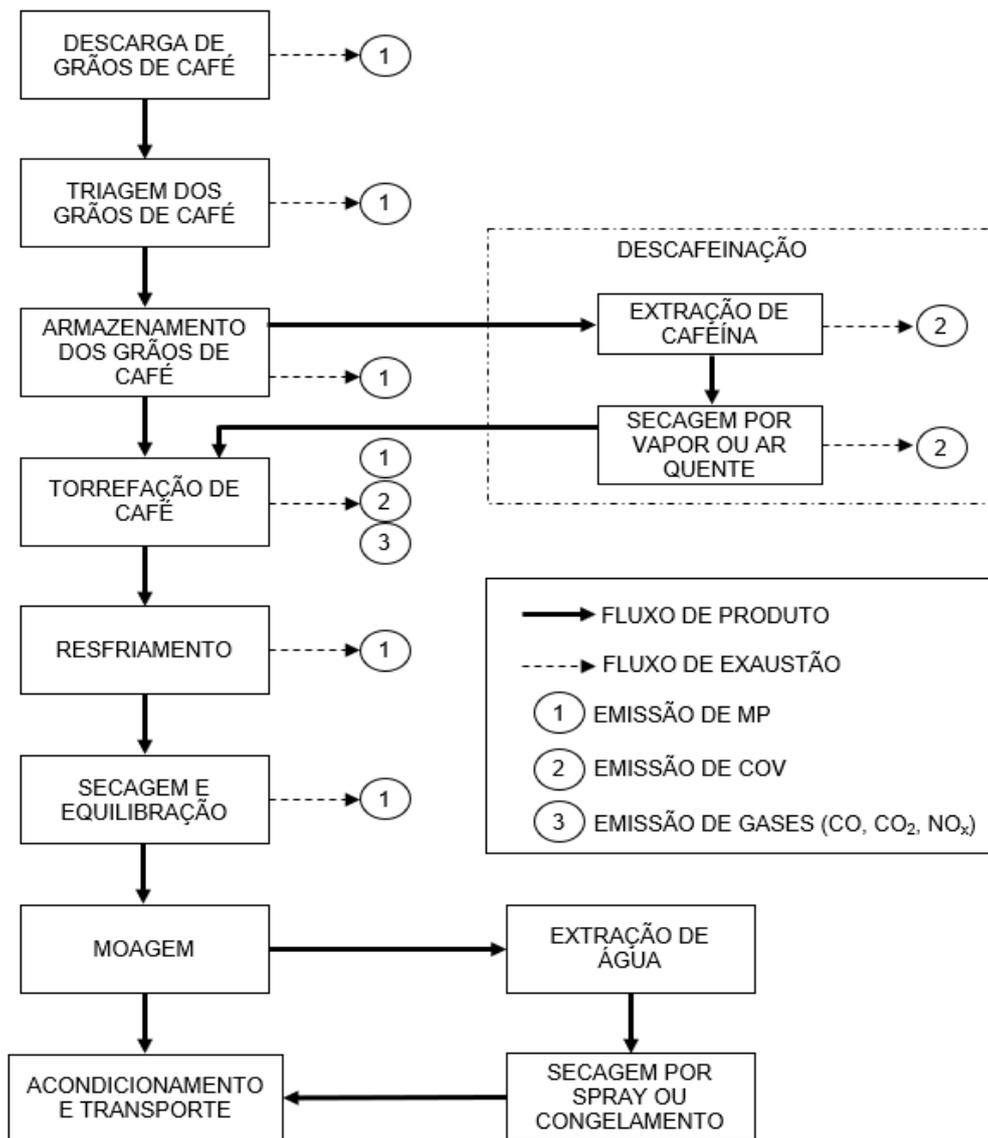
A unidade industrial escolhida para este trabalho foi a Realcafé, uma empresa produtora de café. Os principais poluentes emitidos durante o processamento do café são o material particulado (MP), compostos orgânicos voláteis (COV), óxidos de carbono (CO e CO₂), além de compostos de nitrogênio e enxofre.

Em alinhamento com o objetivo do trabalho, serão elaborados projetos básicos de sistema de ventilação industrial e controle de emissões atmosféricas em ambientes internos da captura ao lançamento à atmosfera, além de análise sucinta das medidas e equipamentos já empregados pela empresa.

4.1.1. Processo produtivo da indústria de torrefação de café

A indústria de torrefação de café envolve o processamento de grãos de café em café torrado, incluindo grãos inteiros ou moídos e café solúvel. O processo de torrefação do café consiste nas etapas de limpeza, torrefação, resfriamento, moagem e embalagem (US EPA, 1995).

O fluxograma exposto na Figura 4.1 a seguir ilustra o processamento de café típico (não obrigatório em quaisquer plantas) e suas principais emissões.



Adaptado de: AP 42 Capítulo 9.13.2 – Coffee Roasting, 1995

Figura 4.1 – Fluxograma típico do processamento de café.

No início do processo, os grãos de café são despejados em um funil e triados para remover detritos. Os grãos são então pesados e transferidos por meio de correias para armazenamento seguindo para a etapa de torrefação. A torrefação opera em uma temperatura entre 370 e 540 °C, podendo durar de poucos minutos a 30 minutos (US EPA, 1995).

A torrefação é a etapa mais importante de produção do café, sendo responsável por desenvolver o sabor. Após a etapa de torrefação, os grãos são resfriados por esguichos de água e então encaminhados para uma etapa de secagem e

equilíbrio, onde ocorre a remoção de resíduos que não foram removidos pela triagem inicial (US EPA, 1995).

Após a equilíbrio, os grãos torrados são moídos, geralmente por moedores de vários estágios. Alguns grãos torrados são embalados e enviados como grãos inteiros. Finalmente, o café moído é acondicionado e enviado como o produto final (US EPA, 1995).

4.1.2. Caracterização da unidade industrial escolhida

O processo produtivo da Realcafé abrange toda etapa de processamento do café, compreendendo as etapas de triagem, armazenamento, torrefação, resfriamento, moagem e seleção dos grãos até o empacotamento.

A Figura 4.2 apresenta a localização da unidade industrial da Realcafé (destacada de vermelho) através de imagem de satélite. Observa-se que a unidade industrial está localizada no meio do ambiente urbano e, portanto, as proximidades estão sujeitas a quaisquer impactos ambientais advindos da planta industrial.



Figura 4.2 – Localização da unidade industrial da Realcafé.

Constatou-se a presença de diversos empreendimentos nos arredores da unidade industrial, tais como: Restaurantes, supermercados, serviços de transporte e distribuição, e postos de gasolina.

Observa-se também a presença de uma cobertura de vegetação ao norte do empreendimento, no entanto, na Região Metropolitana da Grande Vitória a predominância do vento na parte maior do ano é norte (N) ou nordeste (NE), de forma que os empreendimentos ao sul da unidade industrial receberiam maior influência dos poluentes emitidos.

Quando o momento for de predominância do vento sul, a cobertura vegetal pode servir como uma distância de segurança para que os efeitos da poluição não sejam sentidos diretamente pela população.

A Figura 4.3 apresenta o fluxograma simplificado do processo produtivo da unidade industrial.

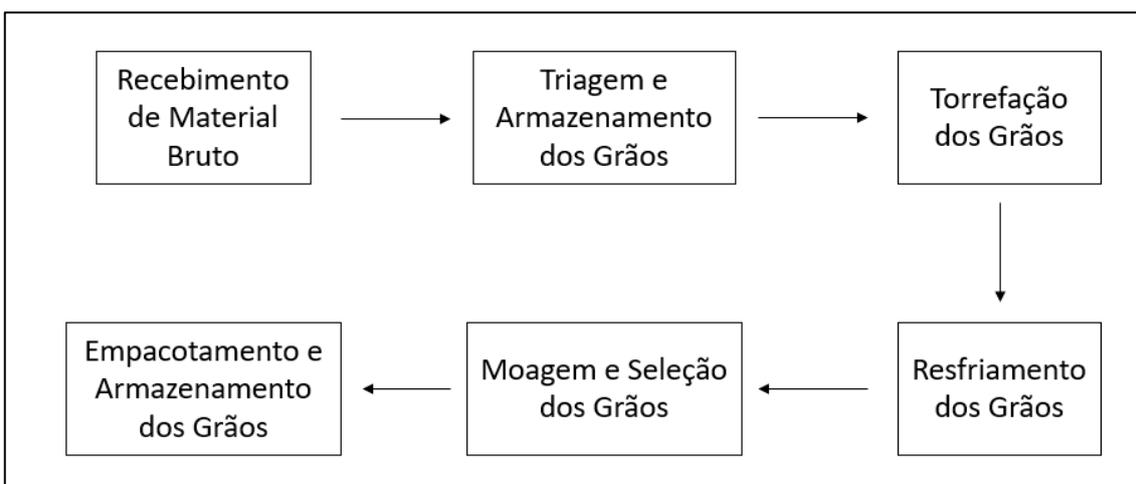


Figura 4.3 – Fluxograma simplificado do processo produtivo da unidade industrial.

A colheita do café é recebida na unidade industrial por meio de caminhões que fazem a descarga em um local coberto e aparelhado com um sistema de ventilação local exaustora equipada com ciclone conforme a Figura 4.4.



Figura 4.4 – Local de descarga da colheita do café e o ciclone utilizado.

Após o recebimento da colheita bruta de café, o material é submetido a uma triagem rigorosa para depois ser armazenado conforme exposto na Figura 4.5 e submetido a etapa mais importante da produção de café: a torrefação.



Figura 4.5 – Armazenamento e Triagem de Grãos.

A torrefação atua sobre altas temperaturas e tem como objetivo remover a umidade, conferir sabor e preparar o café para a moagem. Ao fim da torrefação, o café é resfriado e enviado para seleção de grãos e posterior empacotamento e armazenamento nos galpões.

A Figura 4.6 apresenta o produto final após a seleção dos grãos.



Figura 4.6 – Produto final após a seleção dos grãos.

4.1.3. Pontos de interesse para o controle de poluição atmosférica

Foram realizadas algumas visitas técnicas na unidade industrial. Por meio de observação e análise crítica do processo produtivo, foram localizados pontos de emissão de material particulado identificados nas figuras a seguir.

Além disso, também foram analisadas criticamente os métodos de controle de poluição do ar empregados ao longo da cadeia produtiva. As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam alguns métodos de controle de emissões identificados.



Figura 4.7 – Captores enclausurante e externo na seleção de grãos.



Figura 4.8 – Filtro de mangas do tipo jatos pulsantes.



Figura 4.9 – Limpeza realizada nos galpões de armazenamento.

4.2. METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE EMISSÕES

As emissões de cada atividade estudada neste trabalho serão estimadas através do seu fator de emissão, taxa de atividade e eficiência de controle conforme a Equação 3.1. As estimativas de emissão feitas serão avaliadas através da metodologia DARS proposta pela US EPA conforme a Tabela 3.11.

$$E = A \times EF \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right)$$

(4.1)

E corresponde à taxa de emissão; A corresponde à taxa de atividade; EF corresponde ao fator de emissão; ER corresponde à eficiência de controle das emissões.

As Tabelas 3.9 e 3.10 foram fornecidas pela US EPA e apresentam os fatores de emissão dos poluentes MP, COV, metano, CO e CO₂ para diversas atividades realizadas durante a produção de café.

A taxa de atividade representa a frequência de execução de uma atividade e é usualmente expressa em termos de massa por unidade de tempo. Em uma atividade de despejo de material por caminhão, a taxa de atividade é determinada pela massa de material despejado dividido pelo intervalo de tempo entre um despejo e o outro, por exemplo.

Para a elaboração do inventário, a empresa responsável pela unidade industrial escolhida forneceu dados de consumo de combustível através do inventário de resíduos sólidos, além de dados de monitoramento de vazões das chaminés ativas no ano de 2020.

Conhecendo-se as emissões estimadas de cada atividade, é possível determinar a concentração de poluentes através da equação a seguir:

$$C = \frac{E}{Q} \tag{4.2}$$

C corresponde à concentração de poluentes (mg/m³); E corresponde à taxa de emissão (kg/h); Q corresponde à vazão de exaustão (m³/s).

4.2.1. Dimensionamento de lavadores de gases

O dimensionamento dos lavadores de gases realizado neste trabalho será feito com base nos dados de monitoramento disponibilizados pelo empreendimento para o ano de 2020.

Conhecendo-se a vazão de entrada no equipamento e adotando a velocidade do gás, pode-se calcular o diâmetro do lavador a partir da Equação 25.

$$D_L = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V_{gás}}} \quad (4.3)$$

D_L corresponde ao diâmetro do lavador (m); $V_{gás}$ corresponde à velocidade do gás (m/s); Q corresponde ao fluxo volumétrico (m³/s).

A partir do diâmetro do lavador, é calculado a área da seção transversal conforme a Equação 26.

$$A = \frac{\pi \cdot D_L^2}{4} \quad (4.4)$$

D_L corresponde ao diâmetro do lavador (m); A corresponde à área da seção transversal (m²).

A partir da Tabela 3.7, serão adotados valores para a razão líquido/gás ($R_{L/Q}$), Altura útil do lavador (H_L), Diâmetro da gota (D_{gota}), Densidade da gota (p_p). A vazão de líquido de lavagem requerida pelo lavador pode ser calculada da seguinte forma:

$$Q_L = R_{L/Q} \cdot Q \quad (4.5)$$

Q_L corresponde a vazão de líquido de lavagem requerida (m³/s); $R_{L/Q}$ corresponde a razão líquido/gás (m³água/m³gás); Q corresponde ao fluxo volumétrico (m³/s).

Conhecendo-se as características físicas do gás e do líquido utilizado para lavagem, deve-se calcular a velocidade terminal da gota, conforme:

$$V_{t,gota} = \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{(p_{gota} - p_{gás}) \cdot g \cdot D_{gota}}{p_{gás} \cdot C_D} \right)^{0,5} \quad (4.6)$$

$V_{t,gota}$ corresponde à velocidade terminal das gotas do líquido (m/s); p_{gota} corresponde à densidade da gota (Kg/m³); $p_{gás}$ corresponde à densidade do gás (Kg/m³); g corresponde à aceleração da gravidade (m/s²); C_D corresponde à constante calculada com base no número de Arquimedes, adotado como 0,95; D_{gota} corresponde ao diâmetro da gota (m).

Supondo-se que a distribuição do tamanho das partículas é conhecida, a eficiência da coleta de partículas de qualquer tamanho pode ser calculada a partir das Equações 3.29, 3.30 e 3.31.

$$n_i = 1 - \exp\left(\frac{-3}{2} \cdot 0,2 \cdot R_{L/G} \cdot \frac{V_{t,gota} \cdot H_L \cdot n_i^*}{D_{gota} \cdot (V_{t,gota} - V_{gás})}\right) \quad (4.7)$$

$$n_i^* = \left(\frac{K_{pi}}{K_{pi}+0,7}\right)^2 \quad (4.8)$$

$$K_{pi} = \frac{p_p \cdot d_{pi}^2 \cdot V_{gás}}{9 \cdot \mu_{gás} \cdot D_{gota}} \quad (4.9)$$

n_i corresponde a eficiência de coleta para um diâmetro “i” (%); n_i^* corresponde a eficiência de coleta para uma única gota (%); $R_{L/Q}$ corresponde a razão líquido/gás (m^3 água/ m^3 gás); K_{pi} corresponde ao parâmetro de impactação para cada tamanho de partícula; d_{pi} corresponde ao diâmetro de partícula (m); H_L corresponde a altura útil do lavador (m); $V_{gás}$ corresponde à velocidade do gás (m/s); $\mu_{gás}$ corresponde à viscosidade do gás (Pa.s); $V_{t,gota}$ corresponde à velocidade terminal das gotas do líquido (m/s); p_p corresponde a densidade da partícula (Kg/m^3); D_{gota} corresponde ao diâmetro das gotas do líquido (m).

A perda de carga pode ser calculada através da Equação 3.31:

$$\Delta P = \frac{Q \cdot p_{gota} \cdot g \cdot H_L}{(V_{t,gota} - V_{gás}) \cdot A} \quad (4.10)$$

ΔP corresponde à perda de carga (N/m^2); H_L corresponde à altura útil do lavador (m); Q corresponde ao fluxo volumétrico (m^3/s); p_p corresponde a densidade da partícula (Kg/m^3); $V_{t,gota}$ corresponde à velocidade terminal das gotas do líquido (m/s); $V_{gás}$ corresponde à velocidade do gás (m/s); g corresponde à aceleração da gravidade (m/s^2); A corresponde à área da seção transversal (m^2).

4.3. METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO E DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO E EQUIPAMENTOS DE CONTROLE

4.3.1. Dimensionamento dos captores e tubulações

O dimensionamento dos captores e dutos realizado neste trabalho será feito com base nas fontes de emissão identificadas em campo e serão projetados com o objetivo de enclausurar a fonte.

O posicionamento e o formato dos sistemas de captura bem como dos dutos que os conectará ao equipamento de controle designado será determinado a partir de fotografias e observações registradas em visita técnica ao empreendimento. A partir do traçado das chapas que compõem o sistema de captação, obtém-se o valor da área aberta total.

Conhecendo-se o valor da área aberta total, para se determinar a vazão de exaustão a ser performada pelos captores será necessário a determinação do valor da velocidade de captura. A velocidade de captura pode ser determinada através de recomendações técnicas de trabalhos referência. Neste trabalho, será utilizado as recomendações do Manual de Ventilação Industrial da ACGIH exposto na Tabela 3.13.

Fornecendo-se os valores de área aberta total e da velocidade da captura pode-se determinar a vazão de exaustão, que deverá ser performada pelo sistema de captura, através da Equação 3.2.

$$Q = v_c \cdot A \tag{4.11}$$

Q corresponde a vazão de exaustão (m^3/s); v_c corresponde à velocidade de captura (m/s); A corresponde à área aberta do captor (m^2).

Para o dimensionamento das tubulações, será necessário determinar a velocidade do ar dentro das tubulações através da Tabela 3.14. É importante ressaltar que a escolha da velocidade impacta o diâmetro dos dutos e, portanto, a sua perda de carga.

Idealmente, o projetista deve avaliar a relação entre a velocidade e o diâmetro que satisfazem as condições de funcionamento do sistema e a perda de carga provocada pelas opções, de forma a determinar qual opção é mais viável economicamente.

Para o cálculo da perda de carga total do sistema de captação deve-se considerar a perda de carga na entrada do captor, calculada através da Equação 3.5, a perda de carga distribuída ao longo dos dutos, calculada através da Equação 3.7, e as perdas de carga localizadas em decorrência das peças especiais utilizadas, calculadas através da Equação 3.8 para cada peça.

$$\Delta P = F \cdot h_v \quad (4.12)$$

ΔP corresponde à perda de carga (m); F corresponde ao coeficiente de atrito; h_v corresponde à pressão dinâmica no duto (Pa);

$$\Delta P = \left(F \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \right) \cdot \gamma \quad (4.13)$$

ΔP corresponde à perda de carga distribuída (m); F corresponde ao coeficiente de atrito; γ corresponde ao peso específico do fluido (N/m³); L corresponde ao comprimento dos dutos (m); D corresponde ao diâmetro do duto (m).

$$\Delta P = K \cdot h_v \quad \rightarrow \quad h_v = \frac{\rho v^2}{2} \quad (4.14)$$

ΔP corresponde à perda de carga localizada (m); K corresponde ao fator de perda de carga; h_v corresponde à pressão dinâmica (Pa); ρ corresponde a massa específica do fluido (Kg/m³); v corresponde a velocidade do ar (m/s).

4.3.2. Dimensionamento dos ciclones

Para o dimensionamento de um ciclone, primeiramente é necessário definir um diâmetro, possibilitando o cálculo das dimensões clássicas através da Tabela 3.15. Também foi definida uma distribuição de massa por faixa de diâmetros para qual o ciclone será projetado com base na literatura disponível.

A partir da vazão de exaustão calculada no dimensionamento dos captosres e das dimensões de entrada calculadas na etapa anterior, é possível calcular a velocidade de entrada no ciclone através da Equação 3.11 e o número efetivo de revoluções através da Equação 3.9.

$$V_t = \frac{W}{\Delta t} \quad (4.15)$$

Δt corresponde ao tempo de residência do gás (s); W corresponde à largura do duto de entrada (m); V_t corresponde à velocidade terminal da partícula (m/s).

$$N_e = \frac{1}{H} \cdot \left(L_b + \frac{L_c}{2} \right) \quad (4.16)$$

N_e corresponde ao número efetivo de revoluções; H corresponde à altura do duto de entrada (m); L_b corresponde ao comprimento do corpo do ciclone (m); L_c corresponde ao comprimento do cone do ciclone (m).

O cálculo do diâmetro de partículas coletadas com 50% de eficiência pode ser realizado através da Equação 3.13, dessa forma, a eficiência de coleta de partículas de qualquer tamanho pode ser calculada conforme a Equação 3.14. A eficiência total do ciclone por sua vez, pode ser calculada através da Equação 3.15.

$$d_{pc} = \left(\frac{9 \cdot \mu \cdot W}{2\pi \cdot N_e \cdot V_i \cdot (p_p - p_g)} \right)^{1/2} \quad (4.17)$$

d_{pc} corresponde ao diâmetro da partícula coletada com 50% de eficiência (μm); p_p corresponde à massa específica da partícula (kg/m^3); p_g corresponde à massa específica do gás (kg/m^3); W corresponde à largura do duto de entrada (m); N_e corresponde ao número efetivo de revoluções; μ corresponde à viscosidade do gás ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$); V_i corresponde à velocidade de entrada do gás (m/s).

$$n_j = \frac{1}{1 + (d_{pc}/d_{pj})^2} \quad (4.18)$$

$$n_o = \sum n_j m_j \quad (4.19)$$

d_{pc} corresponde ao diâmetro da partícula coletada com 50% de eficiência (μm); d_{pj} corresponde ao diâmetro característico da faixa de diâmetro "j" (μm); n_j

corresponde à eficiência de coleta para o tamanho de diâmetro “j” (%); n_o corresponde à eficiência total do ciclone (%); m_j corresponde a fração de massa de partículas com diâmetro “j”;

A perda de carga provocada pelo ciclone pode ser calculada através da Equação 3.18. Conhecendo-se a perda de carga, é possível calcular a potência requerida pelo ciclone através da Equação 3.19.

4.3.3. Dimensionamento dos filtros de mangas

No dimensionamento de um filtro de mangas, a eficiência não é uma preocupação visto que já é esperado um valor alto. Neste trabalho serão dimensionados a razão ar/pano, a área total de filtragem, o número de mangas e a perda de carga provocada pelo equipamento.

A velocidade de filtragem ou razão ar/pano, pode ser determinada através da Equação 3.21.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (4.20)$$

V corresponde à velocidade de filtragem (m/min); Q corresponde ao fluxo volumétrico (m³/min); A corresponde à área do tecido (m²).

A área total de filtragem é calculada com base na velocidade de filtragem e na vazão de exaustão calculada durante o dimensionamento dos captores. Conhecendo-se a área total de filtragem, pode-se calcular o número de mangas através da Equação 3.22.

$$N = \frac{\text{Área}_t}{\text{Área}_{manga}} \quad (4.21)$$

N corresponde ao número de mangas no filtro; Área_t corresponde à área total dos tecidos filtrantes (m²); Área_{manga} corresponde à área de uma manga (m²).

A perda de carga provocada pelo filtro de mangas pode ser calculada através das Equação 3.24.

$$\Delta P = 2,72 \Delta W^{0,45} \cdot P^{-1,38} \cdot V^{2,34} \quad (4.22)$$

ΔP corresponde à perda de carga através do tecido e da camada de poeira agregada (cm H₂O); ΔW corresponde à densidade superficial de poeira agregada entre duas limpezas consecutivas (mg/cm²); P corresponde à pressão do pulso (atm); V corresponde à velocidade de filtração (cm/s).

