



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Luciano Roberto Carvalho

Dimensionamento de um Sistema de Exaustão Local para uma Máquina de Moagem de Produtos Agrícolas

OURO PRETO - MG
2025

Luciano Roberto Carvalho
luciano.roberto@aluno.ufop.edu.br

Dimensionamento de um Sistema de Exaustão Local para uma Máquina de Moagem de Produtos Agrícolas

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Luís Antônio Bortolaia

OURO PRETO – MG
2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C331d Carvalho, Luciano Roberto.

Dimensionamento de um sistema de exaustão local para uma máquina de moagem de produtos agrícolas. [manuscrito] / Luciano Roberto Carvalho. - 2025.

67 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Luís Antônio Bortolaia.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Equipamento agrícola - Sistema de Exaustão. 2. Ventilação. 3. Dimensionamento. I. Bortolaia, Luís Antônio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Luciano Roberto Carvalho

Dimensionamento de um sistema de exaustão local para uma máquina de moagem de produtos agrícolas

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 21 de agosto de 2025

Membros da banca

DsC. Luís Antônio Bortolaia - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DsC. Elisângela Martins Leal (Universidade Federal de Ouro Preto)
DsC. Washington Luís Vieira da Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)

Luís Antônio Bortolaia, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 08/09/2025



Documento assinado eletronicamente por **Luis Antonio Bortolaia, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/09/2025, às 09:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0974597** e o código CRC **EAB74BDF**.

A Deus por ter me proporcionado
finalizar essa conquista.

A minha família e amigos pelo carinho.

As repúblicas Tira Mágua por ser minha
casa.

AGRADECIMENTO

Ao meu orientador Luís Antônio Bortolaia, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Aos professores do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho.

A vida republicana de Ouro Preto.

A todas as amizades aqui conquistadas.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo dimensionar um sistema de exaustão local voltado ao manuseio de produtos agrícolas, em específico o milho, com foco na redução dos impactos à saúde ocupacional e na melhoria das condições ambientais no local de trabalho. Os processos industriais envolvidos nesse setor geram partículas suspensas que, quando não adequadamente captadas, podem comprometer a saúde dos colaboradores e a eficiência dos equipamentos. A metodologia adotada envolve uma revisão bibliográfica sobre os tipos de ventilação, os componentes dos sistemas de exaustão e as normas técnicas aplicáveis, além do levantamento de dados operacionais, dimensionamento dos dutos, cálculo das perdas de carga e seleção dos equipamentos. Como resultado, é proposto um sistema de exaustão composto de captor, tubulação, ciclone e ventilador, capaz de atender aos critérios de controle de poluentes, promovendo maior segurança, conforto e desempenho operacional no ambiente industrial.

Palavras-chave: Ventilação industrial. Exaustão local. Poeiras. Perda de carga. Dimensionamento.

ABSTRACT

This study aims to design a local exhaust system for handling agricultural products, specifically corn, focusing on reducing occupational health impacts and improving workplace environmental conditions. Industrial processes in this sector generate airborne particles that, when not properly captured, can compromise workers' health and equipment efficiency. The adopted methodology includes a literature review on ventilation types, exhaust system components, and applicable technical standards, as well as the collection of operational data, duct sizing, pressure drop calculation, and equipment selection. As a result, an exhaust system composed of a hood, ductwork, cyclone, and fan is proposed, capable of meeting pollutant control criteria, thus ensuring greater safety, comfort, and operational performance in the industrial environment.

Keywords: Industrial ventilation. Local exhaust. Dust. Pressure drop. Cyclone separator. Sizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de um sistema de ventilação local exaustora.....	7
Figura 2 – Captores	9
Figura 3 – Ciclone.....	12
Figura 4 - Ponto de operação ideal.....	14
Figura 5 - Diagrama de Moody.....	18
Figura 6 - Dimensões do ciclone.....	23
Figura 7 - Sistema de moagem.....	26
Figura 8 - Granulometria	27
Figura 9 - Triturador TRF-750.....	28
Figura 10 - Fluxo de Trabalho	33
Figura 11 - Desenho esquemático	36
Figura 12 - Eficiência de coleta	44
Figura 13 – Dados da seleção do ventilador	45
Figura 14 - Curva de operação do ventilador.....	47
Figura 15 - Comparativo de medidas	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Seleção do coletor com base na granulometria de partículas	11
Tabela 2 - Fator de exaustão (k).....	15
Tabela 3 - Comprimento equivalente	20
Tabela 4 - Velocidade dos contaminantes	21
Tabela 5 - Velocidade recomendadas (Hudson).....	22
Tabela 6 - Fatores para dimensões do ciclone	24
Tabela 7 - Variáveis e indicadores	35
Tabela 8 - Cálculo de velocidades.....	38
Tabela 9 - Dimensionamento do ciclone	41
Tabela 10 - Perdas de Carga	43
Tabela 11 - Dimensões dos ciclones	47
Tabela 12 - Análise comparativa.....	49