4.4. METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA E PREVISÃO DE CUSTOS

Para a avaliação dos custos do sistema de ventilação e dos equipamentos de controle foram considerados os custos de implementação, e os custos de operação e manutenção dos sistemas propostos.

Os custos de implementação de projeto estão relacionados aos custos iniciais de instalação do sistema, ou seja, aquisição de tubulações, ventiladores, equipamentos de controle bem como da obra em si, além de gastos como fiscalização da obra e consultoria.

Os custos de operação do sistema de ventilação estão relacionados com o custo energético provocados pelos ventiladores. Os custos de manutenção estão relacionados com a troca dos filtros após o fim da vida útil dos mesmos. Os custos envolvidos na manutenção do equipamento de controle serão estabelecidos conforme o disposto pelos fabricantes.

O método de avaliação econômica empregado será o Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) definido pela Equação 3.34.

$$V = P \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4.34)$$

V corresponde ao valor das parcelas; P corresponde ao custo de investimento do projeto; n corresponde ao número de parcelas; i corresponde ao valor de juros aplicado.

A análise CAUE será feita para os dois cenários de dimensionamento, possibilitando a comparação entre as alternativas, o levantamento dos pontos

positivos e negativos de cada uma, e a escolha adequada de cada alternativa para cada cenário para um horizonte de 40 anos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos através da análise crítica do processo produtivo com relação aos pontos de interesse para o controle de poluição atmosférica e as fontes de emissão de poluição atmosférica.

Também serão abordados o dimensionamento dos sistemas de controle de poluição atmosférica propostos e os custos associados a montagem e operação desses sistemas.

5.1. ANÁLISE DO INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Para o desenvolvimento do inventário de emissões atmosféricas foram utilizados dados de monitoramento e consumo de combustível fornecidos pelo empreendimento para o ano de 2020, além dos fatores de emissão disponíveis nos capítulos da AP-42.

Para a estimativa das taxas de emissões dos poluentes MP, NO_x, SO₂ e CO foram utilizados os dados de monitoramento obtidos para as chaminés do empreendimento no ano de 2020.

O monitoramento das chaminés foi realizado por empresa contratada conforme os métodos de referência explicitados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Métodos de referência utilizados para cada poluente.

Poluente	Método referência
MP	USEPA 05 / 17 – Determinação de material particulado em emissões de fontes estacionárias.
NO_x	USEPA CTM 30:1997 – Determinação de óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e oxigênio em emissões da queima de gás natural.
SO₂	NBR 12021 – Efluentes gasosos de dutos e chaminés de fontes estacionárias.
CO	USEPA CTM 30:1997 – Determinação de óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e oxigênio em emissões da queima de gás natural.

Para as chaminés onde há queima de gás natural, as emissões das frações MP₁₀ e MP_{2.5} foram consideradas iguais a fração de MP total, sendo considerado que todo o material particulado emitido tem o diâmetro inferior a um micrometro conforme disposto no capítulo 1.4 da AP-42 (Tabela 1.4.2).

Para as demais chaminés as emissões das frações MP₁₀ e MP_{2.5} também foram consideradas iguais a fração de MP total, pois a estimativa dessas frações através dos fatores de emissão resultaria em taxas maiores que a fração de MP total monitorada.

Para a estimativa das emissões de COV foram utilizados fatores de emissão da AP-42 disponíveis no capítulo 1.4, onde há combustão de gás natural e no capítulo 1.6, onde há queima de resíduos de madeira. Não foi encontrado fator de emissão deste poluente para a chaminé do Silo de Borra Úmida no capítulo 9 da AP-42 (Torrefação de café).

O monitoramento de CO para a chaminé do Silo de Borra Úmida teve resultado inferior a 0,01 ppm e, portanto, foi desconsiderado. O resultado da atualização do inventário é apresentado na Tabela 5.2.

As emissões de material particulado provenientes da chaminé do Silo de Borra Úmida representam uma parcela significativa da emissão total desse poluente, indicando que a implementação de um sistema de controle de material particulado na unidade operacional pode contribuir para a redução geral das emissões desse poluente.

As emissões de poluentes gasosos provenientes das chaminés do Torrador 1 e da Caldeira Bremmer representam uma parcela significativa das emissões totais de CO e NO_x, indicando que a implementação de um sistema de controle de poluentes gasosos, como um lavador de gases, nas unidades operacionais da Torração e da Caldeira podem contribuir para a redução geral das emissões desse tipo de poluente.

Tabela 5.2 – Inventário de emissões atmosféricas referente ao ano de 2020.

Fonte Emissora	Taxa de Emissão (kg/h)						
	MP	MP ₁₀	MP _{2.5}	NO _x	SO ₂	CO	COV
Chaminé do Torrador 1	0,1100	0,1100	0,1100	0,4000	0,0027	8,4834	0,0117
Chaminé do Torrador 2	0,1300	0,1300	0,1300	0,1167	0,0033	2,0875	0,0117
Chaminé da Caldeira Bremmer	1,4167	1,4167	1,4167	3,0333	0,0100	5,1033	0,2474
Chaminé do Silo de Borra Úmida	4,9900	4,9900	4,9900	0,0300	0,0027	0,0000	-
Chaminé do Multiciclone da Torre 1	0,2467	0,2467	0,2467	0,2133	0,0100	0,1323	0,0235
Chaminé do Multiciclone da Torre 2	0,4233	0,4233	0,4233	0,1333	0,0133	0,0109	0,0235
Chaminé do Secador de Borra	1,3400	1,3400	1,3400	1,5533	0,0900	2,3643	0,2474
Total	8,66	8,66	8,66	5,48	0,13	18,18	0,57

As taxas de emissão calculadas no inventário de emissões atmosféricas podem ser comparadas com a resolução CONAMA 382/2006 a fim de verificar se as emissões provenientes do empreendimento se encontram dentro do permitido.

A Tabela 5.3 exibe os limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes da combustão de gás natural e derivados de madeira. Foram adotados os limites mais restritivos disponíveis na legislação.

Tabela 5.3 – Limites de emissão para poluentes atmosféricos.

Poluente	Combustível queimado	Limite de emissão (mg/Nm³)
NO_x	Gás Natural	200
NO_x	Derivados de Madeira	650
MP	Derivados de Madeira	130

A Tabela 5.4 apresenta as taxas de emissão das chaminés onde há queima de gás natural ou borra e cavaco e o valor de concentração equivalente em mg/Nm³ do poluente com base na vazão das chaminés apresentada no relatório de monitoramento.

As taxas de emissão de MP e NO_x foram obtidas através de dados de monitoramento das chaminés. Também foram utilizados dados de vazão em Nm³/h provenientes do monitoramento para o cálculo do valor de concentração em mg/Nm³.

Tabela 5.4 – Concentrações equivalentes e limites de emissão para poluentes atmosféricos.

Poluente	Chaminé	Combustível queimado	Taxa de Emissão (kg/h)	Concentração (mg/Nm³)
NO_x	Torrador 1	Gás Natural	0,4000	68,88
NO_x	Torrador 2	Gás Natural	0,1167	12,16
NO_x	Multiciclone da Torre 1	Gás Natural	0,2133	10,79
NO_x	Multiciclone da Torre 2	Gás Natural	0,1333	6,49
MP	Caldeira Bremmer	Derivados de Madeira	1,4167	76,93
NO_x	Caldeira Bremmer	Derivados de Madeira	3,0333	200
MP	Secador de Borra	Derivados de Madeira	1,3400	78,15
NO_x	Secador de Borra	Derivados de Madeira	1,5533	90,59

Apesar de todas as concentrações estarem de acordo com os limites estabelecidos pela CONAMA 382/2006, observa-se que a concentração de MP e de NOX para a Caldeira Bremmer e para o Secador de Borra não estão tão longes do limite para a queima de derivados de madeira.

Conforme exposto na metodologia, o lavador de gases do tipo torre de spray é um equipamento de controle capaz de coletar material particulado e gases simultaneamente de forma eficiente.

Dessa forma, propõe-se o dimensionamento de lavadores de gases para essas duas fontes tomando como base os dados de monitoramento nas respectivas chaminés.

5.1.1. Dimensionamento de lavadores de gases do tipo torre de spray

Pela falta de informações acerca dos poluentes emitidos pelas chaminés, foram adotados diversos parâmetros necessários para o dimensionamento dos lavadores de gases com base na literatura disponível e expostos na Tabela 5.5 (PRATES, 2014).

Tabela 5.5 – Parâmetros adotados para o dimensionamento.

Parâmetro	Valor
Velocidade do gás	1 m/s
Razão líquido/gás	0,003 m ³ água/m ³ gás
Densidade do gás	1,1455 Kg/m ³
Viscosidade do gás	1,78.10 ⁻⁵ Pa.s
Diâmetro da gota	0,0008 m
Densidade da gota	997 Kg/m ³
Densidade da partícula	920 Kg/m ³

Os lavadores de gases serão dimensionados considerando a taxa de emissão e concentração expostos na Tabela 5.4 e a vazão em Nm³/h de saída das chaminés da Caldeira Bremmer e do Secador de Borra, 18.416 Nm³/h e 17.146 Nm³/h, respectivamente.

Além disso, foram consideradas a temperatura de 20°C, pressão de 1 atm, elevação igual ao nível do mar e umidade relativa como 0% para dimensionamento dos lavadores de gases.

Para estimativa da eficiência de remoção de MP, foram considerados uma faixa de diâmetros de partículas que varia de 5 µm para 50 µm com base na literatura disponível (PRATES, 2014). A eficiência para a remoção de NO_x foi estimada como sendo de 90% (US EPA, 2002).

A Tabela 5.6 apresenta as características básicas do lavador de gás projetado para a chaminé da Caldeira Bremmer.

Tabela 5.6 – Principais características do lavador de gás dimensionado para a Caldeira Bremmer.

Parâmetro	Valor
Altura	6,00 m
Diâmetro	2,55 m
Área	5,12 m ²
Vazão de água no lavador	0,015 m ³ /s
Perda de carga no lavador	90,74 Pa
Vazão de entrada	18.416,00 Nm ³ /h
Eficiência de remoção de MP	96,42 %
Taxa de emissão de MP na saída	0,0507 Kg/h
Concentração de MP na saída	2,7554 mg/Nm ³
Taxa de emissão de NO _x na saída	0,3033 Kg/h
Concentração de NO _x na saída	16,4710 mg/Nm ³

A Tabela 5.7 apresenta as características básicas do lavador de gás projetado para a chaminé do Secador de Borra.

Tabela 5.7 – Principais características do lavador de gás dimensionado para o Secador de Borra.

Parâmetro	Valor
Altura	6,00 m
Diâmetro	2,46 m
Área	4,76 m ²
Vazão de água no lavador	0,014 m ³ /s
Perda de carga no lavador	90,74 Pa
Vazão de entrada	17.146,00 Nm ³ /h
Eficiência de remoção de MP	96,42 %
Taxa de emissão de MP na saída	0,0480 Kg/h
Concentração de MP na saída	2,7993 mg/Nm ³
Taxa de emissão de NO _x na saída	0,1553 Kg/h
Concentração de NO _x na saída	9,0593 mg/Nm ³

Na seção 5.2, será abordado o dimensionamento de sistemas de controle da poluição atmosférica de forma quantitativa para as etapas de recebimento de material bruto, triagem dos grãos e de forma qualitativa para a etapa de empacotamento e armazenamento dos grãos.

– Recebimento de material bruto:

Para a etapa de recebimento de material bruto do processo produtivo, serão propostas melhorias na estrutura do galpão onde ocorrem o descarregamento dos caminhões. A Figura 4.4 exibe o local onde ocorre o despejo de material bruto através de caminhões.

As melhorias propostas incluem: a construção de uma estrutura enclausurante na região de descarregamento das caçambas dos caminhões e a readequação do sistema de ventilação local exaustora.

– Triagem de grãos:

Durante as visitas realizadas a área de triagem dos grãos, observou-se o escape de partículas durante o procedimento de triagem. A Figura 4.5 exibe uma das mesas de triagem onde se observou o escape de partículas durante o procedimento.

Para esta etapa, serão propostas melhorias com relação ao enclausuramento dos pontos de emissão de material particulado identificados nos mecanismos de triagem.

– Empacotamento e armazenamento de grãos:

A logística do processo produtivo estabelece que, após a moagem e seleção dos grãos, o produto seja empacotado e armazenado em galpões até a distribuição. A Figura 4.5 exibe o galpão de armazenamento e o produto final já empacotado.

As visitas técnicas aos galpões de armazenamento revelaram que devido a frequente movimentação do produto neste ambiente fechado acarreta no prejuízo da qualidade do ar interior. Além disso, foram identificados odor característico do produto, carência de iluminação visto que o produto deve ser acondicionado de maneira protegida da incidência de luz e falta de ventilação natural.

Para esta etapa, serão propostas melhorias no sistema de ventilação do edifício, adotando medidas de ventilação natural e diluidora.

5.2. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE DE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

As melhorias propostas para a área de recebimento do material bruto e de triagem de grãos incluem a readequação do sistema de controle de poluição atmosférica empregado. O novo sistema a ser desenhado utilizará de um sistema de captura enclausurante ligado a um equipamento de controle da poluição do ar e um ventilador por meio de tubulações.

Para se diminuir a perda de carga, os gastos energéticos com a potência do ventilador e com a construção de tubulações desnecessárias, a fonte deverá ser enclausurada o máximo possível e os dutos a ser construídos devem seguir o caminho mais curto e com o menor número de peças acessórias até o equipamento de controle.

Serão propostas alternativas de dimensionamento de sistemas com: um ciclone, filtro de mangas ou ciclone seguido de filtro de mangas, conforme:

- Cenário 1 – Recebimento de material bruto
 - 1.A – Ciclone
 - 1.B – Filtro de mangas
 - 1.C – Ciclone seguido de filtro de mangas
- Cenário 2 – Triagem de grãos
 - 2.A – Ciclone
 - 2.B – Filtro de mangas
 - 2.C – Ciclone seguido de filtro de mangas

Para o dimensionamento dos sistemas de controle da poluição atmosférica, foi considerado a distribuição de massa por diâmetro de partículas exposta na Tabela 5.8, baseada na referência mais recente disponível na literatura (LIM; WANG, 2014).

Tabela 5.8 – Distribuição de massa por diâmetro de partículas.

Diâmetro (μm)	Porcentagem de Massa por Faixa (%)
300	5
600	17
1200	57
2000	19
2400	2

Além disso, foram consideradas a temperatura de 20°C, pressão de 1 atm, elevação igual ao nível do mar e umidade relativa como 0% para dimensionamento dos sistemas. Dessa forma, o fator de densidade foi considerado como 1 e a densidade do ar como 1,2041 Kg/m³.

Para estimativa da carga de MP na vazão de entrada do equipamento de controle de cada cenário foram utilizados dados de produção disponibilizados pelo empreendimento e referentes ao ano de 2020, conforme a Tabela 5.9, em conjunto com o fator de emissão para “Grão de café com sistema de peneiramento, manuseio e armazenamento com filtro de tecido” exposto na Tabela 3.9.

Tabela 5.9 – Dados de produção referentes ao ano de 2020.

Produto	Quantidade
Café Solúvel	10.388.534,73 Kg
Café Torrado	2.901.650,00 Kg
Total	13.290.184,73 Kg

Dessa forma, calcula-se a carga de MP na vazão de entrada dos equipamentos de controle através da Equação 3.1:

$$FE = 0,0590 \text{ lb/ton} = 0,0268 \text{ kg/ton}$$

$$TE = 13290,18 \times 0,0268 = 0,04 \text{ Kg/h}$$

A análise de viabilidade econômica será realizada conforme a metodologia para estimativa e previsão de custos com base nos custos de implementação e operação dos diferentes cenários propostos.

5.2.1. Dimensionamento de sistema captor enclausurante para o recebimento de material bruto

O projeto de sistema captor do tipo enclausurante que deverá substituir o atual sistema de captura deverá ligar a fonte de emissão (despejo de material bruto) as alternativas de equipamento de controle abordadas nos cenários 1.A, 1.B e 1.C a seguir.

Como mencionado anteriormente, a ligação realizada através de dutos deve ser a menor possível a fim de evitar desperdícios. Além disso, a entrada do enclausuramento da fonte deve ser alta o suficiente para possibilitar a inclinação da caçamba para despejo de material.

A Figura 5.1 representa um esquema do sistema enclausurante e captação.

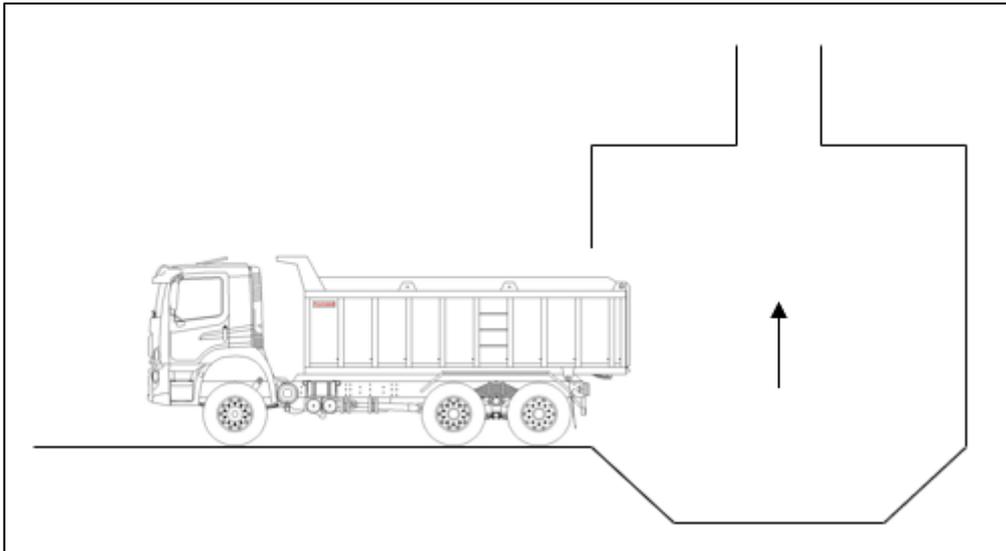


Figura 5.1 – Esquema de configuração do sistema enclausurante.

Observa-se que a entrada permite espaço para que a caçamba seja içada e possibilite o despejo de material. O captor posicionado no topo da estrutura objetiva uma melhor captura do material particulado mais leve e em suspensão devido ao despejo da caçamba do caminhão.

A Figura 5.2 exibe a visão frontal do sistema enclausurante, onde é possível observar a área aberta e a direção do escoamento na captação.

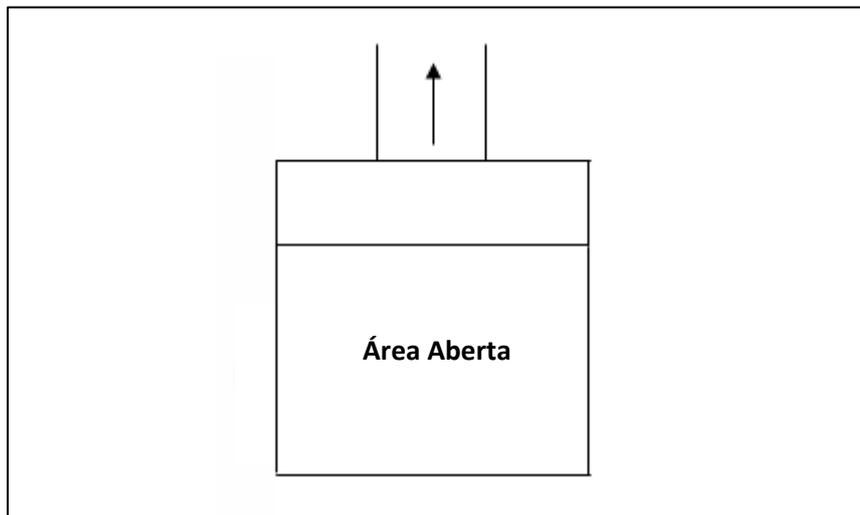


Figura 5.2 – Visão frontal do sistema enclausurante.

A partir da área aberta das chapas que compõem o sistema enclausurante e da velocidade de captura adotada, a vazão de exaustão foi calculada conforme a Equação 3.2 e tem o seguinte valor:

$$Q = 16,125 \text{ m}^3/\text{s} = 58050 \text{ m}^3/\text{h}$$

O formato das chapas que compõem o captor enclausurante e os valores de área aberta e velocidade de captura utilizados para o cálculo da vazão de exaustão estão disponíveis no Apêndice A.1.

Os custos da compra do material para construção do sistema captor enclausurante foi orçada considerando-se o valor de R\$ 250,00 para cada m² de placa, resultando no valor de:

$$\text{Sistema Captor} = \text{R\$ } 6.362,50$$

5.2.1.1. Cenário 1.A - Dimensionamento de ciclone para o recebimento de matéria material bruto

O projeto de dimensionamento de ciclone que deverá substituir o atual ciclone existente no empreendimento, deverá ser ligado ao sistema captor enclausurante dimensionado anteriormente por meio de dutos que causem a menor perda de carga possível. Os detalhes do sistema de dutos podem ser observados no Apêndice A.2.

A Tabela 5.10 apresenta as características básicas do ciclone e do ventilador projetados para este cenário. Os detalhes das dimensões do ciclone, bem como do sistema de dutos que conecta o sistema captor enclausurante pode ser observada no Apêndice A.3.

O gráfico de desempenho, bem como os detalhes de configuração do ventilador podem ser observados no catálogo do fabricante no Anexo A.

Tabela 5.10 – Características básicas do ciclone e ventilador projetados.

Ciclone	
Razão D/D	1
Perda de Carga	1217,78 Pa
Eficiência	99,30%

Ventilador¹	
Potência	26,63 kW
Vazão	16,23 m³/s
Pressão estática fornecida	1377,00 Pa
Rendimento	88,60 %

1 – Dados fornecidos pelo fabricante (Soler & Palau Sistemas de Ventilação).

5.2.1.2. Cenário 1.B - Dimensionamento de filtro de mangas para o recebimento de matéria material bruto

O projeto de dimensionamento de filtro de mangas que deverá substituir o atual ciclone existente no empreendimento, deverá ser ligado ao sistema captor enclausurante dimensionado anteriormente por meio de dutos que causem a menor perda de carga possível. Os detalhes do sistema de dutos podem ser observados no Apêndice A.2.

A Tabela 5.11 apresenta as características básicas do filtro de mangas e do ventilador projetados para este cenário. Os detalhes das dimensões do filtro de mangas, bem como do sistema de dutos que conecta o sistema captor enclausurante pode ser observada no Apêndice A.3.

O gráfico de desempenho, bem como os detalhes de configuração do ventilador podem ser observados no catálogo do fabricante no Anexo A.

Tabela 5.11 – Características básicas do filtro de mangas e ventilador projetados.

Filtro de mangas	
Área Filtrante	645 m ²
Relação Ar/Pano	1,50 m/min
Mangas	526
Perda de Carga	2086,21 Pa

Ventilador¹	
Potência	53,99 kW
Vazão	17,42 m ³ /s
Pressão estática fornecida	2622,00 Pa
Rendimento	89,00 %

1 – Dados fornecidos pelo fabricante (Soler & Palau Sistemas de Ventilação).

5.2.1.3. Cenário 1.C - Dimensionamento de ciclone e filtro de mangas para o recebimento de matéria material bruto

O projeto de dimensionamento de ciclone seguido de filtro de mangas que deverá substituir o atual ciclone existente no empreendimento, deverá ser ligado ao sistema captor enclausurante dimensionado anteriormente por meio de dutos que causem a menor perda de carga possível. Os detalhes do sistema de dutos podem ser observados no Apêndice A.2.

A Tabela 5.12 apresenta as características básicas do ciclone, filtro de mangas e do ventilador projetados para este cenário. Os detalhes das dimensões dos equipamentos, bem como do sistema de dutos que conecta o sistema captor enclausurante pode ser observada no Apêndice A.3.

O gráfico de desempenho, bem como os detalhes de configuração do ventilador podem ser observados no catálogo do fabricante no Anexo A.

Tabela 5.12 – Características básicas do ciclone, filtro de mangas e ventilador projetados.

Ciclone	
Razão D/D	1
Perda de Carga	1217,78 Pa
Eficiência	99,30%

Filtro de mangas	
Área Filtrante	645 m ²
Relação Ar/Pano	1,50 m/min
Mangas	526
Perda de Carga	2086,21 Pa

Ventilador¹	
Potência	79,14 kW
Vazão	17,14 m ³ /s
Pressão estática fornecida	3908,00 Pa
Rendimento	88,80 %

1 – Dados fornecidos pelo fabricante (Soler & Palau Sistemas de Ventilação).

5.2.2. Dimensionamento de sistema captor enclausurante para a triagem de grãos

O projeto de sistema captor do tipo enclausurante que deverá substituir o atual sistema de captura deverá ligar a fonte de emissão (triagem de grãos) as alternativas de equipamento de controle abordadas nos cenários 2.A, 2.B e 2.C a seguir.

Como mencionado anteriormente, a ligação realizada através de dutos deve ser a menor possível a fim de evitar desperdícios. A Figura 5.3 representa um esquema do sistema enclausurante e captação das mesas de triagem.

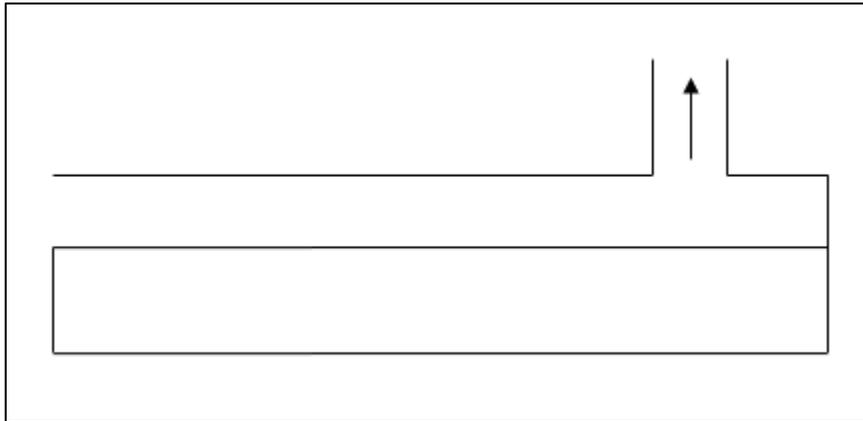


Figura 5.3 – Esquema de configuração do sistema enclausurante.

A Figura 5.4 exibe a visão frontal do sistema enclausurante, onde é possível observar a área aberta e a direção do escoamento na captação.

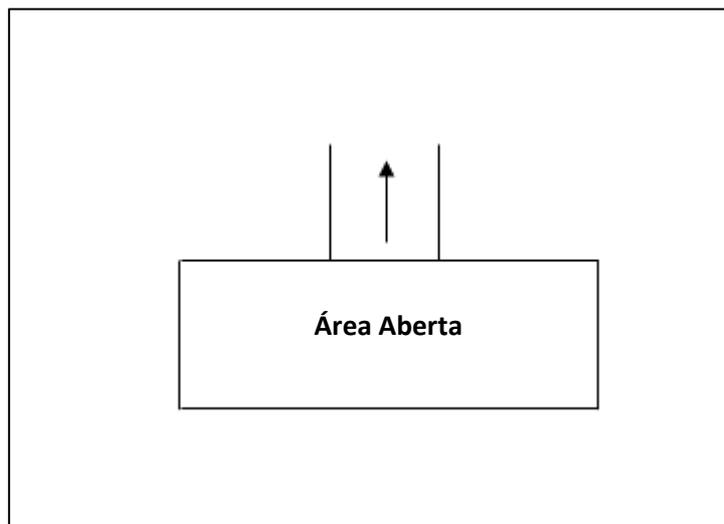


Figura 5.4 – Visão frontal do sistema enclausurante.

A partir da área aberta das chapas que compõem o sistema enclausurante e da velocidade de captura adotada, a vazão de exaustão foi calculada conforme a Equação 3.2 e tem o seguinte valor:

$$Q = 0,42 \cdot 2 = 0,84 \text{ m}^3/\text{s} = 3024 \text{ m}^3/\text{h}$$

O formato das chapas que compõem o captor enclausurante e os valores de área aberta e velocidade de captura utilizados para o cálculo da vazão de exaustão estão disponíveis no Apêndice B.1.

Os custos da compra do material para construção do sistema captor enclausurante foi orçada considerando-se o valor de R\$ 250,00 para cada m² de placa, resultando no valor de:

$$\text{Sistema Captor} = \text{R\$ } 3.492,50$$

5.2.2.1. Cenário 2.A - Dimensionamento de ciclone para a triagem de grãos

O projeto de dimensionamento de ciclone deverá ser ligado ao sistema captor enclausurante dimensionado anteriormente por meio de dutos que causem a menor perda de carga possível. Os detalhes do sistema de dutos podem ser observados no Apêndice B.2.

A Tabela 5.13 apresenta as características básicas do ciclone e do ventilador projetados para este cenário. Os detalhes das dimensões do ciclone, bem como do sistema de dutos que conecta o sistema captor enclausurante pode ser observada no Apêndice B.3.

O gráfico de desempenho, bem como os detalhes de configuração do ventilador podem ser observados no catálogo do fabricante no Anexo A.

Tabela 5.13 – Características básicas do ciclone e ventilador projetados.

Ciclone	
Razão D/D	1
Perda de Carga	1217,78 Pa
Eficiência	99,84 %
Ventilador¹	
Potência	1,55 kW
Vazão	0,86 m ³ /s
Pressão estática fornecida	1474,00 Pa
Rendimento	86,40 %

1 – Dados fornecidos pelo fabricante (Soler & Palau Sistemas de Ventilação).

5.2.2.2. Cenário 2.B - Dimensionamento de filtro de mangas para a triagem de grãos

O projeto de dimensionamento de filtro de mangas deverá ser ligado ao sistema captor enclausurante dimensionado anteriormente por meio de dutos que causem a menor perda de carga possível. Os detalhes do sistema de dutos podem ser observados no Apêndice B.2.

A Tabela 5.14 apresenta as características básicas do filtro de mangas e do ventilador projetados para este cenário. Os detalhes das dimensões do filtro de mangas, bem como do sistema de dutos que conecta o sistema captor enclausurante pode ser observada no Apêndice B.3.

O gráfico de desempenho, bem como os detalhes de configuração do ventilador podem ser observados no catálogo do fabricante no Anexo A.

Tabela 5.14 – Características básicas do filtro de mangas e ventilador projetados.

Filtro de mangas	
Área Filtrante	33,6 m ²
Relação Ar/Pano	1,50 m/min
Mangas	27
Perda de Carga	2086,21 Pa

Ventilador¹	
Potência	2,71 kW
Vazão	0,86 m ³ /s
Pressão estática fornecida	2378 Pa
Rendimento	78,50 %

1 – Dados fornecidos pelo fabricante (Soler & Palau Sistemas de Ventilação).

5.2.2.3. Cenário 2.C - Dimensionamento de ciclone e filtro de mangas para a triagem de grãos

O projeto de dimensionamento de ciclone seguido de filtro de mangas deverá ser ligado ao sistema captor enclausurante dimensionado anteriormente por meio de dutos que causem a menor perda de carga possível. Os detalhes do sistema de dutos podem ser observados no Apêndice B.2.

A Tabela 5.15 apresenta as características básicas do ciclone, filtro de mangas e do ventilador projetados para este cenário. Os detalhes das dimensões dos equipamentos, bem como do sistema de dutos que conecta o sistema captor enclausurante pode ser observada no Apêndice B.3.

O gráfico de desempenho, bem como os detalhes de configuração do ventilador podem ser observados no catálogo do fabricante no Anexo A.

Tabela 5.15 – Características básicas do ciclone, filtro de mangas e ventilador projetados.

Ciclone	
Razão D/D	1
Perda de Carga	1217,78 Pa
Eficiência	99,84 %

Filtro de mangas	
Área Filtrante	33,6 m ²
Relação Ar/Pano	1,50 m/min
Mangas	27
Perda de Carga	2086,21 Pa

Ventilador¹	
Potência	4,13 kW
Vazão	0,85 m ³ /s
Pressão estática fornecida	3595,00 Pa
Rendimento	76,10 %

1 – Dados fornecidos pelo fabricante (Soler & Palau Sistemas de Ventilação).

5.2.3. Análise qualitativa de sistema de ventilação geral para os galpões de armazenamento

A ventilação geral consiste na movimentação de ar através de espaços confinados com a finalidade de melhorar as condições do ambiente por meio do controle da distribuição de ar, temperatura e umidade.

A logística da unidade industrial requer que os grãos de café sejam estocados em armazéns em grande quantidade até a comercialização. Além disso, ainda nos galpões de armazenamento, são performadas atividades que requerem a movimentação dos grãos de café, como o envio para a triagem.

As movimentações de grãos que ocorrem dentro dos armazéns ocasionam emissões de partículas de menor granulometria, contribuindo para a degradação da qualidade do ar interior.

Devido à grande área operacional dos armazéns, as diferentes atividades performadas no seu interior e grande quantidade de material envolvida, é inviável projetar sistemas de ventilação local atribuídos a cada área de emissão, seja pelos custos envolvidos ou pela limitação de espaço.

Dessa forma, será proposto um cenário de melhoria relacionado a benefícios ocupacionais e ambientais de forma qualitativa, não sendo levado em consideração custos de implementação, operação e manutenção.

A seguir serão apresentadas possibilidades de melhoria do controle de emissões nas atividades performadas nos galpões de armazenamento.

5.2.3.1. Ventilação geral através de entrada de ar e exaustão naturais

A ventilação natural consiste em proporcionar a entrada e saída de ar de um ambiente confinado de forma controlada através de aberturas projetadas para tal. Exemplos de entradas de ar naturais são janelas e lanternins.

O fluxo de entrada e saída de ar através das aberturas depende da diferença entre as pressões interna e externa ao edifício e da resistência à passagem de ar pela abertura.

Uma das possibilidades de melhoria na qualidade do ar interno dos galpões de armazenamento é a adoção de um sistema de ventilação natural por gravidade, onde o deslocamento de ar ocorre por meio de aberturas localizadas na parte superior do galpão e pela diferença de densidade do ar.

A Figura 5.5 representa um esquema do sistema de ventilação natural por gravidade.

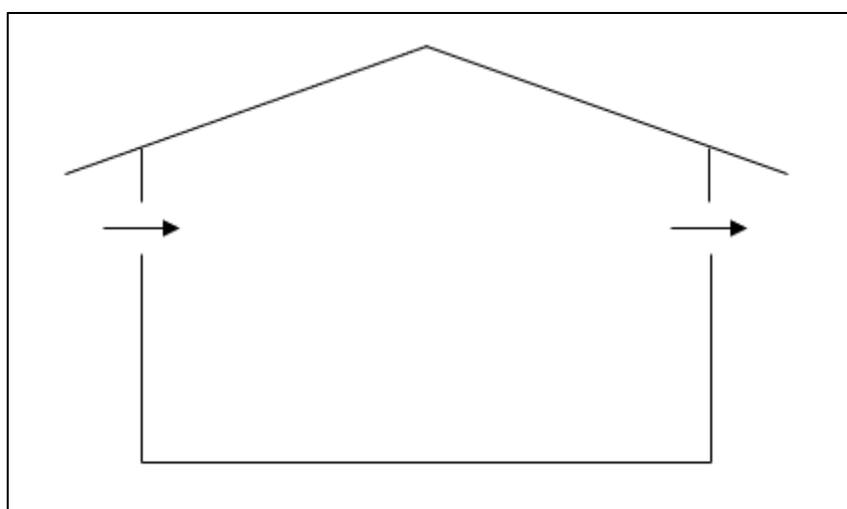


Figura 5.5 – Esquema de configuração do sistema de ventilação geral natural.

Para se obter melhores resultados, a localização das aberturas deve levar em consideração as condições atmosféricas e climáticas, de forma a aproveitar a predominância do vento do vento ou da movimentação do ar em decorrência da temperatura.

Além disso, o projeto das entradas e saídas de ar deve levar em consideração as condições de armazenamento dos produtos estocados nos galpões. Fatores externos como o aumento ou diminuição da temperatura no interior do edifício, a incidência de luz solar, vento ou chuva diretamente sobre os produtos podem prejudicar a cadeia produtiva e causar prejuízos ou perda da qualidade.

5.2.3.2. Ventilação geral natural através de chaminés

De forma a contornar as dificuldades relacionadas a exposição dos produtos estocados à luz, vento, chuva e calor, podem ser adotados o uso de chaminés para exaustão no lugar de janelas.

As chaminés possibilitam a entrada e saída de ar de forma menos eficiente do que as janelas, no entanto, evitam a exposição direta do estoque por serem cobertas no topo da estrutura.

A Figura 5.6 representa um esquema do sistema de ventilação natural através de chaminés.

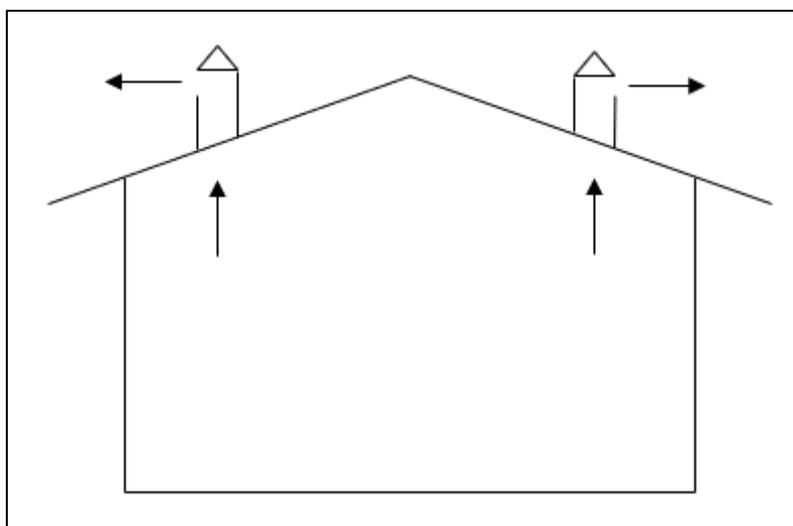


Figura 5.6 – Esquema de configuração do sistema de ventilação geral natural através de chaminés.

De forma similar a alternativa anterior, a direção das aberturas das chaminés deve levar em consideração as condições atmosféricas e climáticas, de forma a aproveitar a predominância do vento do vento ou da movimentação do ar em decorrência da temperatura para que se possa obter melhores resultados.

Deve-se mencionar também que as chaminés, por se localizarem no topo da estrutura, são mais eficientes para a exaustão de gases de menor densidade e menos eficiente para poluentes de maior granulometria como material particulado.

5.2.3.3. Ventilação geral diluidora obtida mecanicamente

A ventilação geral diluidora objetiva a redução do teor de contaminantes em um ambiente fazendo passar pelo recinto uma corrente de ar de vazão adequada que contribui para a diluição dos poluentes e conseqüente melhoria da qualidade do ar.

Essa forma de ventilação é especialmente vantajosa quando se faz necessário a não interferência com as operações performadas no local e quando as fontes poluidoras se encontram dispersas.

No caso dos galpões de armazenamento deve-se evitar qualquer tipo de interferência com os produtos estocados, além disso, observa-se atividades potencialmente poluidoras sendo realizadas em diferentes locais ao longo da área.

A ventilação geral diluidora não é aconselhável e não deve ser permitida nos casos onde os poluentes a serem diluídos apresentem alta toxicidade, pois até atingirem o grau de diluição tolerável estes poluentes ainda podem interagir com os aparelhos respiratórios dos seres humanos. Neste caso, deve-se tratar de um sistema de ventilação local exaustora.

Não foi identificada a geração de poluentes de alta toxicidade nos galpões de armazenamento. Considera-se que os poluentes gerados nessa área são, majoritariamente, material particulado.

Considerando as necessidades mencionadas para os galpões de armazenamento, a ventilação geral diluidora representa uma opção viável.

Propõe-se a instalação de ventiladores que proporcionem uma vazão de ar suficiente para diluição dos poluentes gerados nos galpões de armazenamento até um nível confortável e seguro para os trabalhadores.

A Figura 5.7 representa um esquema do sistema de ventilação diluidora obtida mecanicamente.

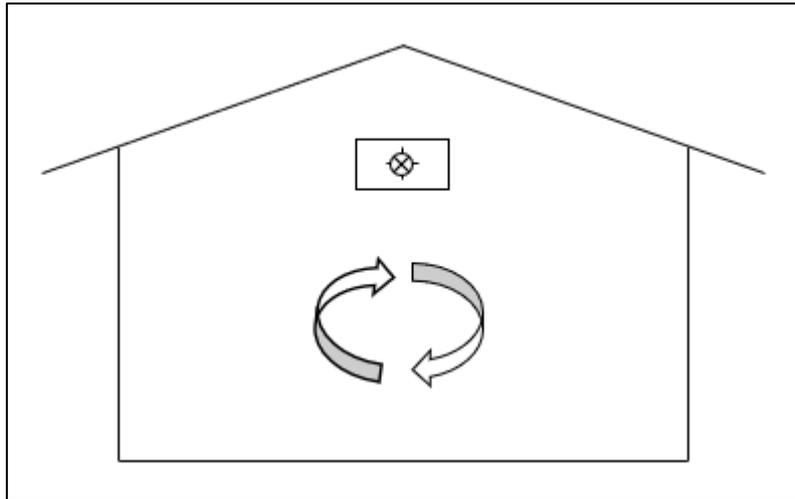


Figura 5.7 – Esquema de configuração do sistema de ventilação geral diluidora obtida mecanicamente.

5.2.3.4. Ventilação geral diluidora obtida mecanicamente e ligada a saída de ar

O sistema de ventilação geral diluidora obtida mecanicamente proposto na seção anterior pode não ser viável em decorrência da grande área dos galpões ou pela alta concentração de poluentes no recinto.

Isso ocorre, pois, a vazão proveniente dos ventiladores pode não ser suficiente para garantir a diluição dos poluentes ou a vazão demandada pode ser inviável por ser grande demais.

Nesse caso, pode se combinar esse sistema de ventilação com saídas de ar objetivando a “expulsão” de poluentes de dentro do edifício para o ambiente exterior. Um exemplo desse mecanismo é a combinação de um ventilador exaustor com uma chaminé de saída localizada no topo da estrutura.

A Figura 5.8 representa um esquema do sistema de ventilação diluidora obtida mecanicamente e ligada a uma chaminé.

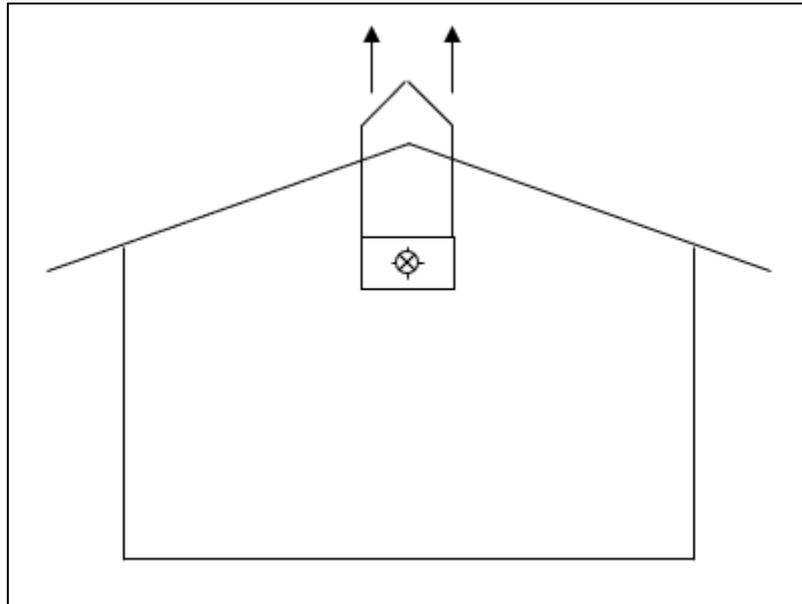


Figura 5.8 – Esquema de configuração do sistema de ventilação geral diluidora obtida mecanicamente e ligada a saída de ar.

Apesar da chaminé favorecer a saída de poluentes gasosos de menor densidade, o sistema proposto ainda não é recomendável quando houver a geração de poluentes de alta toxicidade.

As saídas de ar promovem a redução da concentração de poluentes no interior do edifício, de forma a reduzir a vazão necessária para garantir a diluição dos poluentes internos até um valor de concentração confortável. A necessidade de uma vazão menor favorece a viabilidade do projeto.

Além disso, recomenda-se o uso da saída de ar no formato de uma chaminé para a preservação dos produtos estocados com relação a incidência de luz solar, ventos, umidade e mudanças de temperatura.

5.3. COMPOSIÇÃO DOS SISTEMAS E CUSTOS ASSOCIADOS

Nessa seção será apresentado a precificação dos cenários de sistemas de controle da poluição atmosférica bem como um resumo de suas partes.

A Tabela 5.16 apresenta os custos de aquisição das tubulações de cada cenário, estimados com base no peso de cada trecho da tubulação. Os custos envolvidos no serviço de montagem dos captores e tubulação varia e deve ser orçado diretamente com prestadores desse serviço.

Considerou-se o preço de R\$ 10,00 para o Kg de dutos e com base nos valores referenciais de fabricantes. Os Apêndices A.2 e B.2 exibem o diâmetro, comprimento e espessura de cada duto, possibilitando o cálculo do peso.

Tabela 5.16 – Custos de aquisição das tubulações e captores de cada cenário.

	Peso	Tubulações	Área	Captores
Cenário 1.A	4.775,40 Kg	R\$ 47.775,40	25,45 m ²	R\$ 6.362,50
Cenário 1.B	6.525,09 Kg	R\$ 65.250,90	25,45 m ²	R\$ 6.362,50
Cenário 1.C	6.080,42 Kg	R\$ 60.804,20	25,45 m ²	R\$ 6.362,50
Cenário 2.A	266,69 Kg	R\$ 2.666,90	13,97 m ²	R\$ 3.492,50
Cenário 2.B	266,69 Kg	R\$ 2.666,90	13,97 m ²	R\$ 3.492,50
Cenário 2.C	317,49 Kg	R\$ 3.174,90	13,97 m ²	R\$ 3.492,50

A Tabela 5.17 apresenta os custos de aquisição e implementação dos equipamentos de controle e ventiladores de cada cenário. Os custos relacionados a aquisição dos equipamentos de controle e ventiladores, somados ao custo de implementação dos equipamentos, foram baseados nos valores utilizados em trabalhos acadêmicos que também dimensionaram ciclones e filtros de mangas (FURIERI; CASTILHO, 2009).

Tabela 5.17 – Custos de aquisição e implementação de cada cenário.