LISTA DE SIMBOLOS

Δp : Perda de carga - (Pa)

P_d : Pressão de velocidade no duto de ligação - (Pa)

K : Coeficiente de perda de carga - (adimensional)

K_d : Coeficiente de perda de carga no duto - (adimensional)

K_c : Coeficiente de perda de carga no captor - (adimensional)

ρ : Massa específica do ar - (kg/m^3)

V : Velocidade - (m/s)

V_d : Velocidade de transporte no duto - (m/s)

V : Velocidade na ranhura - (m/s)

Q : Vazão volumétrica - (m^3/s)

D : Diâmetro interno do duto - (m)

f : Coeficiente de atrito - (adimensional)

L : Comprimento retilíneo de duto - (m)

Re : Número de Reynolds - (adimensional)

ν : Viscosidade cinemática do ar - (m^2/s)

ϵ : Rugosidade absoluta - (m)

PT : Pressão total - (Pa)

PE : Pressão estática - (Pa)

Pd : Pressão dinâmica (Pa)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos	2
1.3.1	Geral.....	2
1.3.2	Específicos.....	2
1.4	Estrutura do Trabalho.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Ventilação Geral	4
2.2	Ventilação Local Exaustora.....	5
2.2.1	Captor	7
2.2.2	Coletores.....	10
2.2.3	Ventiladores	12
2.2.4	Dutos	15
2.3	Velocidade de Captura e de Transporte	20
2.4	Dimensionamento e Eficiência do Ciclone	22
2.5	Processo de Produção	26
2.6	Equipamento.....	28
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	Tipo de Pesquisa.....	31
3.2	Materiais e Métodos.....	33
3.3	Variáveis e Indicadores	34
3.4	Instrumentos de Coleta de Dados	35
3.5	Tabulação de Dados.....	35
3.6	Considerações Finais	35
4	RESULTADOS.....	36
4.1	Cálculo do Sistema	36
4.2	Cálculo de Vazão.....	37
4.3	Cálculo de Velocidade	38
4.4	Diâmetro do Duto	39
4.5	Perda de Carga.....	39
4.5.1	Perda de Carga no Duto.....	40

	vii
4.5.2 Perda de Carga na Curva	40
4.6 Ciclone	40
4.6.1 Perda na Transição Circular- Retangular.....	41
4.6.2 Perda de Carga no Ciclone	42
4.7 Perda de carga total.....	43
4.8 Eficiência do ciclone.....	43
4.9 Seleção do Ventilador	45
4.10 Comparativo	46
5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	50
5.1 Conclusão	50
5.2 Recomendações	51
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Existe a necessidade de uma qualidade do ambiente de trabalho industrial no que se refere à saúde do trabalhador, poluição e contaminação do ambiente de trabalho e conservação de máquinas e equipamentos. A área de estudo focada é um ambiente de produção que contém equipamentos que geram a dispersão de pós e partículas que promovem a poluição interna, acarretando indesejáveis danos à saúde do trabalhador local e dos equipamentos presentes. Dessa forma, o problema a ser abordado é o dimensionamento de um sistema de exaustão de partículas.

A ventilação pode ser definida como a movimentação controlada e planejada do ar em um determinado ambiente, com o objetivo de atender a requisitos específicos de conforto térmico, qualidade do ar ou controle de poluentes. Essa movimentação pode ocorrer por meios naturais, aproveitando fenômenos como a diferença de temperatura e pressão, ou por meios mecânicos, tais como ventiladores e exaustores. É fundamental compreender que o ar se desloca naturalmente de regiões com maior pressão para regiões com menor pressão. Assim, o correto dimensionamento dos diferenciais de pressão no sistema é essencial para garantir sua eficiência e funcionamento adequado (MACINTYRE, 1990).