	Equipamento de Controle	Ventilador	
Cenário 1.A	Ciclone	R\$ 70.000,00	R\$ 25.000,00
Cenário 1.B	Filtro de Mangas	R\$ 190.000,00	R\$ 35.000,00
Cenário 1.C	Ciclone e Filtro de Mangas	R\$ 260.000,00	R\$ 45.000,00
Cenário 2.A	Ciclone	R\$ 30.000,00	R\$ 9.000,00
Cenário 2.B	Filtro de Mangas	R\$ 100.000,00	R\$ 10.000,00
Cenário 2.C	Ciclone e Filtro de Mangas	R\$ 130.000,00	R\$ 12.000,00

Além dos custos de aquisição e implementação, devem ser levados em conta os custos de operação dos sistemas. Os custos de operação são equivalentes ao consumo energético decorrentes do funcionamento do sistema. O consumo energético será calculado com base na potência requerida pelo ventilador exaustor de cada cenário.

Considera-se um tempo de funcionamento do sistema de 8 h/dia e o preço do kWh como sendo R\$ 0,557 conforme estipulado pela EDP-ES. A Tabela 5.18 apresenta a potência requerida e o custo de operação de cada cenário.

Tabela 5.18 – Custos de operação de cada cenário.

Cenário 1.A		Cenário 1.B	
Potência requerida	26,63 kW	Potência requerida	53,99 kW
Consumo anual	77759,60 kW	Consumo anual	157650,80 kW
Custo de operação	R\$ 43.312,10	Custo de operação	R\$ 87.811,00

Cenário 1.C		Cenário 2.A	
Potência requerida	79,14 kW	Potência requerida	1,55 kW
Consumo anual	231088,80 kW	Consumo anual	4526,00 kW
Custo de operação	R\$ 128.716,46	Custo de operação	R\$ 2.520,98

Cenário 2.B		Cenário 2.C	
Potência requerida	2,71 kW	Potência requerida	4,13 kW
Consumo anual	7913,20 kW	Consumo anual	12059,60 kW
Custo de operação	R\$ 4.407,65	Custo de operação	R\$ 6717,19

A Tabela 5.19 apresenta os custos de manutenção atribuídos aos sistemas de controle da poluição atmosférica. Considerou-se o intervalo de troca das mangas e o preço unitário das mangas como 1 ano e R\$ 50,00, respectivamente.

Para os cenários que envolvem sistemas compostos por ciclones foram arbitrados valores para as manutenções básicas e eventuais reposições de peças que esse tipo de equipamento.

Tabela 5.19 – Custos de manutenção de cada cenário.

Cenário 1.A		Cenário 1.B	
Intervalo de troca	1 ano	Intervalo de troca	1 ano
Custo anual	R\$ 6.000,00	Qntd. de Mangas	526
		Custo anual	R\$ 26.300,00

Cenário 1.C		Cenário 2.A	
Intervalo de troca	1 ano	Intervalo de troca	1 ano
Qntd. de Mangas	526	Custo anual	R\$ 2.000,00
Custo anual	R\$ 32.300,00		

Cenário 2.B		Cenário 2.C	
Intervalo de troca	1 ano	Intervalo de troca	1 ano
Qntd. de Mangas	27	Qntd. de Mangas	27
Custo anual	R\$ 1.350,00	Custo anual	R\$ 3.350,00

5.4. ANÁLISE ECONÔMICA DOS CENÁRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Os cenários propostos para os dois sistemas de ventilação local exaustora dimensionados possuem diferentes custos de implementação e de operação, além de produzirem resultados diferentes devido a concentração de MP na vazão de saída.

Os benefícios da instalação de um sistema de despoeiramento decorrem da eficiência de coleta estimada e da melhoria na qualidade do ar. A avaliação dos cenários deve levar em consideração o custo/benefício, uma opção de maior eficiência de coleta nem sempre tem o seu custo justificável.

As Tabelas 5.20 e 5.21 apresentam um resumo dos custos gerais para todos os cenários dimensionados. A Tabela 5.22 exibe a concentração de material na vazão de saída do sistema de cada cenário dimensionado.

Tabela 5.20 – Custos de implementação e de operação anual para o Cenário 1.

	Cenário 1.A	Cenário 1.B	Cenário 1.C
Captore	6.362,50	6.362,50	6.362,50
Dutos	47.775,40	65.250,90	60.804,20
Ciclones	70.000,00	-	70.000,00
Filtro de Mangas	-	190.000,00	190.000,00
Ventilador	25.000,00	35.000,00	45.000,00
Total	R\$ 149.137,90	R\$ 296.613,40	R\$ 372.166,70

Custos de operação anuais			
Operação	43.312,10	87.811,00	128.716,46
Manutenção	6.000,00	26.300,00	32.300,00
Total	R\$ 49.312,10	R\$ 114.111,00	R\$ 161.016,46

Tabela 5.21 – Custos de implementação e de operação anual para o Cenário 2.

	Cenário 2.A	Cenário 2.B	Cenário 2.C
Captore	3.492,50	3.492,50	3.492,50
Dutos	2.666,90	2.666,90	3.174,90
Ciclones	30.000,00	-	30.000,00
Filtro de Mangas	-	100.000,00	100.000,00
Ventilador	9.000,00	10.000,00	12.000,00
Total	R\$ 45.159,40	R\$ 116.159,40	R\$ 148.667,40

Custos de operação anuais			
Operação	2.520,98	4.407,65	6717,19
Manutenção	2.000,00	1.350,00	3.350,00
Total	R\$ 4.520,98	R\$ 5.757,65	R\$ 10.067,19

Tabela 5.22 – Concentração de material particulado na saída do sistema para cada cenário.

Concentração de MP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
Cenário 1.A	4,91
Cenário 1.B	6,99
Cenário 1.C	0,05
Cenário 2.A	21,69
Cenário 2.B	134,24
Cenário 2.C	0,22

Conforme explicado nas seções 3.4 e 4.4, o método para análise de viabilidade econômica dos cenários propostos será o método do Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

As Tabelas 5.23 e 5.24 apresentam os valores do custo anual uniforme para cada cenário propostos. Foi considerado a taxa de juros de 9% ao ano com base na taxa SELIC para o início do ano de 2022.

Tabela 5.23 – Valores do custo anual uniforme para o cenário 1, considerando taxa de juros de 9%.

Período (anos)	Custo Anual Uniforme (R\$)		
	Cenário 1.A	Cenário 1.B	Cenário 1.C
10	R\$ 72.551,00	R\$ 160.329,00	R\$ 219.008,00
20	R\$ 65.650,00	R\$ 146.604,00	R\$ 201.786,00
30	R\$ 63.829,00	R\$ 142.982,00	R\$ 197.242,00
40	R\$ 63.176,00	R\$ 141.684,00	R\$ 195.613,00

No caso do Cenário 1, observa-se que as concentrações de MP na vazão de saída dos três sistemas propostos apresentaram resultados satisfatórios, sendo o resultado do Cenário 1.C extremamente satisfatório.

Os custos de investimento e operação do Cenário 1.C são superiores as outras alternativas, de tal maneira que o sistema só seria justificável se fosse necessário atingir concentrações de MP quase nulas na vazão de saída.

Os Cenários 1.A e 1.B resultaram em concentrações muito próximas na vazão de saída, no entanto, os custos de investimento e operação do Cenário 1.B são mais do que o dobro do Cenário 1.A.

Por ser tratar de um material grosseiro, o ciclone proposto no Cenário 1.A representou uma alternativa mais eficiente, e de menor custo, do que o filtro de mangas proposto no Cenário 1.B.

Tabela 5.24 – Valores do custo anual uniforme para o cenário 2, considerando taxa de juros de 9%.

Período (anos)	Custo Anual Uniforme (R\$)		
	Cenário 2.A	Cenário 2.B	Cenário 2.C
10	R\$ 11.558,00	R\$ 23.858,00	R\$ 33.233,00
20	R\$ 9.468,00	R\$ 18.483,00	R\$ 26.353,00
30	R\$ 8.917,00	R\$ 17.064,00	R\$ 24.538,00
40	R\$ 8.719,00	R\$ 16.556,00	R\$ 23.887,00

No caso do Cenário 2, observa-se que as concentrações de MP na vazão de saída dos sistemas propostos no Cenário 2.A e 2.C apresentaram resultados satisfatórios, sendo o resultado do Cenário 2.C extremamente satisfatório.

Por se tratar de um material grosseiro e com alta concentração de MP na vazão de entrada do equipamento de controle proposto, o Cenário 2.B não apresentou eficiência de remoção de MP suficiente para ser considerado satisfatório.

Os custos de investimento e operação do Cenário 2.C são superiores em relação ao Cenário 2.A, de tal maneira que o sistema só seria justificável se fosse necessário atingir concentrações de MP quase nulas na vazão de saída.

O Cenário 2.A apresentou remoção de MP suficiente para ser considerado satisfatório, além de ter o menor custo de investimento e operação dentre todas as alternativas propostas para este cenário.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou o diagnóstico dos sistemas de ventilação industrial e elaborou alternativas de melhoria sobre diferentes cenários em uma unidade industrial produtora de café.

Ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, foram realizadas visitas técnicas à unidade industrial escolhida com o objetivo de identificar pontos de emissão de poluentes e situações problemáticas de controle da qualidade do ar.

Durante a elaboração dos cenários de melhoria, percebeu-se a necessidade do conhecimento de vasta variedade de informações acerca da unidade industrial e do processo produtivo para o efetivo dimensionamento dos sistemas de controle da poluição do ar.

Através de informações de monitoramento das chaminés e de consumo de combustíveis fornecidas pelo próprio empreendimento, além de referências da literatura, como o capítulo 9.13.2 da US EPA, foi desenvolvido um inventário de emissões atmosféricas com ano base de 2020.

O diagnóstico da unidade industrial revelou três etapas do processo produtivo de interesse para o controle da poluição atmosférica:

- Recebimento de material bruto;
- Triagem de grãos;
- Empacotamento e armazenamento de grãos.

Na etapa de recebimento de material bruto e triagem de grãos, foram observados sistemas de controle já existentes, no entanto, também foram observadas falhas ou possibilidades de melhoria nestes sistemas. Foram propostas três alternativas de melhoria para cada uma dessas duas etapas.

A análise econômica dos diferentes cenários de melhoria apontou o uso do equipamento de controle ciclone como sendo a opção mais adequada nas duas etapas. Isso se deve principalmente ao diâmetro grosseiro das partículas emitidas durante as atividades e pelo menor custo de aquisição e operação deste tipo de equipamento.

A eficiência de remoção de material particulado obtida para os ciclones dimensionados para as duas etapas foi superior a 99%. A partir da eficiência de remoção e da vazão de projeto, foi estimada uma concentração de material particulado na saída dos sistemas de 4,91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o recebimento de material bruto e 21,69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para a triagem de grãos.

O custo de implementação do cenário escolhido para o recebimento de material bruto foi de R\$ 139.449,70, com custo operacional anual de R\$ 49.312,10, enquanto que para o cenário escolhido para a triagem de grãos, o custo de implementação foi de R\$ 44.651,40, com custo operacional anual de R\$ 4.520,98.

A instalação do sistema de ventilação industrial proposto, além de providenciar reduções nas emissões de poluentes e melhoria na qualidade do ar interno do ambiente industrial, deve contribuir para os indicadores ambientais e de governança do empreendimento.

Melhores indicadores contribuem para a imagem da empresa, para a redução de riscos, para melhoria na incidência de custos com multas e processos judiciais e no diálogo com os órgãos de controle e fiscalização.

Para a etapa de empacotamento e armazenamento de grãos, não foi possível elaborar sistemas de ventilação local exaustora pelo fato de as atividades operacionais serem realizadas em diferentes locais dentro dos galpões e não sendo necessariamente pontos fixos. Dessa forma, foram propostas quatro alternativas de melhoria de forma qualitativa.

As alternativas de melhoria de forma qualitativa se basearam em sistemas de ventilação gerais, por vias de entrada e exaustão de ar naturais, por diluição dos contaminantes no ar através de ventilador, ou através da combinação desses métodos.

Para estudos posteriores na mesma unidade industrial ou em outros processos industriais através da mesma metodologia, sugere-se:

- Dimensionamento de sistemas de ventilação geral para galpões de armazenamento de forma quantitativa;

- Realização de estudos relacionados a análise da qualidade do ar interno para os galpões de armazenamento do produto final, onde ocorrem diversas atividades de movimentação de material;
- Aprofundamento no dimensionamento de lavadores de gases, incluindo a totalidade do sistema de ventilação e a avaliação econômica.

7. REFERÊNCIAS

ABULUDE, Francis Olawale. Particulate Matter: An Approach To Air Pollution. n. April, p. 1–14, 2016. Disponível em: <www.preprints.org>.

ACGIH. **Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice**. [S.l: s.n.], 1998. v. 552.

ACGIH. **Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice**. [S.l: s.n.], 2019.

BAO, L. et al. Influence of fibers on the dust dislodgement efficiency of bag filters. **Textile Research Journal**, v. 84, n. 7, p. 764–771, 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução CONAMA Nº 382/2006. Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. [S.l: s.n.], 2006

_____. **Resolução CONAMA Nº 491/2018. Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. [S.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>>. , 2018

CRUZ, Lícia P. S. et al. Assessment of BTEX Concentrations in Air Ambient of Gas Stations Using Passive Sampling and the Health Risks for Workers. **Journal of Environmental Protection**, v. 08, n. 01, p. 12–25, 2017.

DAVID COOPER, C; ALLEY, F.C. **Air Pollution Control a Design Approach**. . [S.l: s.n.], 2002

DUARTE, Cristiani Luna Gomes. Método Do Custo Anual Uniforme Equivalente Como Ferramenta Para a Substituição. p. 1–10, 2007.

EEA. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013: Technical guidance to prepare national emission inventories. **EEA Technical Report**, n. 12/2013, p. 23, 2019. Disponível em: <<http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>>.

EPA, US. AP 42, Introduction, Volume I. **AP 42, Introduction, Volume I**, p. 1–10, 1995.

FERREIRA, JOÃO VITOR APOLINARIO. **Lavadores De Gases Na Indústrias : Uma Breve Revisão Sobre Os Impactos Da Sua Utilização No Controle Da Poluição Atmosférica , Atendimento a Legislação.** 2018. 2018.

FURIERI, Bruno; CASTILHO, Lorena Beccalli D E. **Elaboração De Projetos De Aperfeiçoamento Do Sistema De Controle De Material Particulado Em Uma Unidade Industrial: Processamento Final De Cimento Portland.** 2009. 2009.

GLOESS, A. N. et al. On-line analysis of coffee roasting with ion mobility spectrometry–mass spectrometry (IMS–MS). **International Journal of Mass Spectrometry**, v. 424, p. 49–57, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijms.2017.11.017>>.

GOMES, Herber Pimentel. **Avaliação econômica: eficiência energética.** [S.l: s.n.], 2014.

IEMA. **Inventário de Emissões Atmosféricas Da Região Da Grande Vitória.** . [S.l: s.n.], 2019.

_____. **Relatório da Qualidade do Ar - Grande Vitória - 2018.** . [S.l: s.n.], 2018.

JARAMILLO OTÁLVARO, Sergio Emilio; OSORIO SARAZ, Jairo Alexander; CORREA LONDOÑO, Guillermo Antonio. Emission and fixation of greenhouse gases in potential specialty coffee production zones in Antioquia-Colombia. **Revista Facultad Nacional de Agronomia Medellin**, v. 70, n. 3, p. 8341–8350, 2017.

LANG, Aline Eloyse. As Ferrovias No Brasil E Avaliação Econômica De Projetos : Uma Aplicação Em Projetos. p. 154, 2007.

LEBOUF, Ryan F.; ALDRIDGE, Michael. Carbon monoxide emission rates from roasted whole bean and ground coffee. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 69, n. 1, p. 89–96, 2019.

LIM, Loong Tak; WANG, Xiuju. Effect of roasting conditions on carbon dioxide degassing behavior in coffee. **Food Research International**, v. 61, p. 144–151, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.027>>.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**. [S.l: s.n.], 1990.

MITCHELL, Clifford S. et al. Current state of the science: Health effects and indoor environmental quality. **Environmental Health Perspectives**, v. 115, n. 6, p. 958–964, 2007.

NOPONEN, Martin R.A. et al. Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 151, p. 6–15, 2012.

NOVAES, Fábio Junior Moreira et al. New approaches to monitor semi-volatile organic compounds released during coffee roasting using flow-through/active sampling and comprehensive two-dimensional gas chromatography. **Food Research International**, v. 119, n. August 2018, p. 349–358, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.02.009>>.

OLIVEIRA, Beatriz Fatima Alves de; IGNOTTI, Eliane; HACON, Sandra S. A systematic review of the physical and chemical characteristics of pollutants from biomass burning and combustion of fossil fuels and health effects in Brazil Revisão sistemática das características físico- químicas dos poluentes atmosféri. **Cad Saude Publica**, v. 27, n. 9, p. 1678–1698, 2011.

PASQUALI, GUILHERME. **ANÁLISE, PROJETO E CONSTRUÇÃO DE VENTILADORES CENTRÍFUGOS BASEADO EM MODOS DE VIBRAÇÃO**. 2018. 79 f. 2018.

PRATES, Lucas Paquiela. **Estudo da eficiência de coleta de material particulado em um lavador de gases típico**. 2014. 54 p f. 2014.

RUIZ, Macarena San Martin; REISER, Martin; KRANERT, Martin. Composting and methane emissions of coffee by-products. **Atmosphere**, v. 12, n. 9, 2021.

SANTANA, Franciele O. et al. Formaldehyde and acetaldehyde in the atmosphere of Salvador-Ba, Brazil, using passive sampling. **Microchemical Journal**, v. 134, p. 78–86, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2017.04.032>>.

SEINFELD, John H.; PANDIS, Spyros N. **Pandis, S. and, 2006. atmo.**

https://doi.org/10.1007/978-3-662-04540-4_16. [S.l: s.n.], 2006.

US EPA. AP 42, Fifth Edition, Volume I Chapter 9: Food and Agricultural Industries. **AP 42, Fifth Edition, Volume I Chapter 9: Food and Agricultural Industries**, n. 9, p. 1–7, 1995.

_____. AP 42, Section 6, Chapter 2: Wet Scrubbers for Particulate Matter. **AP 42, Section 6, Chapter 2: Wet Scrubbers for Particulate Matter**, 2002.

Disponível em: <<https://www3.epa.gov/ttn/catc1/dir1/cs6ch2.pdf>>.

VALLERO, Daniel. **Fundamentals of Air Pollution**. [S.l: s.n.], 2008.

VAN TRAN, Vinh; PARK, Duckshin; LEE, Young Chul. Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 8, 2020.

W.ACCHAR; DULTRA, E.J.V. Coffee industry in Brazil. **SpringerBriefs Appl. Sci. Technol.** [S.l: s.n.], 2015. v. 163. p. 23–30.

WBG. The World Bank Group Greenhouse Gas Emissions Inventory Management Plan. 2015. Disponível em: <www.worldbank.org>.

WHO. Air Quality Guidelines: Global Update 2005. **World Health Organization - Air Quality Guidelines**, n. October, 2006.

_____. **Air Quality Guidelines for Europe. World Health Organization - Air Quality Guidelines for Europe**. [S.l: s.n.], 2000.

8. APÊNDICES

Apêndice A.1

Este apêndice tem como objetivo expor as dimensões das placas e o cálculo da vazão do sistema captor enclausurante projetado para o recebimento de material bruto.

Para maiores detalhes deve-se consultar a planilha de dimensionamento de sistemas de ventilação local exaustora anexadas a este trabalho.

Com base na Tabela 3.13, que dispõe sobre a velocidade de captura conforme condições de dispersão do contaminante, foi adotado o valor de 1,5 m/s como velocidade de captura para a atividade de descarregamento de material bruto por caminhões.

Para o cálculo referente a área aberta total da estrutura enclausurante, foi considerado que o descarregamento será feito por um caminhão de 4 metros de altura e 2 metros de largura, além de uma folga de 50 centímetros de altura para possibilitar o içamento da caçamba e uma folga de 30 centímetros de largura para fins operacionais.

Dessa forma, a área aberta total da estrutura enclausurante pode ser calculada conforme:

$$AB = 2,5 \cdot 4,3 = 10,75 \text{ m}^2$$

A partir da área aberta total calculada e da velocidade de captura adotada, pode-se calcular a vazão de exaustão conforme a Equação 3.2.

$$Q = 12,9 \cdot 1,5 = 16,125 \text{ m}^3/\text{s} = 58050 \text{ m}^3/\text{h}$$

O formato das chapas que compõem o captor enclausurante pode ser observado na Figura 8.1.

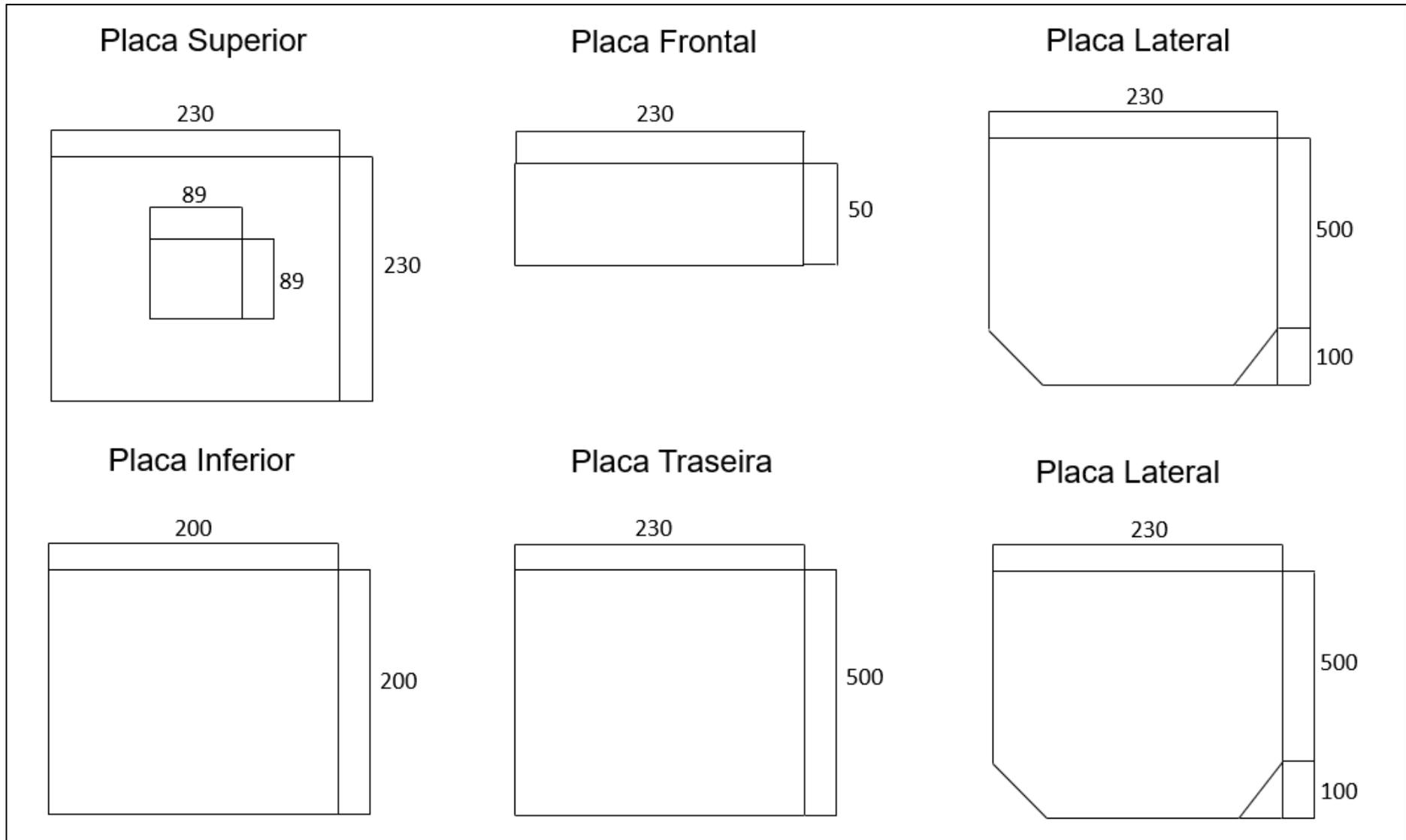


Figura 8.1 – Esquema de configuração do sistema enclausurante.