A Ventilação Local Exaustora, segundo Macintyre (1990), é realizada por meio de um dispositivo de captação de ar instalado próximo à fonte poluidora, ou seja, produtora de agentes nocivos à saúde. Esse sistema remove o ar contaminado do ambiente e o conduz para a atmosfera, por meio de um exaustor, ou realiza seu tratamento adequado antes da destinação final, garantindo que não haja riscos de poluição ambiental.

No caso de máquinas de moagem de milho, a geração de poeiras é intensa e constante durante o processo de trituração dos grãos. Essas partículas, muitas vezes com diâmetro inferior a 100 μm , permanecem suspensas no ambiente, representando riscos à saúde dos operadores e contribuindo para a contaminação do ambiente de trabalho e desgaste prematuro dos equipamentos (SANTOS, 2015).

A aplicação de um sistema de ventilação local exaustora neste tipo de processo é recomendado, pois permite a captura imediata das partículas no ponto de emissão, reduzindo a dispersão no ar ambiente. No entanto, sua eficiência depende de um correto

posicionamento dos captadores e da compatibilidade do sistema com a geometria e operação da máquina, exigindo um projeto técnico bem elaborado para garantir o controle efetivo dos poluentes gerados (SANTOS, 2015).

Nesse contexto, o trabalho busca identificar, definir os níveis de poluentes no ambiente e o seu controle. Assim, chega-se à pergunta problema desse trabalho.

Como dimensionar um sistema de exaustão local que trabalha com a moagem de milho?

1.2 Justificativa

Este trabalho consiste na solução do problema de moagem de milho, sendo uma etapa nos processos industriais do setor, caracterizada pela intensa geração de poeiras finas. A presença dessas partículas no ambiente compromete a saúde dos trabalhadores, podendo causar doenças respiratórias devido à exposição prolongada, conforme orienta a Norma Regulamentadora NR-15 e a NHO 01 (FUNDACENTRO, 2017). Além disso, o acúmulo de material particulado sobre os equipamentos impacta diretamente na sua durabilidade e desempenho.

Diante desses fatores, torna-se necessário o desenvolvimento de um sistema de ventilação local exaustora (VLE) que permita a captação eficiente dos contaminantes diretamente na fonte emissora, promovendo a melhoria da qualidade do ar, a proteção da saúde ocupacional e a preservação dos equipamentos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Dimensionar um sistema de exaustão local que trabalha com o manuseio de milho.

1.3.2 Específicos

- Realizar o levantamento das fontes geradoras de contaminantes;
- Identificar os principais parâmetros técnicos relacionados à emissão de partículas no processo de moagem de milho;

- Dimensionar os dutos, captores e demais componentes do sistema de exaustão local;
- Propor uma solução eficiente que minimize a exposição ocupacional a poeiras e otimize a qualidade do ar no ambiente de trabalho.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, de modo a apresentar a pesquisa de forma clara e lógica. O Capítulo 1 introduz o tema, apresentando a justificativa para a realização do estudo, bem como os objetivos geral e específicos que nortearam a pesquisa. O Capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica, onde são abordados os conceitos fundamentais sobre sistemas de ventilação local exaustora, os diferentes tipos de captores, dutos, equipamentos, com base em normas e literatura técnica consolidadas. O Capítulo 3 detalha a metodologia empregada, descrevendo o passo a passo do dimensionamento do sistema e os parâmetros de cálculo utilizados. No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com o dimensionamento, analisando a eficácia e a conformidade do sistema projetado. Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões do estudo, sintetizando os principais achados e sugerindo trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o crescente desenvolvimento urbano e aumento dos padrões de consumo pessoal, as atividades industriais têm registrado ascendência elevada, principalmente a partir do século XX. Sabe-se que as atividades manufatureiras têm, por consequência, o aumento de emissões de resíduos poluentes, os quais devem ser devidamente aspirados e retidos a fim de atender a Resolução nº05 do Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR), gerenciado pelo IBAMA e que estabelece níveis de emissão de poluentes para fontes fixas industriais.

Segundo a maioria das indústrias necessita de um sistema de exaustão para manter ou melhorar o ambiente de trabalho. O seu emprego pode ser dividido em três áreas principais:

- Controle de contaminantes em níveis aceitáveis;
- Controle da temperatura e umidade para conforto;
- Prevenção ao fogo e a explosões.

A ventilação industrial não visa apenas a atender a condições favoráveis para aqueles que trabalham no interior das fábricas ou nos seus limites. Objetiva, também, impedir que o lançamento de contaminantes na atmosfera, através de chaminés ou outros recursos, venha poluir o ar, ameaçando a saúde do trabalhador (MACINTYRE, 1990).

2.1 Ventilação Geral

A ventilação geral, também denominada ventilação diluidora, é um método amplamente utilizado em ambientes industriais com o objetivo de controlar a concentração de poluentes no ar por meio da introdução de ar limpo e/ou da exaustão do ar contaminado. A lógica desse sistema baseia-se no princípio da diluição: ao introduzir um fluxo contínuo de ar não contaminado em um espaço que contém uma determinada carga de poluentes, ocorre uma dispersão dessa massa poluente em um volume maior de ar, resultando na redução de sua concentração (MACINTYRE, 1990). Trata-se, portanto, de uma solução que não atua diretamente na fonte da emissão, mas sim na mitigação dos seus efeitos no ambiente.

Apesar de sua aplicação ser comum em ambientes onde a concentração de poluentes é relativamente baixa ou onde há dificuldade de acesso à fonte emissora, a ventilação

geral apresenta limitações significativas. Entre os principais pontos negativos está a impossibilidade de impedir a liberação inicial do contaminante, além da necessidade de grandes volumes de ar para alcançar níveis de concentração aceitáveis, o que implica em maior consumo energético e dimensionamento robusto dos equipamentos envolvidos. Em muitos casos, isso resulta em soluções ineficientes, sobretudo quando o agente poluente é de alta toxicidade ou gerado de forma contínua e concentrada (SANTOS, 2015).

Em contraste, a ventilação local exaustora (VLE) apresenta-se como a estratégia mais eficaz para o controle de contaminantes nos processos industriais. Este método consiste na captação dos poluentes no exato ponto onde são gerados, utilizando captadores posicionados junto à fonte emissora. Ao evitar que as substâncias contaminantes entrem em contato com o ambiente ocupacional, a VLE reduz os riscos à saúde dos trabalhadores e a dispersão de material particulado em áreas adjacentes. Essa abordagem é fortemente recomendada por instituições como a *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH, 2023) e pela Fundacentro, por meio da Norma de Higiene Ocupacional NHO 01 (FUNDACENTRO, 2017), que enfatizam a hierarquia das medidas de controle, priorizando a eliminação ou contenção do agente na fonte.

Portanto, sempre que tecnicamente viável, a ventilação local exaustora deve ser a primeira escolha no projeto de sistemas de controle de poluentes em ambientes industriais. Sua aplicação resulta não apenas na proteção eficaz da saúde ocupacional, como também em benefícios operacionais, como redução da contaminação cruzada, melhoria da eficiência dos equipamentos e menor demanda de ar tratado, contribuindo para soluções mais sustentáveis e seguras.

2.2 Ventilação Local Exaustora

A ventilação local exaustora (VLE) é um sistema de engenharia projetado para capturar e remover contaminantes no ponto de sua emissão, antes que estes se dispersem no ambiente de trabalho e atinjam a zona de respiração dos trabalhadores. Diferentemente da ventilação geral diluidora, que atua apenas na redução da concentração de poluentes por meio da diluição com ar limpo, a VLE promove a contenção e condução dos agentes nocivos diretamente na fonte, sendo considerada a medida de controle mais eficiente no âmbito da higiene ocupacional (MACINTYRE, 1990; ACGIH, 2023).

A adoção de sistemas de ventilação local é particularmente relevante em processos industriais que envolvem a liberação de poeiras, vapores tóxicos ou gases inflamáveis,

como nas operações de moagem, soldagem, pintura, fundição e manuseio de produtos químicos. Ao capturar os poluentes no ponto de origem, a VLE reduz significativamente o risco de exposição ocupacional, atendendo aos limites de tolerância estabelecidos pelas normas regulamentadoras, como a NR-15 do Ministério do Trabalho e a NHO 01 da (FUNDACENTRO, 2017), que trata da avaliação da exposição a aerodispersóides (ACGIH, 2023).