Apêndice A.2

Este apêndice tem como objetivo expor as dimensões e principais características do sistema de dutos que deverá ligar o sistema captor enclausurante exposto no Apêndice A.1 ao cenário de equipamentos de controle do Apêndice A.3 por meio de dutos que causem a menor perda de carga possível.

As espessuras foram adotadas com base nas Normas ANSI B.36.10 e B.36.19

Cenário 1.A

Os trechos 1-A e 2-A ligam o sistema captor enclausurante ao equipamento de controle enquanto o trecho 1-B liga o equipamento de controle ao ventilador de cada cenário. O trecho Chaminé liga a saída do ventilador a chaminé de saída do sistema.

A Figura 8.2 exhibe o traçado do sistema de dutos para o Cenário 1.A.

a) Trecho 1 – A

Vazão de exaustão – $Q = 16,125 \text{ m}^3/\text{s} = 58050 \text{ m}^3/\text{h}$

Velocidade do ar – $V = 20,54 \text{ m/s}$

Diâmetro da tubulação – $D = 1 \text{ m}$

Espessura – $C = 20 \text{ mm}$

Comprimento – $C = 0,5 \text{ m}$

Peso = 241,67 Kg

Perda de carga distribuída – $Pd = 2,54 \text{ Pa}$

Coefficiente K: Curva de 90 graus – $k1 = 0,25$

Perda de carga localizada: Curva de 90 graus – $Pl1 = 63,51 \text{ Pa}$

Coefficiente K: Entrada do captor – $k2 = 0,15$

Perda de carga localizada: Entrada do captor – $Pl2 = 38,11 \text{ Pa}$

Perda de carga total – P = 104,15 Pa

b) Trecho 2 – A

Vazão de exaustão – Q = 16,125 m³/s = 58050 m³/h

Velocidade do ar – V = 20,54 m/s

Diâmetro da tubulação – D = 1 m

Espessura – C = 20 mm

Comprimento – C = 4,38 m

Peso = 2117,03 Kg

Perda de carga distribuída – Pd = 22,25 Pa

Perda de carga total – P = 22,25 Pa

c) Trecho 1 – B

Vazão de exaustão – Q = 16,125 m³/s = 58050 m³/h

Velocidade do ar – V = 20,54 m/s

Diâmetro da tubulação – D = 1 m

Espessura – C = 20 mm

Comprimento – C = 3 m

Peso = 1450,02 Kg

Perda de carga distribuída – Pd = 15,24 Pa

Perda de carga total – P = 15,24 Pa

d) Trecho Chaminé

Vazão de exaustão – Q = 16,125 m³/s = 58050 m³/h

Velocidade do ar – V = 20,54 m/s

Diâmetro da tubulação – $D = 1\text{ m}$

Espessura – $C = 20\text{ mm}$

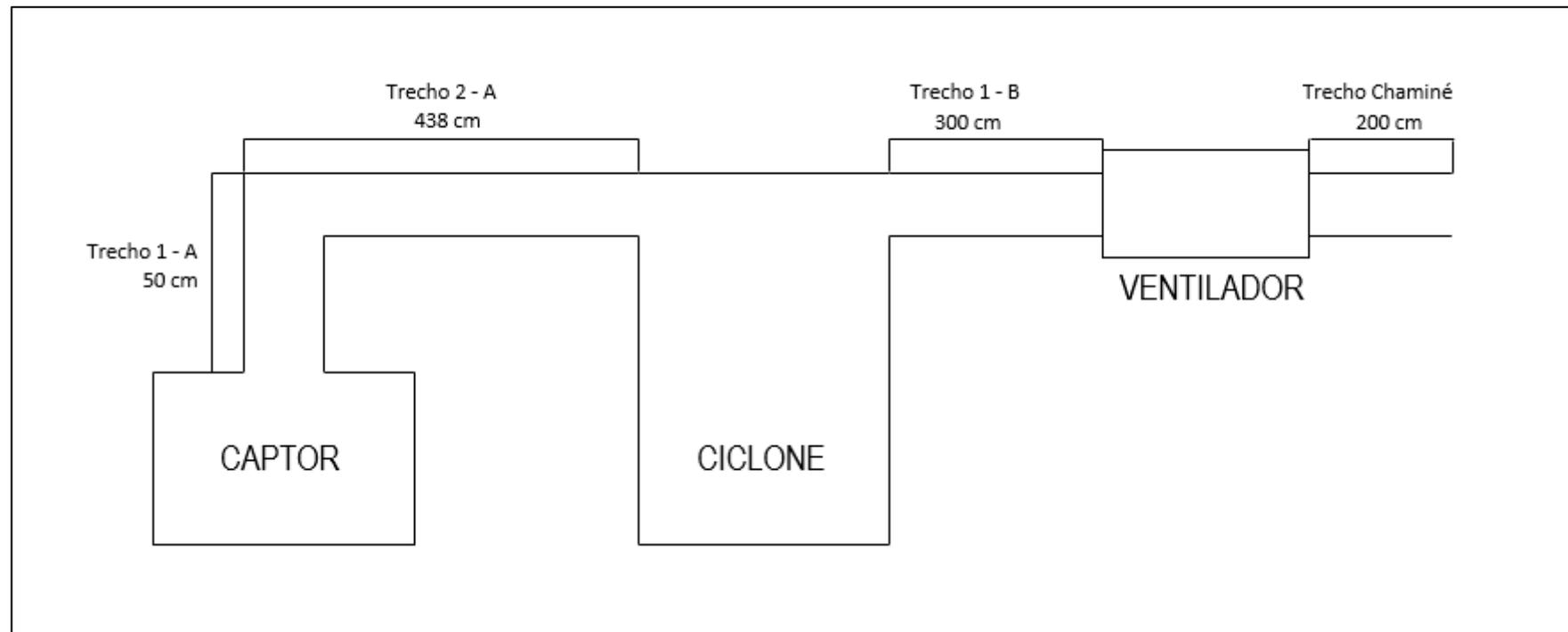
Comprimento – $C = 2\text{ m}$

Peso = $966,68\text{ Kg}$

Perda de carga distribuída – $Pd = 10,16\text{ Pa}$

Perda de carga total – $P = 10,16\text{ Pa}$

Figura 8.2 – Traçado do sistema de dutos para o Cenário 1.A.



Cenário 1.B

Os trechos 1-A e 2-A ligam o sistema captor enclausurante ao equipamento de controle enquanto o trecho 1-B liga o equipamento de controle ao ventilador de cada cenário. O trecho Chaminé liga a saída do ventilador a chaminé de saída do sistema.

A Figura 8.3 exibe o traçado do sistema de dutos para o Cenário 1.B.

a) Trecho 1 – A

$$\text{Vazão de exaustão} - Q = 16,125 \text{ m}^3/\text{s} = 58050 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Velocidade do ar} - V = 20,54 \text{ m/s}$$

$$\text{Diâmetro da tubulação} - D = 1 \text{ m}$$

$$\text{Espessura} - C = 20 \text{ mm}$$

$$\text{Comprimento} - C = 0,5 \text{ m}$$

$$\text{Peso} = 241,67 \text{ Kg}$$

$$\text{Perda de carga distribuída} - Pd = 2,54 \text{ Pa}$$

$$\text{Coeficiente K: Curva de 90 graus} - k1 = 0,25$$

$$\text{Perda de carga localizada: Curva de 90 graus} - Pl1 = 63,51 \text{ Pa}$$

$$\text{Coeficiente K: Entrada do captor} - k2 = 0,15$$

$$\text{Perda de carga localizada: Entrada do captor} - Pl2 = 38,11 \text{ Pa}$$

$$\text{Perda de carga total} - P = 104,15 \text{ Pa}$$

b) Trecho 2 – A

$$\text{Vazão de exaustão} - Q = 16,125 \text{ m}^3/\text{s} = 58050 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Velocidade do ar} - V = 20,54 \text{ m/s}$$

$$\text{Diâmetro da tubulação} - D = 1 \text{ m}$$

Espessura – C = 20 mm

Comprimento – C = 8,25 m

Peso = 3866,72 Kg

Perda de carga distribuida – Pd = 41,92 Pa

Perda de carga total – P = 41,92 Pa

c) Trecho 1 – B

Vazão de exaustão – Q = 16,125 m³/s = 58050 m³/h

Velocidade do ar – V = 20,54 m/s

Diâmetro da tubulação – D = 1 m

Espessura – C = 20 mm

Comprimento – C = 3 m

Peso = 1450,02 Kg

Perda de carga distribuida – Pd = 15,24 Pa

Perda de carga total – P = 15,24 Pa

d) Trecho Chaminé

Vazão de exaustão – Q = 16,125 m³/s = 58050 m³/h

Velocidade do ar – V = 20,54 m/s

Diâmetro da tubulação – D = 1 m

Espessura – C = 20 mm

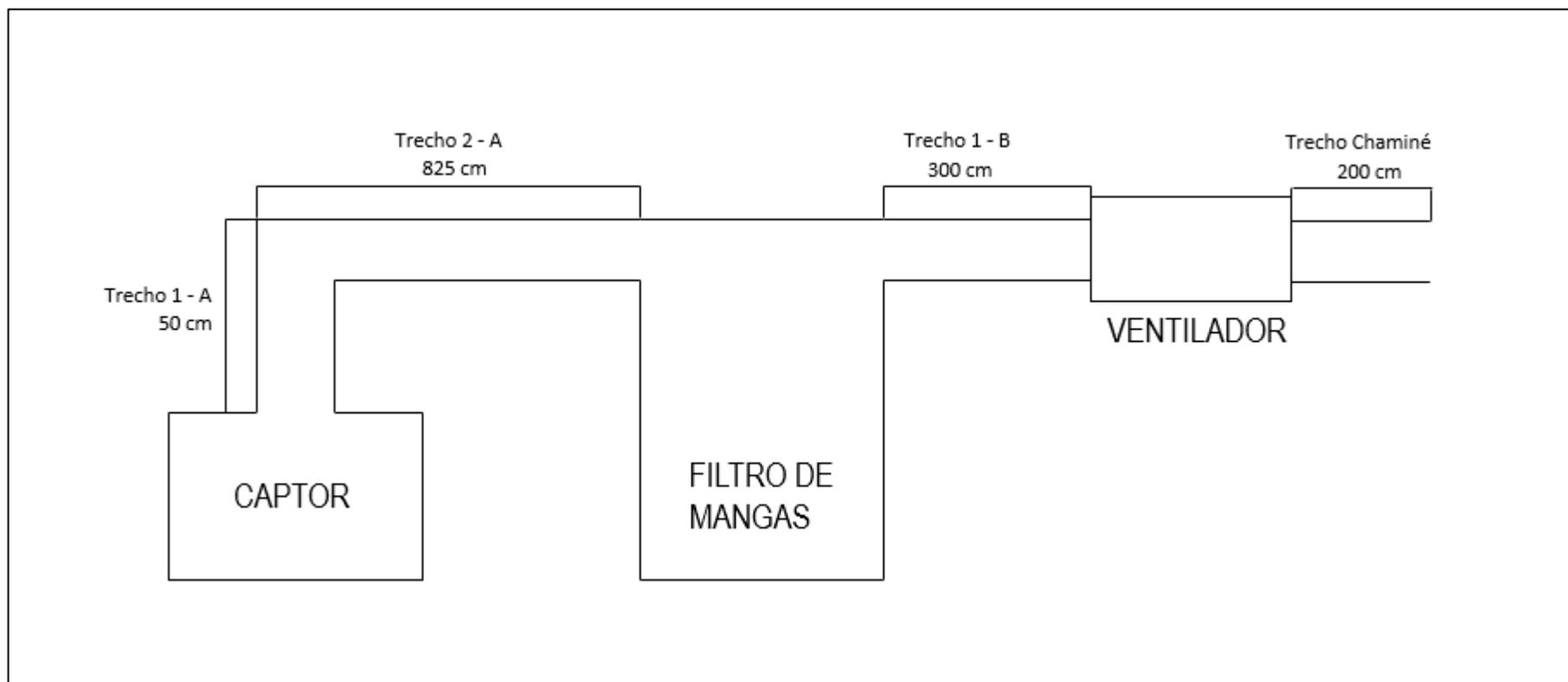
Comprimento – C = 2 m

Peso = 966,68 Kg

Perda de carga distribuida – Pd = 10,16 Pa

Perda de carga total – P = 10,16 Pa

Figura 8.3 – Traçado do sistema de dutos para o Cenário 1.B.



Cenário 1.C

Os trechos 1-A e 2-A ligam o sistema captor enclausurante ao equipamento de controle, o trecho 1-C liga o ciclone ao filtro de mangas enquanto o trecho 1-B liga o filtro de mangas ao ventilador de cada cenário. O trecho Chaminé liga a saída do ventilador a chaminé de saída do sistema.

A Figura 8.4 exibe o traçado do sistema de dutos para o Cenário 1.C.

a) Trecho 1 – A

$$\text{Vazão de exaustão} - Q = 16,125 \text{ m}^3/\text{s} = 58050 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Velocidade do ar} - V = 20,54 \text{ m/s}$$

$$\text{Diâmetro da tubulação} - D = 1 \text{ m}$$

$$\text{Espessura} - C = 20 \text{ mm}$$

$$\text{Comprimento} - C = 0,5 \text{ m}$$

$$\text{Peso} = 241,67 \text{ Kg}$$

$$\text{Perda de carga distribuída} - Pd = 2,54 \text{ Pa}$$

$$\text{Coeficiente K: Curva de 90 graus} - k1 = 0,25$$

$$\text{Perda de carga localizada: Curva de 90 graus} - Pl1 = 63,51 \text{ Pa}$$

$$\text{Coeficiente K: Entrada do captor} - k2 = 0,15$$

$$\text{Perda de carga localizada: Entrada do captor} - Pl2 = 38,11 \text{ Pa}$$

$$\text{Perda de carga total} - P = 104,15 \text{ Pa}$$

b) Trecho 2 – A

$$\text{Vazão de exaustão} - Q = 16,125 \text{ m}^3/\text{s} = 58050 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Velocidade do ar} - V = 20,54 \text{ m/s}$$

$$\text{Diâmetro da tubulação} - D = 1 \text{ m}$$

Espessura – C = 20 mm

Comprimento – C = 4,38 m

Peso = 2117,03 Kg

Perda de carga distribuida – Pd = 5,08 Pa

Perda de carga total – P = 5,08 Pa

c) Trecho 1 – C

Vazão de exaustão – Q = 16,125 m³/s = 58050 m³/h

Velocidade do ar – V = 20,54 m/s

Diâmetro da tubulação – D = 1 m

Espessura – C = 20 mm

Comprimento – C = 2,7 m

Peso = 1305,02 Kg

Perda de carga distribuida – Pd = 2,54 Pa

Perda de carga total – P = 2,54 Pa

d) Trecho 1 – B

Vazão de exaustão – Q = 16,125 m³/s = 58050 m³/h

Velocidade do ar – V = 20,54 m/s

Diâmetro da tubulação – D = 1 m

Espessura – C = 20 mm

Comprimento – C = 3 m

Peso = 1450,02 Kg

Perda de carga distribuida – Pd = 2,54 Pa

Perda de carga total – $P = 2,54 \text{ Pa}$

d) Trecho Chaminé

Vazão de exaustão – $Q = 16,125 \text{ m}^3/\text{s} = 58050 \text{ m}^3/\text{h}$

Velocidade do ar – $V = 20,54 \text{ m/s}$

Diâmetro da tubulação – $D = 1 \text{ m}$

Espessura – $C = 20 \text{ mm}$

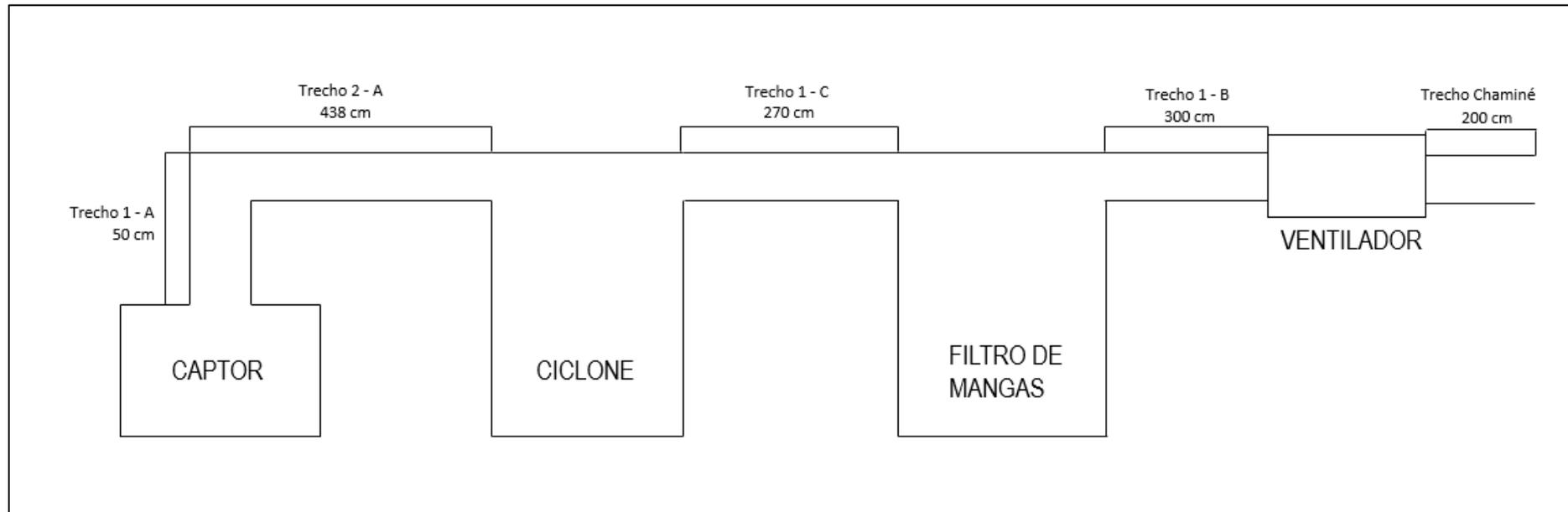
Comprimento – $C = 2 \text{ m}$

Peso = $966,68 \text{ Kg}$

Perda de carga distribuída – $Pd = 10,16 \text{ Pa}$

Perda de carga total – $P = 10,16 \text{ Pa}$

Figura 8.4 – Traçado do sistema de dutos para o Cenário 1.C.



Apêndice A.3

Este apêndice tem como objetivo expor as dimensões dos equipamentos de controle e do sistema de dutos projetados para os cenários 1.A, 1.B e 1.C para o recebimento de material bruto e as principais características envolvidas.

Para maiores detalhes deve-se consultar a planilha de dimensionamento de sistemas de ventilação local exaustora anexadas a este trabalho.

Cenário 1.A

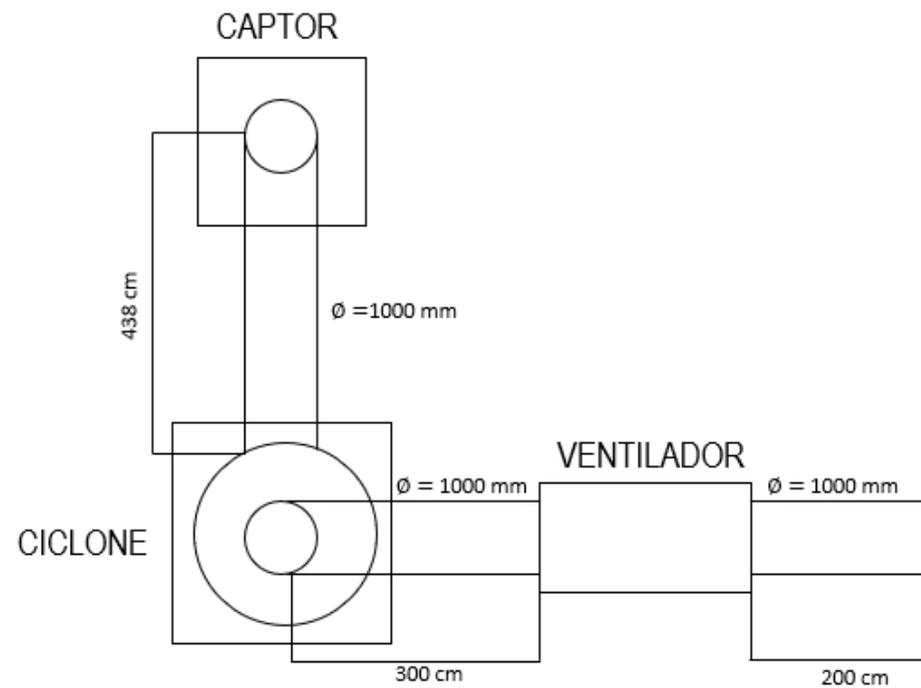
O projeto de dimensionamento de ciclone deste cenário, deverá ser ligado ao sistema captor enclausurante exposto no Apêndice A.1 por meio de dutos que causem a menor perda de carga possível.

A Tabela 8.1 apresenta as características do ciclone e do ventilador projetados para este cenário. Os detalhes das dimensões do ciclone, bem como do sistema de dutos que conecta o sistema captor enclausurante pode ser observada na Figura 8.5.

Tabela 8.1 – Características do ciclone e ventilador projetados.

Ciclone		Dimensões	
Razão D/D	1	D	3,01 m
Vazão	16,125 m ³ /s	H	1,51 m
Eficiência	99,30%	W	0,60 m
Perda de Carga	1217,78 Pa	D _e	1,51 m
Ventilador		S	1,51 m
Potência	26,63 kW	L _b	4,52 m
Vazão de Ar	16,23 m ³ /s	L _c	7,53 m
Pressão Estática	1377,00 Pa	D _d	1,13 m

Figura 8.5 – Configuração do equipamento de controle e do sistema de dutos.



Cenário 1.B

O projeto de dimensionamento de filtro de mangas deste cenário, deverá ser ligado ao sistema captor enclausurante exposto no Apêndice A.1 por meio de dutos que cause a menor perda de carga possível.

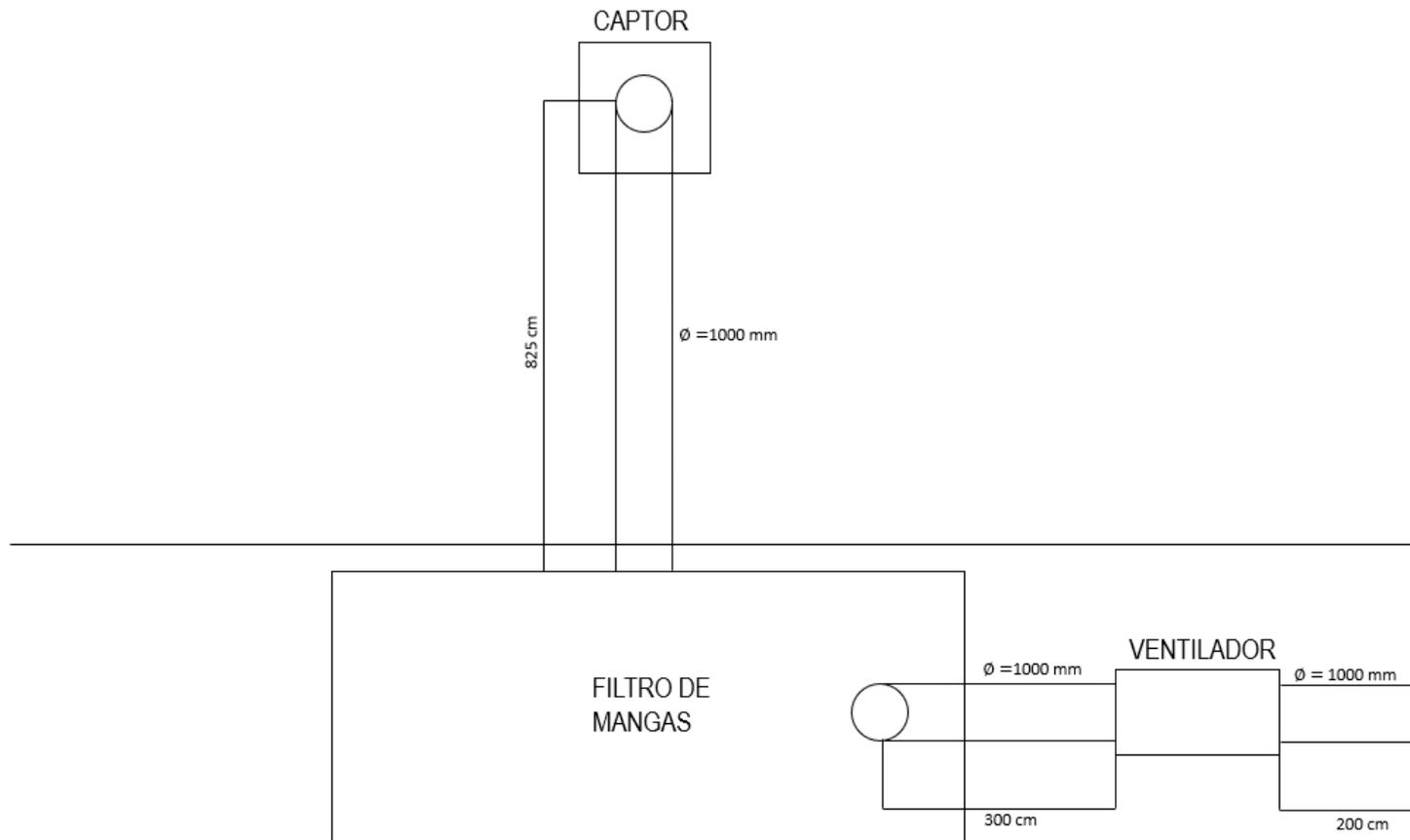
A Tabela 8.2 apresenta as características do filtro de mangas e do ventilador projetados para este cenário. Os detalhes das dimensões do filtro de mangas, bem como do sistema de dutos que conecta o sistema captor enclausurante pode ser observada na Figura 8.6.

As mangas utilizadas são do tipo Náilon e possuem altura de 3 metros e diâmetro de 0,13 m.

Tabela 8.2 – Características do filtro de mangas e ventilador projetados.

Filtro de mangas			
Área Filtrante	645 m ²	Mangas	526
Relação Ar/Pano	1,50 m/min	Altura da manga	3 m
Perda de Carga	2086,21 Pa	Diâmetro da manga	0,13 m
Ventilador			
	Potência		53,99 kW
	Vazão de Ar		17,42 m ³ /s
	Pressão Estática		2622,00 Pa

Figura 8.6 – Configuração do equipamento de controle e do sistema de dutos.



Cenário 1.C

O projeto de dimensionamento de filtro de mangas e ciclone deste cenário, deverá ser ligado ao sistema captor enclausurante exposto no Apêndice A.1 por meio de dutos que causem a menor perda de carga possível.

A Tabela 8.3 apresenta as características do filtro de mangas, ciclone e do ventilador projetados para este cenário. Os detalhes das dimensões dos equipamentos, bem como do sistema de dutos que conecta o sistema captor enclausurante pode ser observada na Figura 8.7.

As mangas utilizadas são do tipo Náilon e possuem altura de 3 metros e diâmetro de 0,13 m.

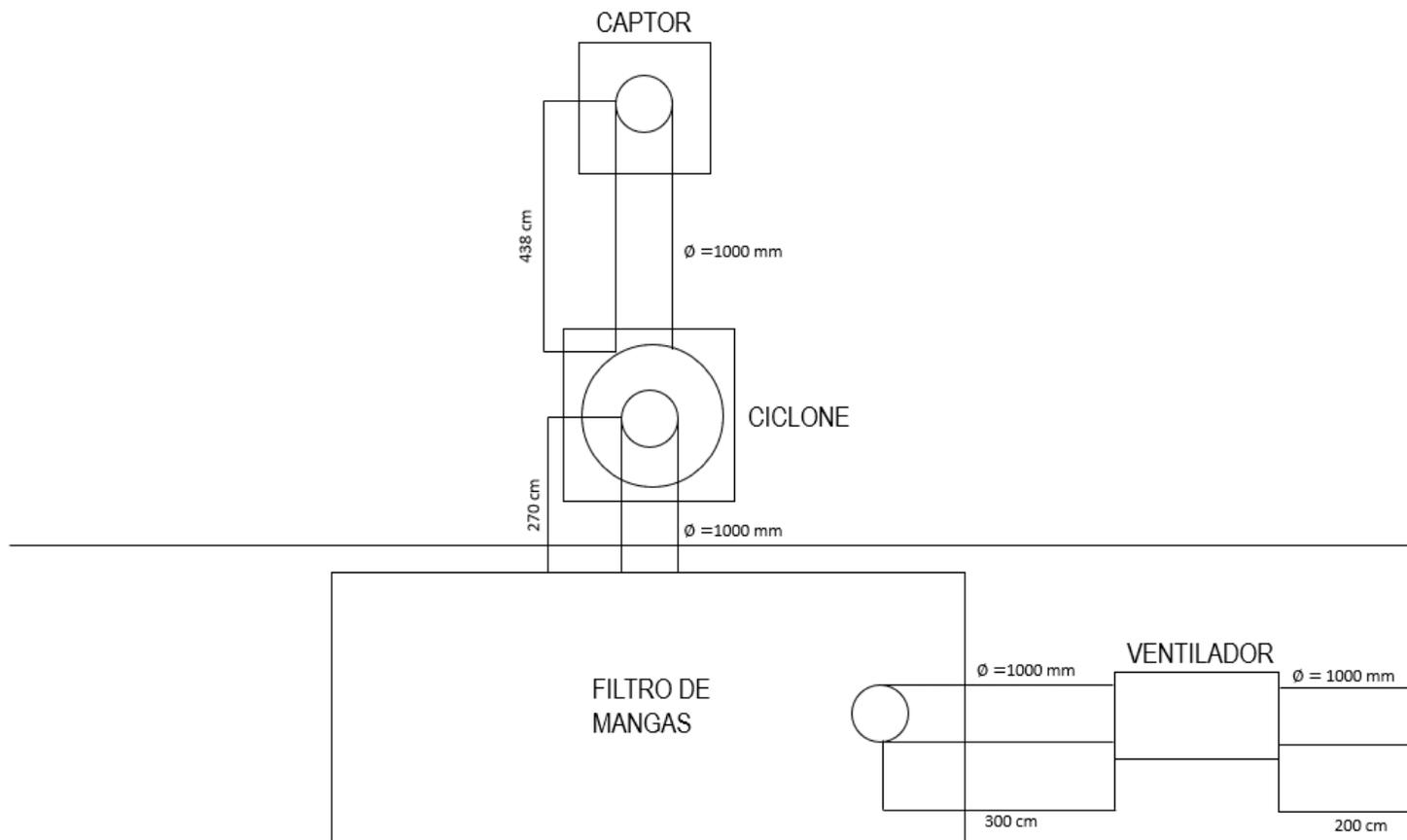
Tabela 8.3 – Características dos equipamentos e ventilador projetados.

Ciclone		Dimensões	
Razão D/D	1	D	3,01 m
		H	1,51 m
Vazão	16,125 m ³ /s	W	0,60 m
		D _e	1,51 m
Eficiência	99,30%	S	1,51 m
		L _b	4,52 m
Perda de Carga	1217,78 Pa	L _c	7,53 m
		D _d	1,13 m

Filtro de mangas			
Área Filtrante	645 m ²	Mangas	526
Relação Ar/Pano	1,50 m/min	Altura da manga	3 m
Perda de Carga	2086,21 Pa	Diâmetro da manga	0,13 m

Ventilador	
Potência	79,14 kW
Vazão de Ar	61696,00 m ³ /s
Pressão Estática	3908,00 Pa

Figura 8.7 – Configuração do equipamento de controle e do sistema de dutos.



Apêndice B.1

Este apêndice tem como objetivo expor as dimensões das placas e o cálculo da vazão do sistema captor enclausurante projetado para a triagem de grãos.

Para maiores detalhes deve-se consultar a planilha de dimensionamento de sistemas de ventilação local exaustora anexadas a este trabalho.

Com base na Tabela 3.13 que dispõe sobre a velocidade de captura conforme condições de dispersão do contaminante, foi adotado o valor de 2 m/s como velocidade de captura para a atividade de triagem de grãos.

Os cálculos a seguir são referentes a área aberta total da estrutura enclausurante conforme o exposto na Figura 8.8.

$$AB = 1,4 \cdot 0,3 = 0,42 \text{ m}^2$$

A partir da área aberta total calculada e da velocidade de captura adotada, pode-se calcular a vazão de exaustão conforme a Equação 3.2.

$$Q = 0,42 \cdot 2 = 0,84 \text{ m}^3/\text{s} = 3024 \text{ m}^3/\text{h}$$

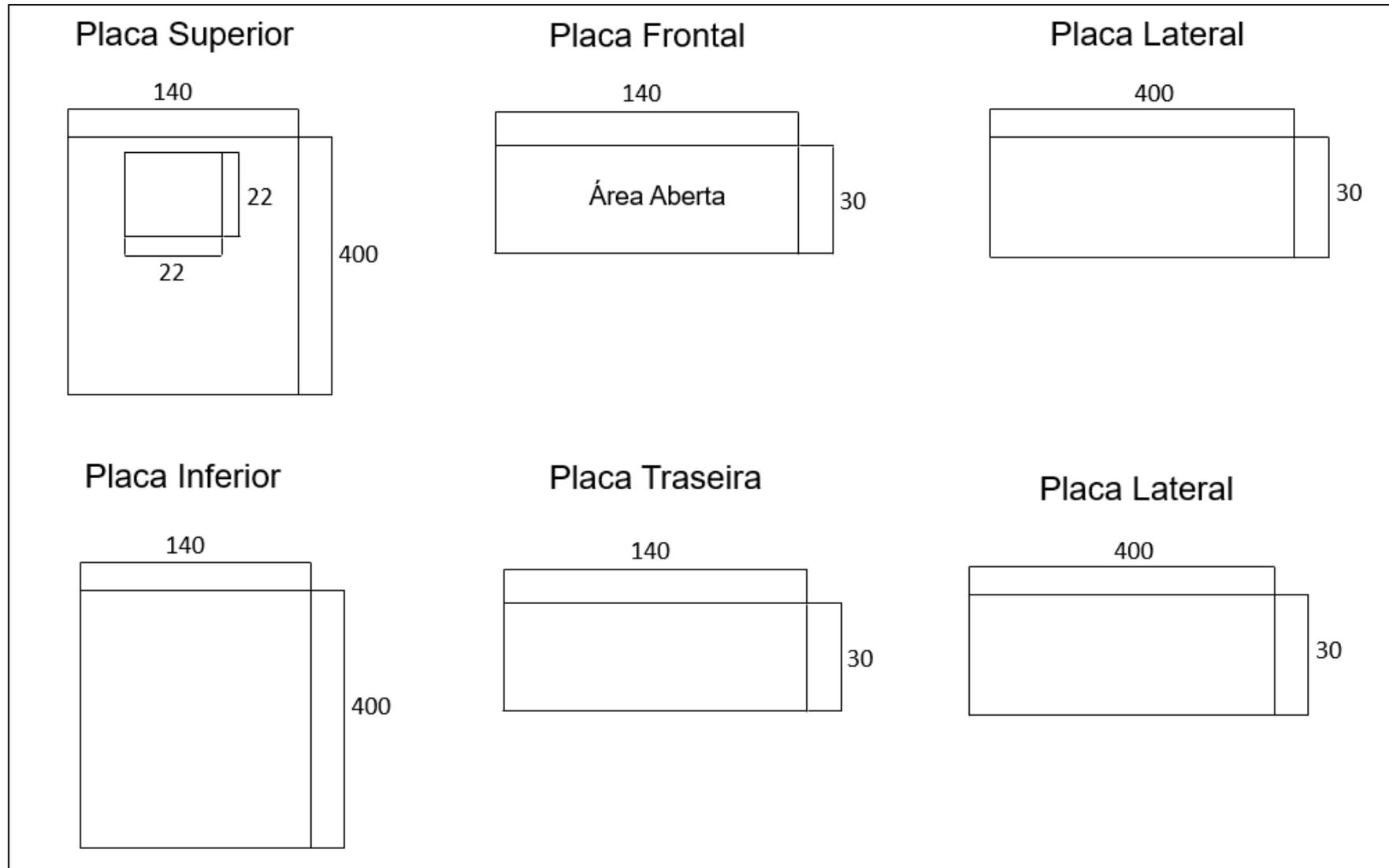


Figura 8.8 – Esquema de configuração do sistema enclausurante.

Apêndice B.2

Este apêndice tem como objetivo expor as dimensões e principais características do sistema de dutos que deverá ligar o sistema captor enclausurante exposto no Apêndice B.1 ao cenário de equipamentos de controle do Apêndice B.3 por meio de dutos que causem a menor perda de carga possível.

As espessuras foram adotadas com base nas Normas ANSI B.36.10 e B.36.19

Cenário 2.A

Os trechos 1-A e 2-A ligam o sistema captor enclausurante ao equipamento de controle enquanto o trecho 1-B liga o equipamento de controle ao ventilador de cada cenário. O trecho Chaminé liga a saída do ventilador a chaminé de saída do sistema.

A Figura 8.9 exhibe o traçado do sistema de dutos para o Cenário 2.A.

a) Trecho 1 – A

Vazão de exaustão – $Q = 0,84 \text{ m}^3/\text{s} = 3024 \text{ m}^3/\text{h}$

Velocidade do ar – $V = 17,12 \text{ m/s}$

Diâmetro da tubulação – $D = 0,25 \text{ m}$

Espessura – $C = 4,19 \text{ mm}$

Comprimento – $C = 0,5 \text{ m}$

Peso = 12,70 Kg

Perda de carga distribuída – $Pd = 2,54 \text{ Pa}$

Coefficiente K: Curva de 90 graus – $k1 = 0,25$

Perda de carga localizada: Curva de 90 graus – $Pl1 = 63,51 \text{ Pa}$

Coefficiente K: Entrada do captor – $k2 = 0,15$

Perda de carga localizada: Entrada do captor – $Pl2 = 38,11 \text{ Pa}$

Perda de carga total – $P = 104,15 Pa$

b) Trecho 2 – A

Vazão de exaustão – $Q = 0,84 m^3/s = 3024 m^3/h$

Velocidade do ar – $V = 17,12 m/s$

Diâmetro da tubulação – $D = 0,25 m$

Espessura – $C = 4,19 mm$

Comprimento – $C = 6 m$

Peso = $152,39 Kg$

Perda de carga distribuída – $Pd = 5,08 Pa$

Perda de carga total – $P = 5,08 Pa$

c) Trecho 1 – B

Vazão de exaustão – $Q = 0,84 m^3/s = 3024 m^3/h$

Velocidade do ar – $V = 17,12 m/s$

Espessura – $C = 4,19 mm$

Diâmetro da tubulação – $D = 0,25 m$

Comprimento – $C = 2 m$

Peso = $50,80 Kg$

Perda de carga distribuída – $Pd = 28,24 Pa$

Perda de carga total – $P = 28,24 Pa$

d) Trecho Chaminé

Vazão de exaustão – $Q = 0,84 m^3/s = 3024 m^3/h$

Velocidade do ar – $V = 17,12 m/s$

Espessura – C = 4,19 mm

Diâmetro da tubulação – D = 0,25 m

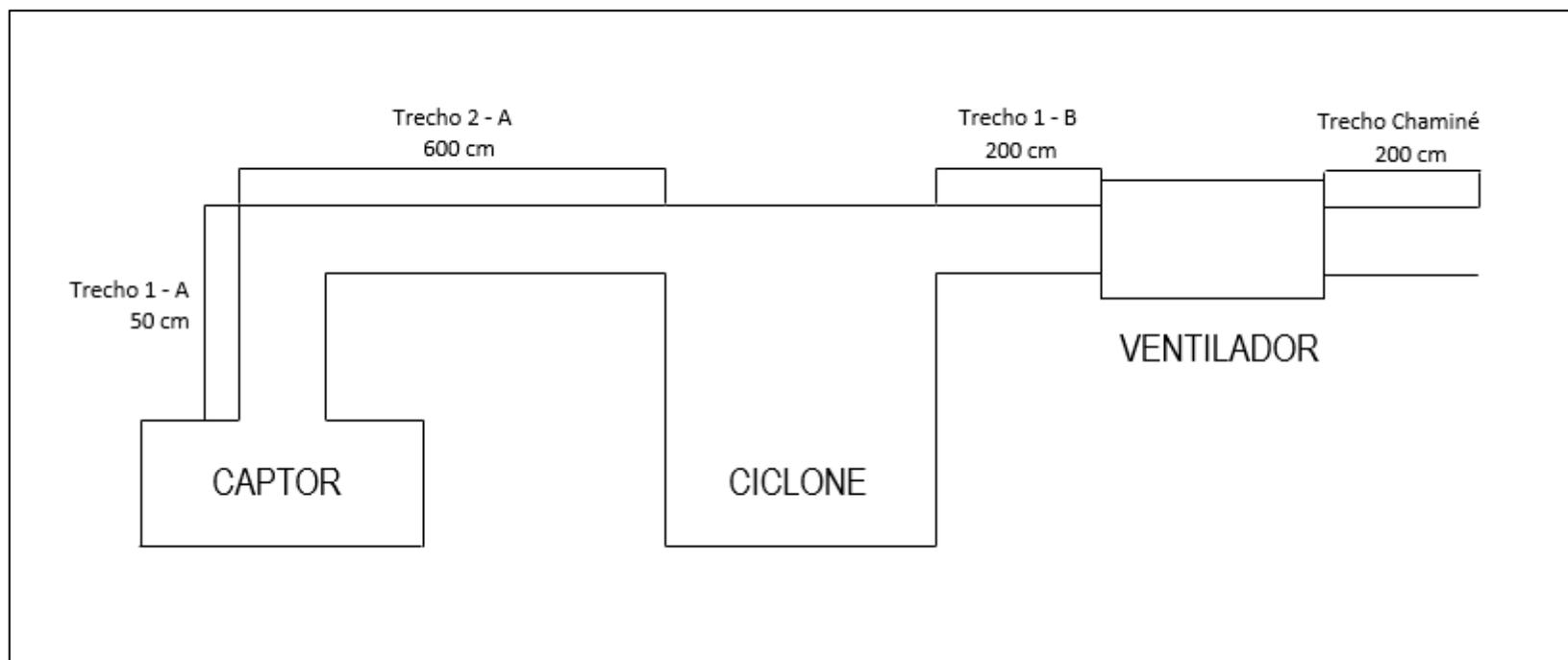
Comprimento – C = 2 m

Peso = 50,80 Kg

Perda de carga distribuida – Pd = 28,24 Pa

Perda de carga total – P = 28,24 Pa

Figura 8.9 – Traçado do sistema de dutos para o Cenário 2.A.



Cenário 2.B

Os trechos 1-A e 2-A ligam o sistema captor enclausurante ao equipamento de controle enquanto o trecho 1-B liga o equipamento de controle ao ventilador de cada cenário. O trecho Chaminé liga a saída do ventilador a chaminé de saída do sistema.

A Figura 8.10 exibe o traçado do sistema de dutos para o Cenário 2.B.

a) Trecho 1 – A

$$\text{Vazão de exaustão} - Q = 0,84 \text{ m}^3/\text{s} = 3024 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Velocidade do ar} - V = 17,12 \text{ m/s}$$

$$\text{Diâmetro da tubulação} - D = 0,25 \text{ m}$$

$$\text{Espessura} - C = 4,19 \text{ mm}$$

$$\text{Comprimento} - C = 0,5 \text{ m}$$

$$\text{Peso} = 12,70 \text{ Kg}$$

$$\text{Perda de carga distribuída} - Pd = 7,06 \text{ Pa}$$

$$\text{Coeficiente K: Curva de 90 graus} - k1 = 0,25$$

$$\text{Perda de carga localizada: Curva de 90 graus} - Pl1 = 44,12 \text{ Pa}$$

$$\text{Coeficiente K: Entrada do captor} - k2 = 0,15$$

$$\text{Perda de carga localizada: Entrada do captor} - Pl2 = 26,47 \text{ Pa}$$

$$\text{Perda de carga total} - P = 77,65 \text{ Pa}$$

b) Trecho 2 – A

$$\text{Vazão de exaustão} - Q = 0,84 \text{ m}^3/\text{s} = 3024 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Velocidade do ar} - V = 17,12 \text{ m/s}$$

$$\text{Diâmetro da tubulação} - D = 0,25 \text{ m}$$

Espessura – C = 4,19 mm

Comprimento – C = 6 m

Peso = 152,39 Kg

Perda de carga distribuida – Pd = 84,71 Pa

Perda de carga total – P = 84,71 Pa

c) Trecho 1 – B

Vazão de exaustão – Q = 0,84 m³/s = 3024 m³/h

Velocidade do ar – V = 17,12 m/s

Diâmetro da tubulação – D = 0,25 m

Espessura – C = 4,19 mm

Comprimento – C = 2 m

Peso = 50,80 Kg

Perda de carga distribuida – Pd = 28,24 Pa

Perda de carga total – P = 28,24 Pa

d) Trecho Chaminé

Vazão de exaustão – Q = 0,84 m³/s = 3024 m³/h

Velocidade do ar – V = 17,12 m/s

Espessura – C = 4,19 mm

Diâmetro da tubulação – D = 0,25 m

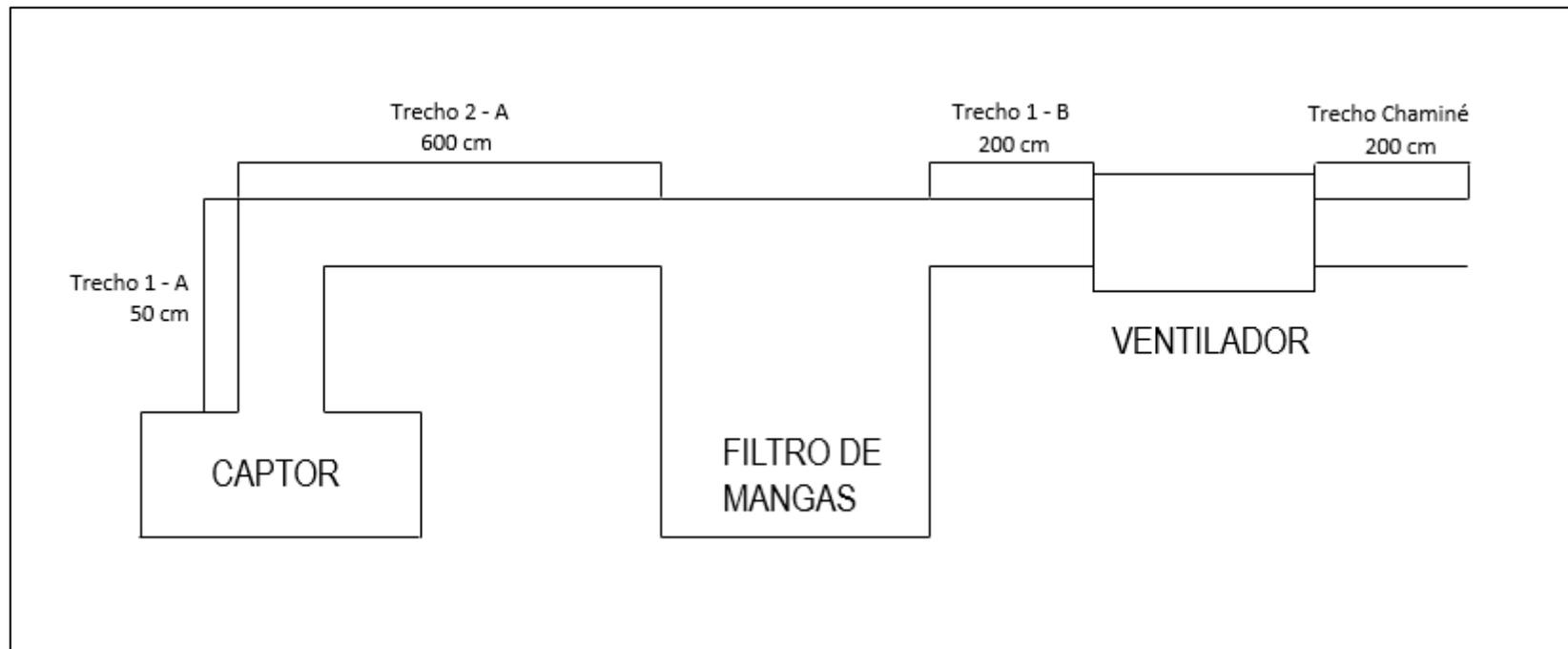
Comprimento – C = 2 m

Peso = 50,80 Kg

Perda de carga distribuida – Pd = 28,24 Pa

Perda de carga total – P = 28,24 Pa

Figura 8.10 – Traçado do sistema de dutos para o Cenário 2.B.