Além da proteção direta à saúde do trabalhador, a VLE contribui para o bem-estar geral no ambiente de trabalho. Ao remover o calor gerado por equipamentos, gases quentes ou reações químicas, auxilia também no controle térmico do ambiente, o que influencia diretamente na produtividade e na segurança operacional. Do ponto de vista ambiental, a VLE é essencial para viabilizar o tratamento adequado dos poluentes gerados. Para que os contaminantes sejam encaminhados a sistemas de controle como filtros, ciclones, lavadores de gases ou precipitadores eletrostáticos, é necessário que sejam previamente captados e conduzidos por meio de dutos – função fundamental da ventilação local (KAZAROFF, 2004; SANTOS, 2015).

O projeto de um sistema de VLE deve considerar diversos fatores operacionais e ambientais. Entre eles, destacam-se: a natureza do contaminante (pó, gás ou vapor), sua concentração, granulometria e toxicidade; a geometria da fonte de emissão; o tipo de processo produtivo; e as condições físicas do ambiente, como temperatura, umidade relativa, radiação solar, carga térmica dos equipamentos, dimensões do espaço e atividades desenvolvidas. A ACGIH recomenda que o projeto de ventilação seja feito com base em critérios técnicos rigorosos, incluindo o cálculo da velocidade de captura mínima, dimensionamento adequado de captores, dutos, ventiladores e dispositivos de filtragem.

Em resumo, a ventilação local exaustora constitui uma ferramenta de engenharia indispensável para o controle eficaz de agentes contaminantes nos ambientes industriais. Sua correta aplicação promove benefícios multidimensionais, que vão desde a preservação da saúde ocupacional e a conformidade legal, até a sustentabilidade ambiental e o aumento da eficiência operacional dos processos (ACGIH, 2023).

A figura 1, representa um sistema de ventilação local exaustora com múltiplos pontos de captação. O sistema é composto por captores localizados próximos às fontes de emissão, conectados a uma rede de dutos que conduzem o ar contaminado a um coletor de partículas (como ciclone ou filtro). O ventilador gera a pressão necessária para

movimentar o ar no sistema, e a chaminé realiza a descarga do ar tratado para o ambiente externo.

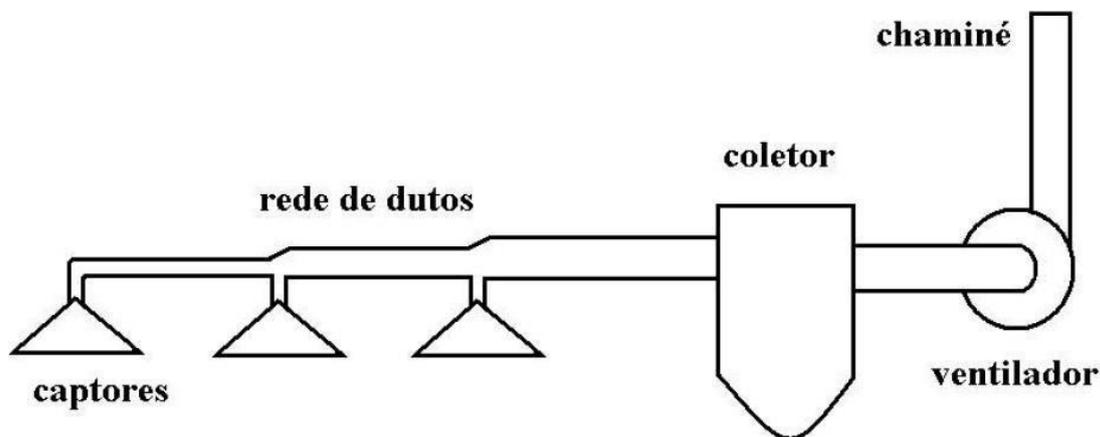


Figura 1 - Esquema de um sistema de ventilação local exaustora
Fonte: Costa (2005)

Os principais elementos componentes do sistema de ventilação local exaustora (captor, dutos, coletor de partículas e ventilador) são descritos a seguir.