Cenário 2.C

Os trechos 1-A e 2-A ligam o sistema captor enclausurante ao equipamento de controle, o trecho 1-C liga o ciclone ao filtro de mangas enquanto o trecho 1-B liga o filtro de mangas ao ventilador de cada cenário. O trecho Chaminé liga a saída do ventilador a chaminé de saída do sistema.

A Figura 8.11 exibe o traçado do sistema de dutos para o Cenário 2.C.

a) Trecho 1 – A

$$\text{Vazão de exaustão} - Q = 0,84 \text{ m}^3/\text{s} = 3024 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Velocidade do ar} - V = 17,12 \text{ m/s}$$

$$\text{Diâmetro da tubulação} - D = 0,25 \text{ m}$$

$$\text{Espessura} - C = 4,19 \text{ mm}$$

$$\text{Comprimento} - C = 0,5 \text{ m}$$

$$\text{Peso} = 12,70 \text{ Kg}$$

$$\text{Perda de carga distribuída} - Pd = 7,06 \text{ Pa}$$

$$\text{Coeficiente K: Curva de 90 graus} - k1 = 0,25$$

$$\text{Perda de carga localizada: Curva de 90 graus} - Pl1 = 44,12 \text{ Pa}$$

$$\text{Coeficiente K: Entrada do captor} - k2 = 0,15$$

$$\text{Perda de carga localizada: Entrada do captor} - Pl2 = 26,47 \text{ Pa}$$

$$\text{Perda de carga total} - P = 77,65 \text{ Pa}$$

b) Trecho 2 – A

$$\text{Vazão de exaustão} - Q = 0,84 \text{ m}^3/\text{s} = 3024 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Velocidade do ar} - V = 17,12 \text{ m/s}$$

$$\text{Diâmetro da tubulação} - D = 0,25 \text{ m}$$

Espessura – C = 4,19 mm

Comprimento – C = 6 m

Peso = 152,39 Kg

Perda de carga distribuida – Pd = 84,71 Pa

Perda de carga total – P = 84,71 Pa

c) Trecho 1 – C

Vazão de exaustão – Q = 0,84 m³/s = 3024 m³/h

Velocidade do ar – V = 17,12 m/s

Diâmetro da tubulação – D = 0,25 m

Espessura – C = 4,19 mm

Comprimento – C = 2 m

Peso = 50,80 Kg

Perda de carga distribuida – Pd = 28,24 Pa

Perda de carga total – P = 28,24 Pa

d) Trecho 1 – B

Vazão de exaustão – Q = 0,84 m³/s = 3024 m³/h

Velocidade do ar – V = 17,12 m/s

Diâmetro da tubulação – D = 0,25 m

Espessura – C = 4,19 mm

Comprimento – C = 2 m

Peso = 50,80 Kg

Perda de carga distribuida – Pd = 28,24 Pa

Perda de carga total – $P = 28,24 \text{ Pa}$

d) Trecho Chaminé

Vazão de exaustão – $Q = 0,84 \text{ m}^3/\text{s} = 3024 \text{ m}^3/\text{h}$

Velocidade do ar – $V = 17,12 \text{ m/s}$

Espessura – $C = 4,19 \text{ mm}$

Diâmetro da tubulação – $D = 0,25 \text{ m}$

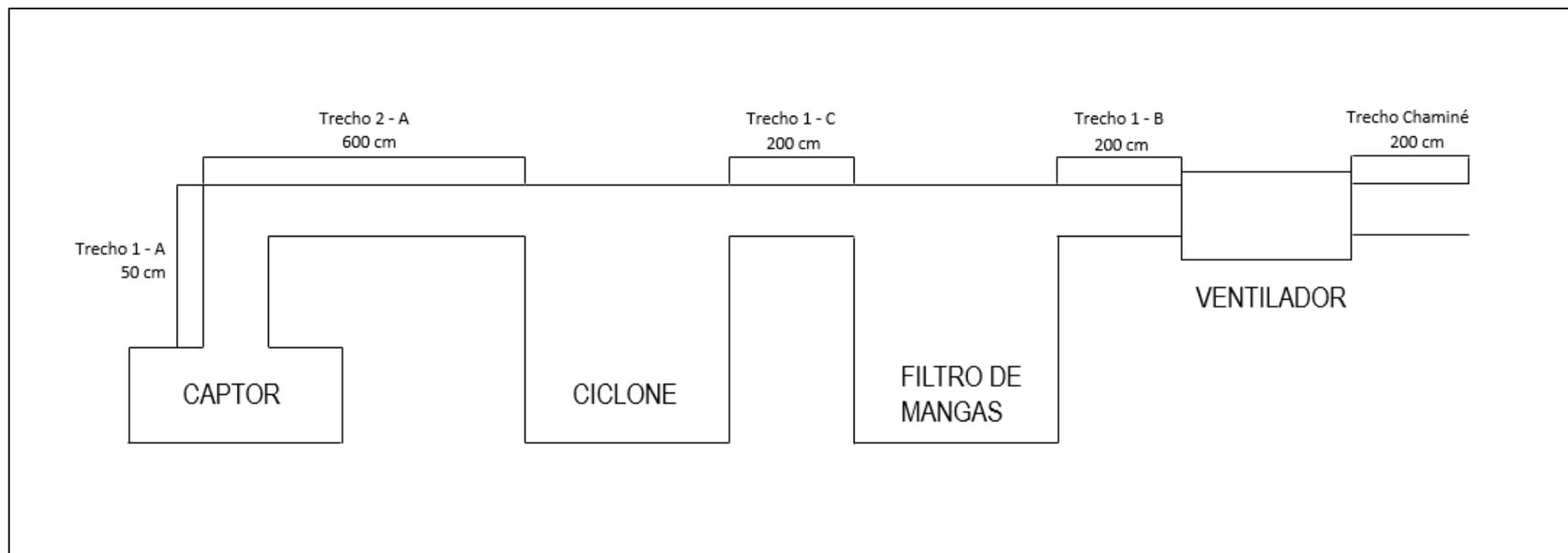
Comprimento – $C = 2 \text{ m}$

Peso = $50,80 \text{ Kg}$

Perda de carga distribuída – $P_d = 28,24 \text{ Pa}$

Perda de carga total – $P = 28,24 \text{ Pa}$

Figura 8.11 – Traçado do sistema de dutos para o Cenário 2.C.



Apêndice B.3

Este apêndice tem como objetivo expor as dimensões dos equipamentos de controle e do sistema de dutos projetados para os cenários 2.A, 2.B e 2.C para a triagem de grãos e as principais características envolvidas.

Para maiores detalhes deve-se consultar a planilha de dimensionamento de sistemas de ventilação local exaustora anexadas a este trabalho.

Cenário 2.A

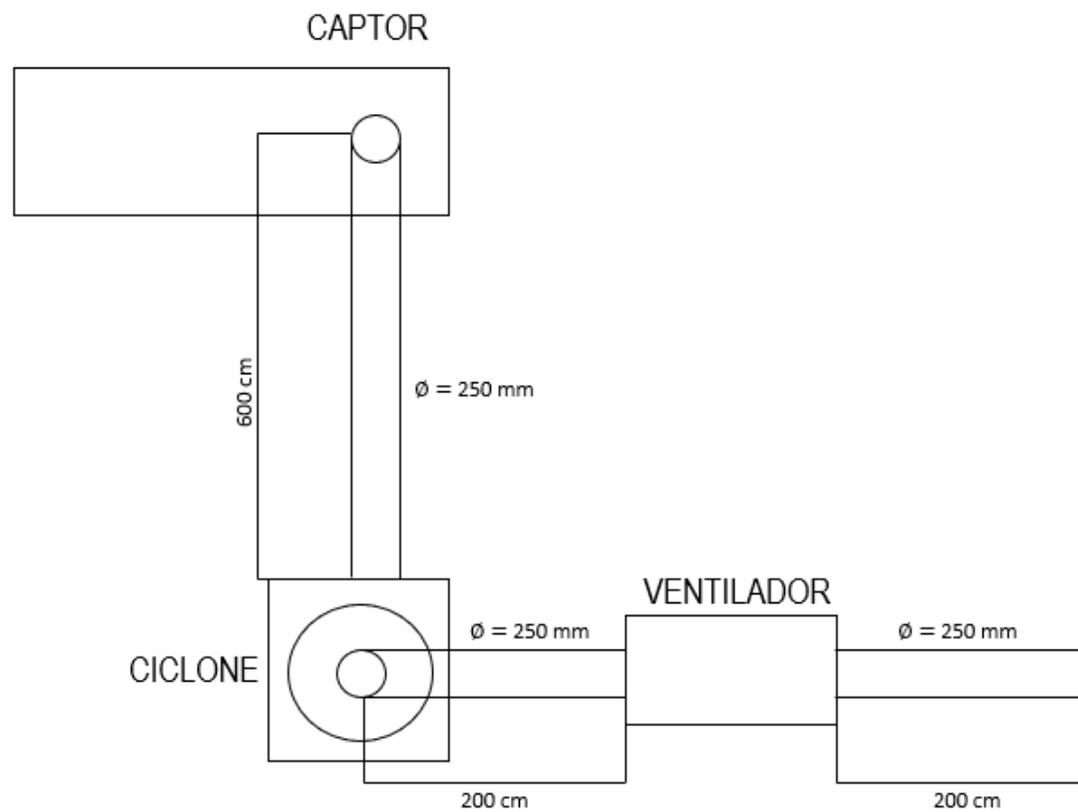
O projeto de dimensionamento de ciclone deste cenário, deverá ser ligado ao sistema captor enclausurante exposto no Apêndice B.1 por meio de dutos que causem a menor perda de carga possível.

A Tabela 8.4 apresenta as características do ciclone e do ventilador projetados para este cenário. Os detalhes das dimensões do ciclone, bem como do sistema de dutos que conecta o sistema captor enclausurante pode ser observada na Figura 8.12.

Tabela 8.4 – Características do ciclone e ventilador projetados.

Ciclone		Dimensões	
Razão D/D	1	D	0,69 m
Vazão	0,84 m ³ /s	H	0,34 m
Eficiência	99,84 %	W	0,14 m
Perda de Carga	1217,78 Pa	D _e	0,34 m
Ventilador		S	0,34 m
Potência	1,55 kW	L _b	1,03 m
Vazão de Ar	0,86 m ³ /s	L _c	1,72 m
Pressão Estática	1474,00 Pa	D _d	0,26 m

Figura 8.12 – Configuração do equipamento de controle e do sistema de dutos.



Cenário 2.B

O projeto de dimensionamento de filtro de mangas deste cenário, deverá ser ligado ao sistema captor enclausurante exposto no Apêndice B.1 por meio de dutos que causem a menor perda de carga possível.

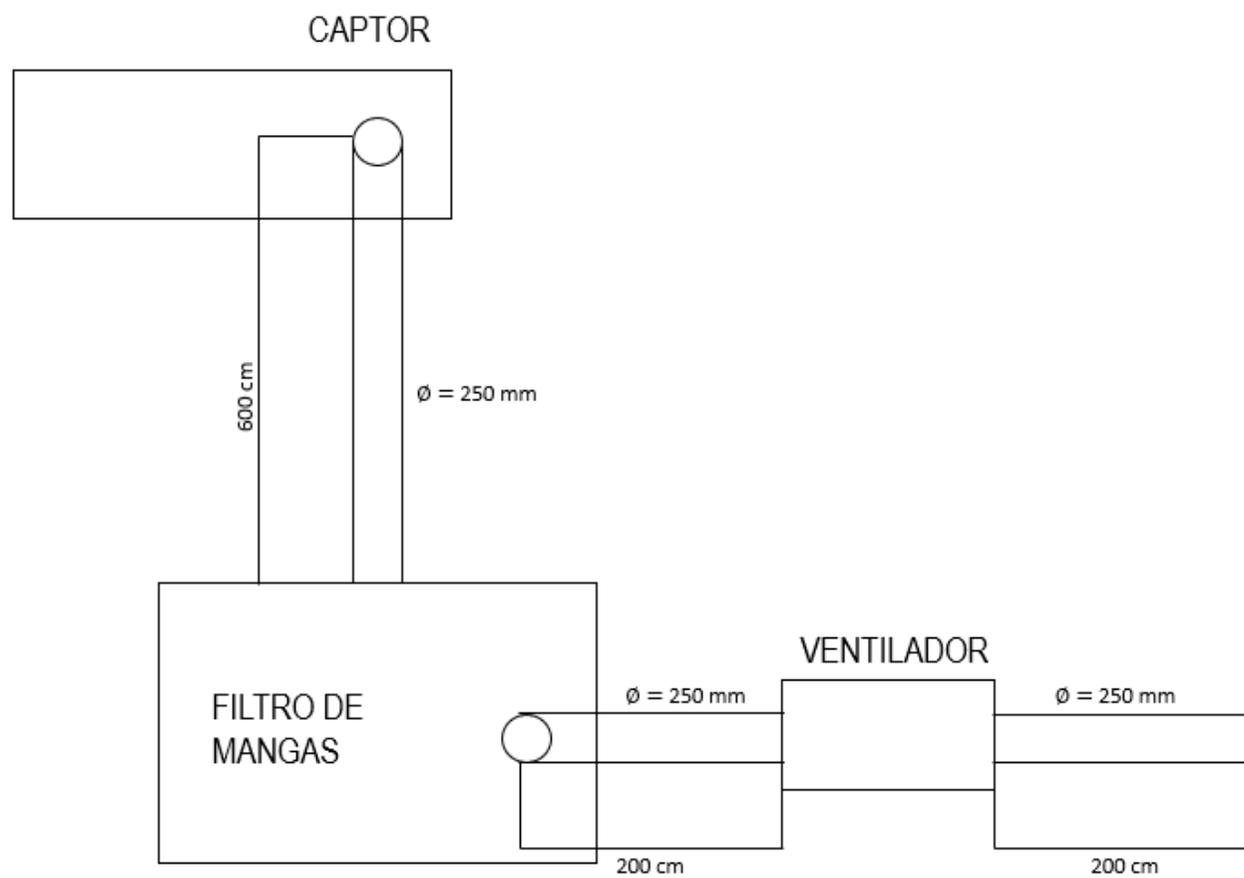
A Tabela 8.5 apresenta as características do filtro de mangas e do ventilador projetados para este cenário. Os detalhes das dimensões do filtro de mangas, bem como do sistema de dutos que conecta o sistema captor enclausurante pode ser observada na Figura 8.13.

As mangas utilizadas são do tipo Náilon e possuem altura de 3 metros e diâmetro de 0,13 m.

Tabela 8.5 – Características do filtro de mangas e ventilador projetados.

Filtro de mangas			
Área Filtrante	33,6 m ²	Mangas	27
Relação Ar/Pano	1,50 m/min	Altura da manga	3 m
Perda de Carga	2086,21 Pa	Diâmetro da manga	0,13 m
Ventilador			
	Potência		2,71 kW
	Vazão de Ar		0,86 m ³ /s
	Pressão Estática		2378,00 Pa

Figura 8.13 – Configuração do equipamento de controle e do sistema de dutos.



Cenário 2.C

O projeto de dimensionamento de filtro de mangas e ciclone deste cenário, deverá ser ligado ao sistema captor enclausurante exposto no Apêndice B.1 por meio de dutos que causem a menor perda de carga possível.

A Tabela 8.6 apresenta as características do filtro de mangas, ciclone e do ventilador projetados para este cenário. Os detalhes das dimensões dos equipamentos, bem como do sistema de dutos que conecta o sistema captor enclausurante pode ser observada na Figura 8.14.

As mangas utilizadas são do tipo Náilon e possuem altura de 3 metros e diâmetro de 0,13 m.

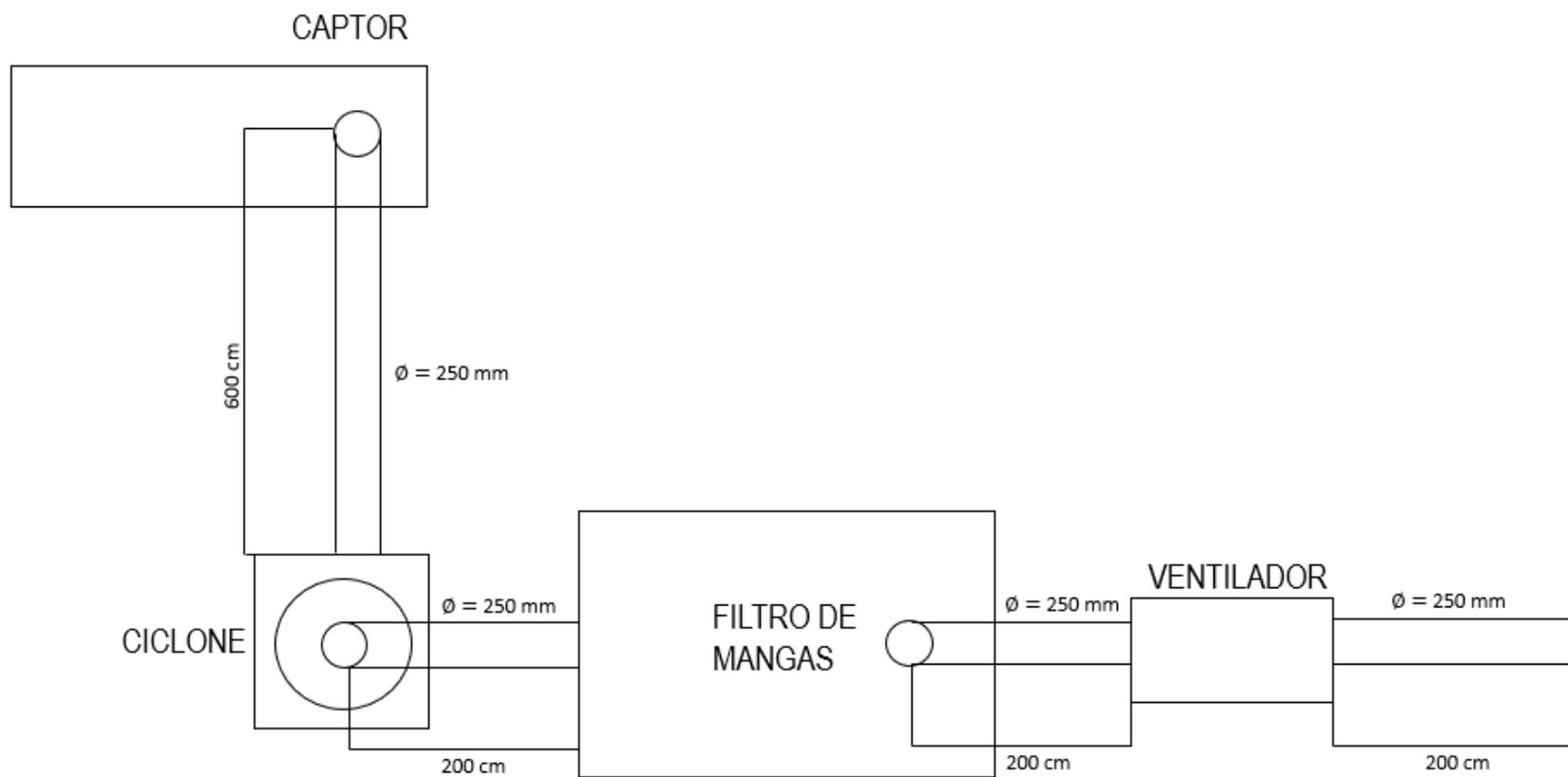
Tabela 8.6 – Características dos equipamentos e ventilador projetados.

Ciclone		Dimensões	
Razão D/D	1	D	0,69 m
		H	0,34 m
Vazão	0,84 m ³ /s	W	0,14 m
		D _e	0,34 m
Eficiência	99,84 %	S	0,34 m
		L _b	1,03 m
Perda de Carga	1217,78 Pa	L _c	1,72 m
		D _d	0,26 m

Filtro de mangas			
Área Filtrante	33,6 m ²	Mangas	27
Relação Ar/Pano	1,50 m/min	Altura da manga	3 m
Perda de Carga	2086,21 Pa	Diâmetro da manga	0,13 m

Ventilador	
Potência	4,13 kW
Vazão de Ar	0,85 m ³ /s
Pressão Estática	3595,00 Pa

Figura 8.14 – Configuração do equipamento de controle e do sistema de dutos.



9. ANEXO A

Este Anexo tem como objetivo expor o gráfico de desempenho e os detalhes de configuração dos ventiladores escolhidos para os diferentes cenários de acordo com o catálogo do fabricante: Soler & Palau.

Os catálogos dos ventiladores estão anexados na ordem dos Cenários, conforme:

- Cenário 1 – Recebimento de material bruto
 - 1.A – Ventilador RFD-Q 1000 ARR.3 CL.II POSIÇÃO H180 W 1000rpm - 40cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz
 - 1.B – Ventilador RFS 1250 ARR.1 CL.III POSIÇÃO H180 W 1100rpm - 100cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz
 - 1.C – Ventilador RFS 1120 ARR.1 CL.IV POSIÇÃO H180 W 1500rpm - 125cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz

- Cenário 2 – Triagem de grãos
 - 2.A – Ventilador RFS 315 ARR.1 CL.II POSIÇÃO H180 W 3300rpm - 3cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz
 - 2.B – Ventilador LMS-Q 400 ARR.3 CL.I POSIÇÃO H180 W 3100rpm - 4cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz
 - 2.C – Ventilador LMS 400 ARR.1 CL.II POSIÇÃO H180 W 3700rpm - 7.5cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz



RFD-Q ARRANJO 3

RFD-Q 1000 ARR.3 CL.II POSIÇÃO H180 W 1000rpm - 40cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz



Ventilador centrífugo tipo Airfoil, de dupla aspiração, com quadros de reforço, para acionamento por transmissão marca Soler_Palau modelo RFD-Q 1000 ARR.3 CL.II POSIÇÃO H180 W 1000rpm - 40cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz para uma vazão 58.433 m³/h e uma pressão estática 1.377 Pa.

Ponto de Operação Teórico

Vazão de Ar	58.050 m ³ /h
Pressão Estática	1.359 Pa
Temperatura	20 °C
Altitude	0 m
Densidade	1,2 kg/m ³
Frequência	60 Hz

Ponto de Operação

Vazão de Ar	58.433 m ³ /h
Pressão Estática	1.377 Pa
Pressão Total	1.448 Pa
Velocidade de descarga	10,8 m/s
Rendimento Total	88,6 %
Velocidade do ventilador (rpm)	1000 rpm
Potência	36,0 cv
Fator de Serviço Req	10
Velocidade periférica	52,4 m/s

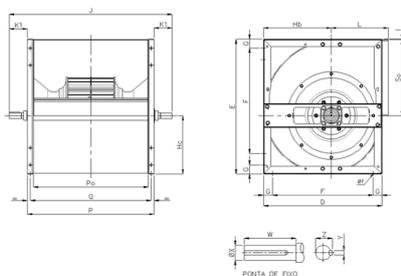
Construção

Peso -

Características do Motor

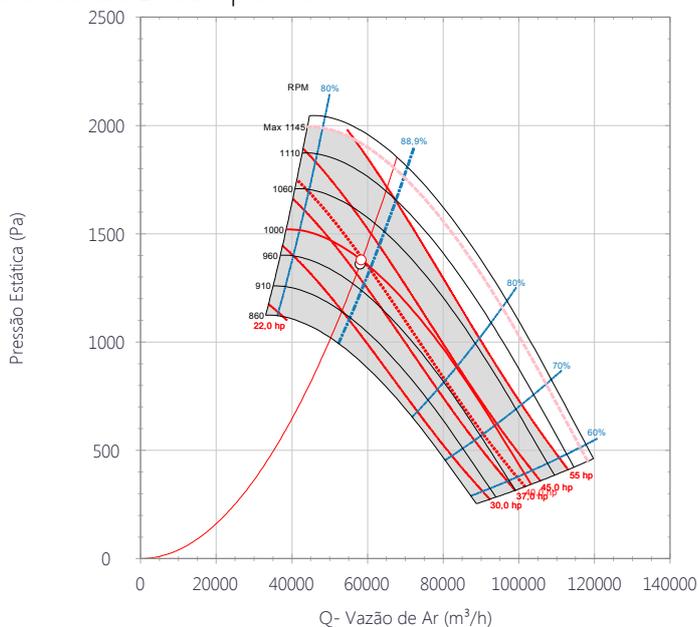
Potência motor	40 hp
Número de Polos	4
Velocidade do motor (rpm)	1770 rpm
Grau de proteção	IP55
Classe do motor	F
Tensão	3-220/380V-60Hz
Corrente absorvida máxima	99,2 A / 57,4 A

Desenho



D	E	F	G	Hb	Hc	I	J	K1
1655	1797	1515	70	905	785	9	1920	156.5
L	P	Po	Q	So	ØT	W	ØX	Toll.ØX
810	1607	1507	1557	1005	12	110	55	
Y	Z							
16	59							

Gráfico de Desempenho



Desempenho de Ruído

	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
Aspiração (LwA)	66	76	85	86	88	84	76	66	92
Aspiração LpA @ 1,5m	51	61	71	71	73	70	61	51	78
Descarga (LwA)	66	76	85	86	88	84	76	66	92
Descarga LpA @ 1,5m	51	61	71	71	73	70	61	51	78
Escape (LwA)	69	79	88	89	91	87	79	69	95
Escape LpA @ 1,5m	54	64	74	74	76	73	64	54	81



RFS ARRANJO 1

RFS 1250 ARR.1 CL.III POSIÇÃO H180 W 1100rpm - 100cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz



Ventilador centrífugo industrial tipo Airfoil, com rotor em balanço, de simples aspiração, para acionamento por transmissão marca Soler_Palau modelo RFS 1250 ARR.1 CL.III POSIÇÃO H180 W 1100rpm - 100cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz para uma vazão 62.699 m³/h e uma pressão estática 2.622 Pa.

Ponto de Operação Teórico

Vazão de Ar	58.050 m ³ /h
Pressão Estática	2.248 Pa
Temperatura	20 °C
Altitude	0 m
Densidade	1,2 kg/m ³
Frequência	60 Hz

Ponto de Operação

Vazão de Ar	62.699 m ³ /h
Pressão Estática	2.622 Pa
Pressão Total	2.739 Pa
Velocidade de descarga	13,9 m/s
Rendimento Total	89 %
Velocidade do ventilador (rpm)	1100 rpm
Potência	73 cv
Fator de Serviço Req	10
Velocidade periférica	72 m/s

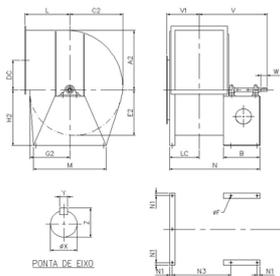
Construção

Peso -

Características do Motor

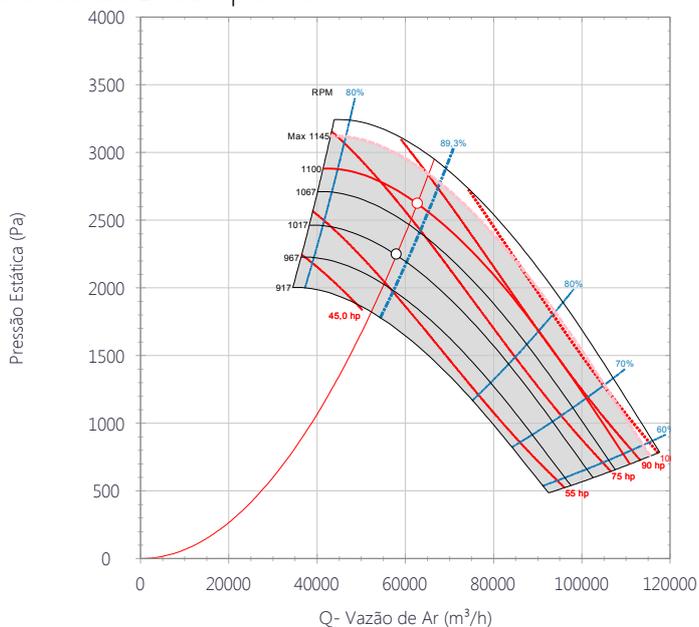
Potência motor	100 hp
Número de Polos	4
Velocidade do motor (rpm)	1775 rpm
Grau de proteção	IP55
Classe do motor	F
Tensão	3-220/380V-60Hz
Corrente absorvida máxima	240,0 A / 138,9 A

Desenho



ØF	LC	N1	N3	V1	B	N	V	W
18	581	38	1150	632	484	1570	1124	110
ØX	Y	Z	A2* MEDID A	C2* MEDID A	E2* MEDID A	G2* MEDID A	H2	L
55	16	59	1265	1115	965	815	1120	938
M	DC							
1410	625							

Gráfico de Desempenho



Desempenho de Ruído

	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
Aspiração (LwA)	72	82	91	92	94	90	82	72	98
Aspiração LpA @ 1,5m	57	67	77	77	79	76	67	57	84
Descarga (LwA)	72	82	91	92	94	90	82	72	98
Descarga LpA @ 1,5m	57	67	77	77	79	76	67	57	84
Escape (LwA)	75	85	94	95	97	93	85	75	101
Escape LpA @ 1,5m	60	70	80	80	82	79	70	60	87



RFS ARRANJO 1

RFS 1120 ARR.1 CL.IV POSIÇÃO H180 W 1500rpm - 125cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz



Ventilador centrífugo industrial tipo Airfoil, com rotor em balanço, de simples aspiração, para acionamento por transmissão marca Soler_Palau modelo RFS 1120 ARR.1 CL.IV POSIÇÃO H180 W 1500rpm - 125cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz para uma vazão 61.696 m³/h e uma pressão estática 3.908 Pa.

Ponto de Operação Teórico

Vazão de Ar	58.050 m ³ /h
Pressão Estática	3.459 Pa
Temperatura	20 °C
Altitude	0 m
Densidade	1,2 kg/m ³
Frequência	60 Hz

Ponto de Operação

Vazão de Ar	61.696 m ³ /h
Pressão Estática	3.908 Pa
Pressão Total	4.082 Pa
Velocidade de descarga	17 m/s
Rendimento Total	88,8 %
Velocidade do ventilador (rpm)	1500 rpm
Potência	107 cv
Fator de Serviço Req	10
Velocidade periférica	88 m/s

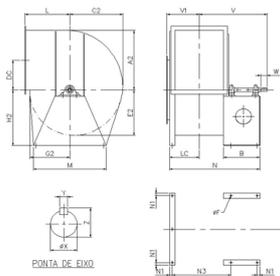
Construção

Peso -

Características do Motor

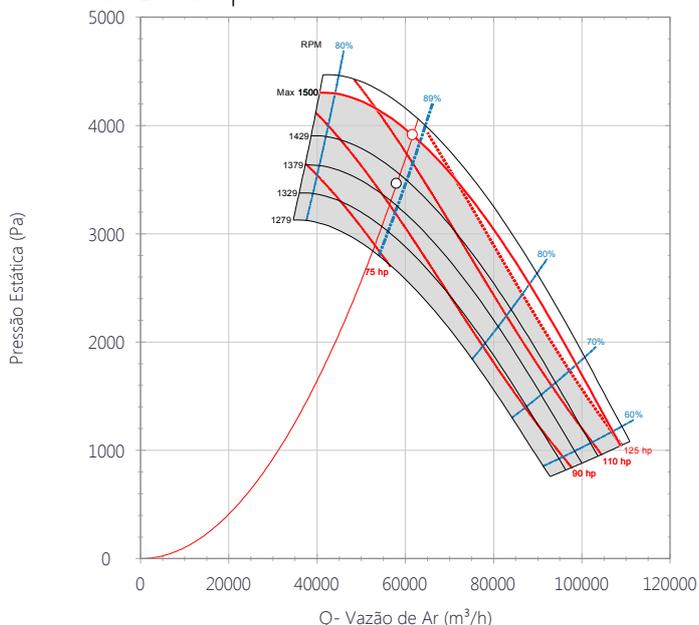
Potência motor	125 hp
Número de Polos	4
Velocidade do motor (rpm)	1785 rpm
Grau de proteção	IP55
Classe do motor	F
Tensão	3-220/380V-60Hz
Corrente absorvida máxima	292,0 A / 169,1 A

Desenho



ØF	LC	N1	N3	V1	B	N	V	W
18	529.5	38	1037	581	430	1413	1010	110
ØX	Y	Z	A2* MEDID A	C2* MEDID A	E2* MEDID A	G2* MEDID A	H2	L
48	14	51.5	1135	1001	867	733	1015	840
M	DC							
1280	560							

Gráfico de Desempenho



Desempenho de Ruído

	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
Aspiração (LwA)	75	85	94	95	97	93	85	75	101
Aspiração LpA @ 1,5m	60	70	80	80	82	79	70	60	87
Descarga (LwA)	75	85	94	95	97	93	85	75	101
Descarga LpA @ 1,5m	60	70	80	80	82	79	70	60	87
Escape (LwA)	78	88	97	98	100	96	88	78	104
Escape LpA @ 1,5m	63	73	83	83	85	82	73	63	90



RFS ARRANJO 1

RFS 315 ARR.1 CL.II POSIÇÃO H180 W 3300rpm - 3cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz



Ventilador centrífugo industrial tipo Airfoil, com rotor em balanço, de simples aspiração, para acionamento por transmissão marca Soler_Palau modelo RFS 315 ARR.1 CL.II POSIÇÃO H180 W 3300rpm - 3cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz para uma vazão 3.094 m³/h e uma pressão estática 1.474 Pa.

Ponto de Operação Teórico

Vazão de Ar	3.024 m ³ /h
Pressão Estática	1.408 Pa
Temperatura	20 °C
Altitude	0 m
Densidade	1,2 kg/m ³
Frequência	60 Hz

Ponto de Operação

Vazão de Ar	3.094 m ³ /h
Pressão Estática	1.474 Pa
Pressão Total	1.546 Pa
Velocidade de descarga	10,9 m/s
Rendimento Total	86,4 %
Velocidade do ventilador (rpm)	3300 rpm
Potência	2,09 cv
Fator de Serviço Req	10
Velocidade periférica	54,4 m/s

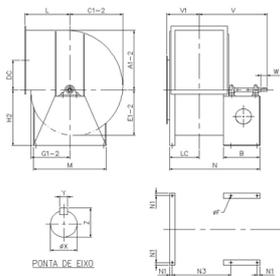
Construção

Peso -

Características do Motor

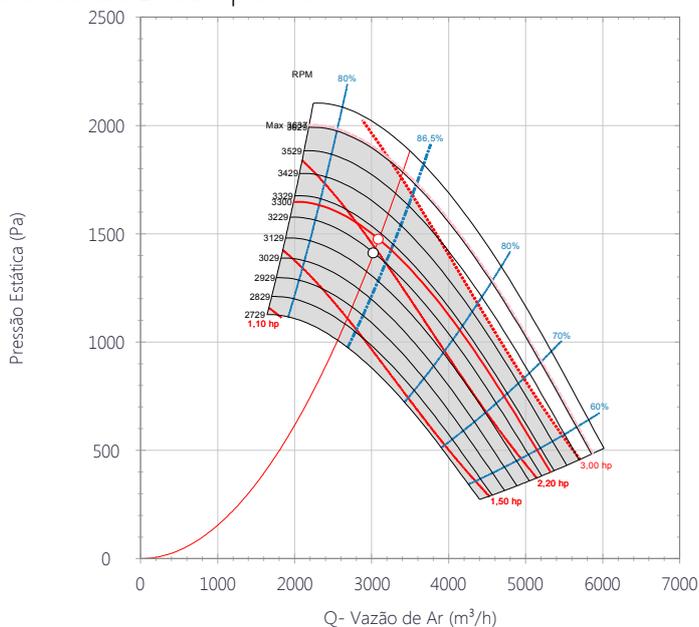
Potência motor	3 hp
Número de Polos	4
Velocidade do motor (rpm)	1735 rpm
Grau de proteção	IP55
Classe do motor	F
Tensão	3-220/380V-60Hz
Corrente absorvida máxima	8,2 A / 4,7 A

Desenho



ØF	LC	N1	N3	V1	B	N	V	W
10	164.5	19	333	178	264	555	455	50
ØX	Y	Z	A1* MEDID A	C1* MEDID A	E1* MEDID A	G1* MEDID A	H2	L
24	8	27	316	278	240	202	310	238
M	DC							
425	157.5							

Gráfico de Desempenho



Desempenho de Ruído

	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
Aspiração (LwA)	58	70	75	82	81	77	69	59	86
Aspiração LpA @ 1,5m	43	55	61	67	66	63	54	44	71
Descarga (LwA)	58	70	75	82	81	77	69	59	86
Descarga LpA @ 1,5m	43	55	61	67	66	63	54	44	71
Escape (LwA)	61	73	78	85	84	80	72	62	89
Escape LpA @ 1,5m	46	58	64	70	69	66	57	47	74



LMS-Q ARRANJO 3

LMS-Q 400 ARR.3 CLI POSIÇÃO H180 W 3100rpm - 4cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz



Ventilador centrífugo tipo limit load de baixa vazão, de simples aspiração, com quadros de reforço, para acionamento por transmissão marca Soler_Palau modelo LMS-Q 400 ARR.3 CLI POSIÇÃO H180 W 3100rpm - 4cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz para uma vazão 3.090 m³/h e uma pressão estática 2.378 Pa.

Ponto de Operação Teórico

Vazão de Ar	3.024 m ³ /h
Pressão Estática	2.277 Pa
Temperatura	20 °C
Altitude	0 m
Densidade	1,2 kg/m ³
Frequência	60 Hz

Ponto de Operação

Vazão de Ar	3.090 m ³ /h
Pressão Estática	2.378 Pa
Pressão Total	2.468 Pa
Velocidade de descarga	12,3 m/s
Rendimento Total	78,5 %
Velocidade do ventilador (rpm)	3100 rpm
Potência	3,67 cv
Fator de Serviço Req	10
Velocidade periférica	64,9 m/s

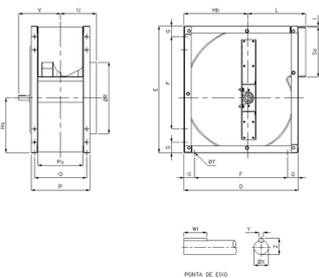
Construção

Peso -

Características do Motor

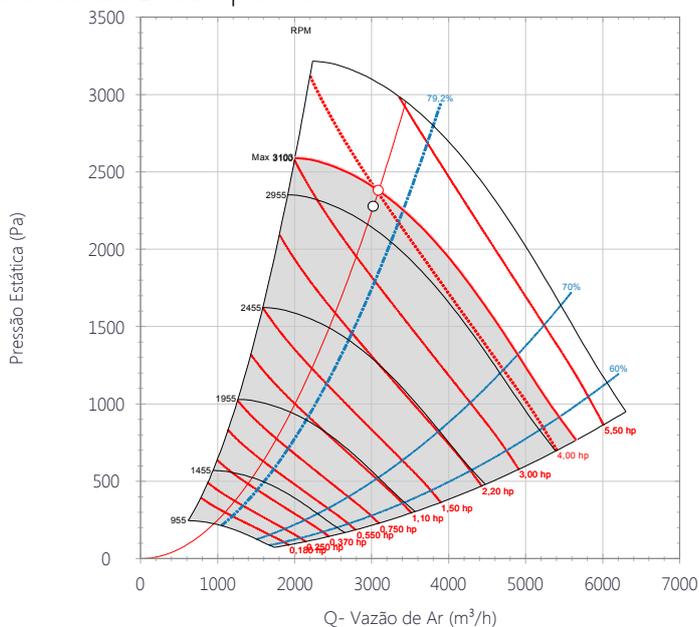
Potência motor	4 hp
Número de Polos	4
Velocidade do motor (rpm)	1715 rpm
Grau de proteção	IP55
Classe do motor	F
Tensão	3-220/380V-60Hz
Corrente absorvida máxima	11,1 A / 6,4 A

Desenho



D	E	F	G	Hb	Hc	L	P	Po
641	716	521	60	358	310	323	329	253
Q	ØR	So	ØT	U	V	W1	ØX	Y
291	403	282	11	217	217	40	25	8
Z	I							
28	5							

Gráfico de Desempenho



Desempenho de Ruído

	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
Aspiração (LwA)	62	74	79	86	85	81	73	63	90
Aspiração LpA @ 1,5m	47	59	65	71	70	67	58	48	75
Descarga (LwA)	62	74	79	86	85	81	73	63	90
Descarga LpA @ 1,5m	47	59	65	71	70	67	58	48	75
Escape (LwA)	65	77	82	89	88	84	76	66	93
Escape LpA @ 1,5m	50	62	68	74	73	70	61	51	78



LMS ARRANJO 1

LMS 400 ARR.1 CL.II POSIÇÃO H180 W 3700rpm - 7.5cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz



Ventilador centrífugo industrial tipo limit load de baixa vazão, com rotor em balanço, de simples aspiração, para acionamento por transmissão marca Soler_Palau modelo LMS 400 ARR.1 CL.II POSIÇÃO H180 W 3700rpm - 7.5cv 4POLOS 3-220/380V-60Hz para uma vazão 3.055 m³/h e uma pressão estática 3.595 Pa.

Ponto de Operação Teórico

Vazão de Ar	3.024 m ³ /h
Pressão Estática	3.523 Pa
Temperatura	20 °C
Altitude	0 m
Densidade	1,2 kg/m ³
Frequência	60 Hz

Ponto de Operação

Vazão de Ar	3.055 m ³ /h
Pressão Estática	3.595 Pa
Pressão Total	3.684 Pa
Velocidade de descarga	12,1 m/s
Rendimento Total	76,1 %
Velocidade do ventilador (rpm)	3700 rpm
Potência	5,58 cv
Fator de Serviço Req	10
Velocidade periférica	77,5 m/s

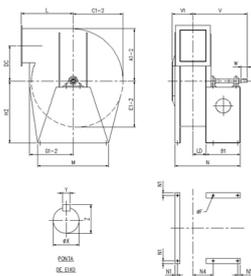
Construção

Peso -

Características do Motor

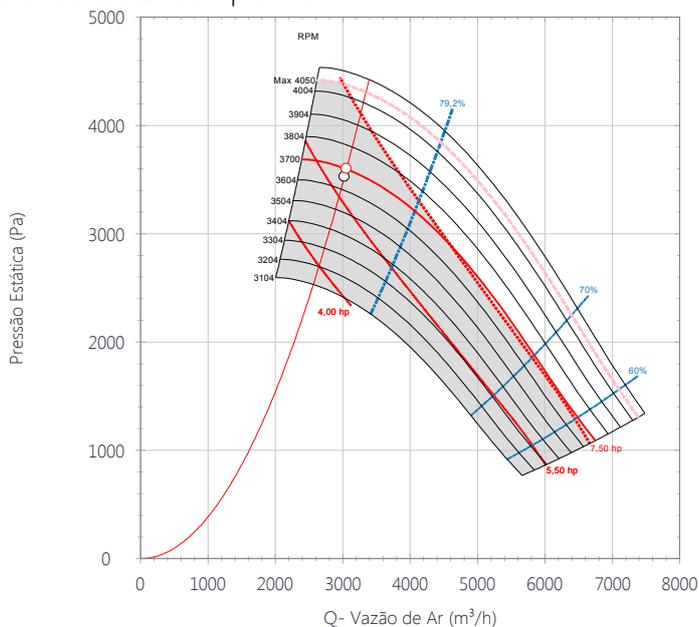
Potência motor	7,5 hp
Número de Polos	4
Velocidade do motor (rpm)	1740 rpm
Grau de proteção	IP55
Classe do motor	F
Tensão	3-220/380V-60Hz
Corrente absorvida máxima	20,2 A / 11,7 A

Desenho



DC	ØF	LD	N1	N4	V1	B1	N	V
260	10	126.5	25	191.5	202	340	643	538
W	ØX	Y	Z	A1	A2	C1	C2	E1
60	28	8	31	401	409	353	361	305
E2	G1	G2	H2	L	M			
313	257	265	395	300	520			

Gráfico de Desempenho



Desempenho de Ruído

	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
Aspiração (LwA)	65	77	82	86	91	84	76	66	93
Aspiração LpA @ 1,5m	50	62	68	71	76	70	61	51	79
Descarga (LwA)	65	77	82	86	91	84	76	66	93
Descarga LpA @ 1,5m	50	62	68	71	76	70	61	51	79
Escape (LwA)	68	80	85	89	94	87	79	69	96
Escape LpA @ 1,5m	53	65	71	74	79	73	64	54	82