2.2.1 Captor

Os captores, também conhecidos como bocais ou coifas, são componentes essenciais nos sistemas VLE, sendo responsáveis por captar os contaminantes diretamente na fonte de emissão. Sua função principal é evitar que poeiras, vapores, gases ou fumos se dispersem pelo ambiente de trabalho, atingindo a zona de respiração do trabalhador. Quando corretamente projetados e posicionados, os captores aumentam significativamente a eficiência do sistema e reduzem a necessidade de grandes vazões de ar (ACGIH, 2023; MACINTYRE, 1990).

Existem diversos tipos de captores utilizados em sistemas de ventilação industrial, e a escolha do modelo mais adequado depende de fatores como o tipo de processo, o comportamento do poluente, a direção do fluxo, a forma da fonte emissora e as características do ambiente de trabalho (OLIVEIRA, 2016).

O captor plano ou reto é comumente aplicado sobre bancadas ou superfícies horizontais, sendo apropriado para operações como lixamento, soldagem e pequenas

moagens. Sua eficiência, entretanto, é limitada quando a fonte poluente está distante ou quando os contaminantes são emitidos em múltiplas direções, exigindo ajustes na vazão de captura ou no posicionamento do equipamento.

A coifa cônica é indicada para processos que geram poeiras direcionadas, como na alimentação de moedores ou em operações com granéis sólidos. Seu formato em funil facilita o direcionamento do fluxo de ar e das partículas para o interior do duto, promovendo uma captação mais concentrada e eficiente (ACGIH, 2022).

Outro modelo amplamente utilizado é a campânula, empregada principalmente sobre fontes de calor ou vapores ascendentes, como fornos, caldeiras e tanques de evaporação. Essa estrutura hemisférica aproveita o movimento de convecção natural dos gases quentes para induzir a entrada do contaminante no sistema de exaustão.

Há também coifas equipadas com malhas ou telas de proteção, recomendadas para processos com risco de projeção de partículas maiores, como moagens grosseiras ou raspagens. Essas proteções evitam que fragmentos danifiquem o sistema ou atinjam o operador, sem comprometer significativamente o fluxo de ar (ACGIH, 2022).

O dimensionamento dos captores deve considerar diversos parâmetros operacionais. A velocidade de captura (V_c) é o mais importante deles, representando a velocidade mínima necessária para atrair o contaminante para dentro do captor. Valores típicos variam entre 0,5 m/s para partículas leves até 2,5 m/s para jatos ou emissões forçadas (FUNDAENTRO, 2017).

Na figura 2 representa-se os principais tipos de captores utilizados em sistemas de ventilação local exaustora, com destaque para suas extremidades e formas de ligação com os dutos. A eficiência de cada modelo varia conforme sua geometria, sendo a boca arredondada e as conexões com peças cônicas ou flangeadas as mais indicadas para reduzir perdas de carga e melhorar o fluxo de ar.

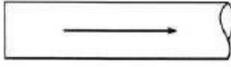
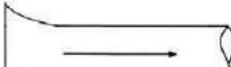
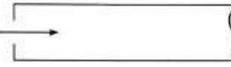
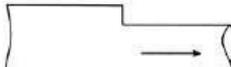
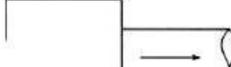
Tipo de captor	Descrição
	Extremidade plana de duto
	Extremidade de duto flangeada
	Boca bem arredondada
	Orifício de cantos vivos
	Captor direto no duto
	Orifício mais duto flangeado ($C_{orifício} = C_{duto}$)
	Captor ligado ao duto por peça cônica: circular retangular
	Captor ligado ao duto por peça arredondada

Figura 2 – Captores
Fonte: Adaptado de Cruz da Costa (2005)

Segundo a *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (1998) a definição dessas velocidades é:

- Velocidade de captura: é a velocidade do ar em qualquer ponto em que é gerado o contaminante (fonte), necessária para superar correntes de ar opostas, capturar o ar contaminado nesse ponto e realizar o escoamento para dentro do captor;

- Velocidade na face: velocidade do ar na face do captor;
- Velocidade na fenda ou ranhura: velocidade do ar através da abertura em captor do tipo fenda ou ranhura, utilizada primordialmente para que se obtenha uma distribuição uniforme do ar ao longo da face do captor;

- Velocidade no *plenum*: é a velocidade do ar na câmara de distribuição (*plenum*), responsável por uniformizar o escoamento antes da fenda de captação. Para garantir boa distribuição do ar, recomenda-se que essa velocidade seja no máximo a metade da velocidade na fenda.

- Velocidade no duto: é a velocidade do ar na seção transversal do duto. Quando houver material sólido presente no fluxo de ar, a velocidade no duto deverá ser maior ou igual a velocidade mínima para se mover o particulado sólido no fluxo.

De acordo com Mesquita, Guimarães, Nefussi (1988), para que um captor esteja devidamente dimensionado é necessário levar em conta fatores como:

- A forma e dimensões;
- A posição no espaço, principalmente em relação à fonte de emissão das partículas poluidoras;
- A vazão necessária para capturar os poluentes completamente;
- A energia (perda de carga);
- O fluxo de gases.

Valdiero e Thesing (2016), complementam que para a vazão de ar a ser exaurida pelo captor, em um sistema de ventilação local exaustora, todos os poluentes presentes no local de exaustão devem ser coletados.

2.2.2 Coletores

Os coletores, ou equipamentos de controle de poluição, são equipamentos que tem como função remover, com eficiência, os contaminantes do ar e agem de forma a não permitir que a área circunvizinha ao processo seja contaminada pelas partículas (CLEZAR; NOGUEIRA, 2009).

Macintyre (1990), em sua obra, divide os coletores em:

- Filtros de ar: comumente usados para reter e remover poeiras. Trata-se de filtros de diversas classes e filtros de manga;

- Coletores de partículas: utilizados para remover partículas em maiores quantidades. Trata-se de coletores gravitacionais (câmara gravitacional ou de sedimentação), coletores inerciais (funcionam a partir da inércia da própria partícula), coletores centrífugos (ciclones e multiciclones), lavadores (lavador de ar, lavador com torre de enchimento, ciclone úmido) e precipitadores eletrostáticos (respeita o princípio físico de que uma partícula em um fluxo gasoso e transportada eletricamente sob a influência de um corpo elétrico; é separada da corrente gasosa);
- Lavadores de gases, torres de absorção, precipitadores hidrodinâmicos, incineradores: removem gases e vapores do ar previamente, ou seja, antes de serem liberados para a atmosfera.

A tabela 1 mostra uma comparação entre os principais tipos de coletores de partículas, indicando o tamanho mínimo de partícula que cada tecnologia é capaz de reter, conforme suas características construtivas e princípio de funcionamento (COSTA,2005).

Tabela 1 - Seleção do coletor com base na granulometria de partículas

Tipo de coletor	Tamanho mínimo da partícula coletada (µm)
Câmaras de gravidade	200
Câmaras inerciais	50 a 150
Ciclones grandes	40 a 60
Ciclones pequenos	20 a 30
Rotociclones	15 a 30
Coletores úmidos	0,5 a 2
Filtros de tecidos	0,5
Filtros eletrostáticos	0,001 a 1

Fonte: Costa (2005)

A figura 3 permite visualizar o funcionamento de um ciclone e baseia-se na entrada tangencial do ar, que induz um movimento helicoidal no interior do equipamento. Esse movimento gera uma aceleração centrípeta, responsável por manter as partículas em trajetória circular, o que resulta em uma força centrífuga aparente que as impulsiona em direção às paredes do ciclone. Ao colidirem com a parede, as partículas perdem velocidade (desaceleração) e, por efeito da gravidade, são conduzidas para a parte inferior do equipamento, onde se acumulam. Esse processo permite a separação do material particulado do fluxo de ar, de forma relativamente simples e eficiente (COSTA, 2005).

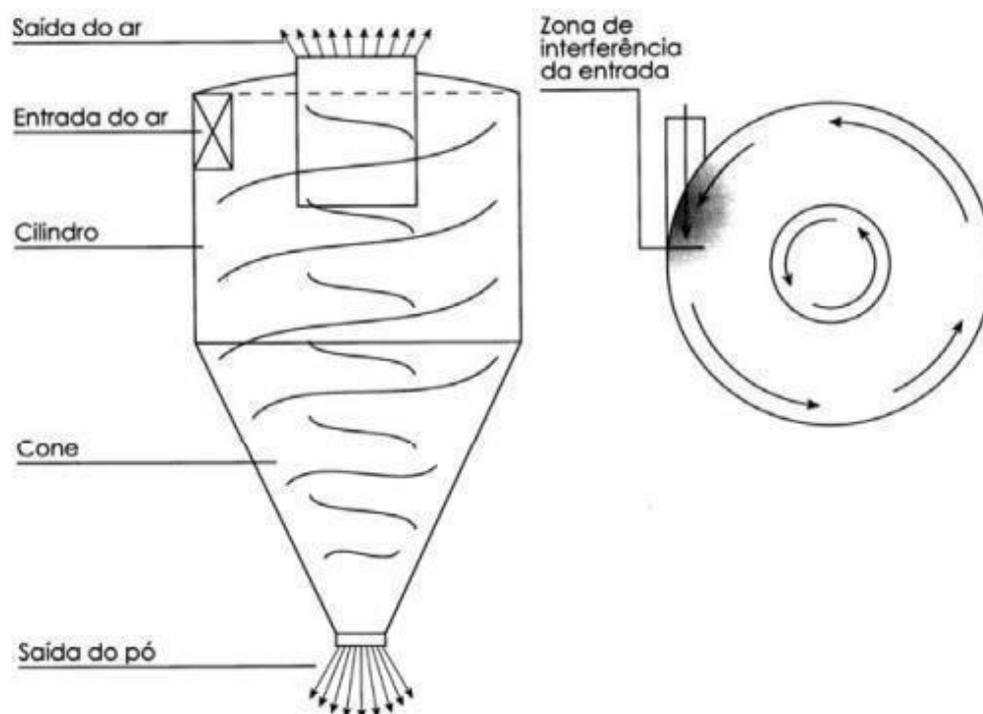


Figura 3 – Ciclone
Fonte: Costa (2005)

2.2.3 Ventiladores

Ventiladores são equipamentos indispensáveis em sistemas de ventilação industrial, sendo responsáveis por promover o deslocamento do ar em processos de exaustão, insuflação e climatização. De acordo com Valdiero e Thesing (2016), os ventiladores funcionam como máquinas de fluxo que convertem energia mecânica em energia do fluido (ar ou gás), promovendo o aumento da pressão e do fluxo de ar à medida que este atravessa o rotor. A energia transferida ao fluido pode ser percebida sob a forma de aumento de velocidade, pressão ou ambas, dependendo do tipo de ventilador empregado.

Segundo a Otam Ventiladores Industriais (2003), a grande diversidade de aplicações industriais impulsionou o desenvolvimento de diferentes tipos e modelos de ventiladores, otimizados conforme as características do sistema e as exigências do processo. A classificação mais comum divide os ventiladores em três categorias principais:

Ventiladores centrífugos: o ar entra axialmente no rotor (ao longo do eixo) e é desviado em ângulo reto, saindo radialmente. São recomendados para sistemas com altas

perdas de carga, como aqueles que envolvem filtros, ciclones, dutos longos e captosres com geometrias complexas (KAZAROFF, 2004).

Ventiladores axiais: o fluxo de ar é mantido predominantemente na direção axial tanto na entrada quanto na saída. Esse tipo de ventilador é mais adequado para sistemas com baixas perdas de carga, onde se deseja grande vazão com baixa elevação de pressão (KAZAROFF, 2004).

Ventiladores de fluxo misto: combinam características dos dois anteriores, promovendo o escoamento do ar em ângulo intermediário (entre axial e radial). São empregados em situações em que se busca compromisso entre vazão e pressão (KAZAROFF, 2004).

Mesquita, Guimarães, Nefussi (1988), detalha os subtipos de ventiladores, classificados segundo a geometria das pás e a forma do rotor:

- Ventiladores axiais:

- Tipo propulsor: alta vazão e baixa pressão.
- Comum: pás fixas, com desempenho estável.
- Comgüias diretrizes: com maior controle do fluxo e melhor rendimento.

- Ventiladores centrífugos:

- Com pás curvadas para trás: alta eficiência energética, baixa sensibilidade poeira.
- Com pás retas: boa resistência a sólidos e abrasivos, comum em exaustão de particulados.
- Com pás curvadas para frente: maior elevação de pressão, porém menor eficiência.

Cada tipo de ventilador apresenta desempenho específico, e sua escolha depende da relação entre a vazão requerida e a pressão estática ou total do sistema. Segundo Valdiero e Thesing (2016), a pressão estática é composta pelas perdas nos captosres, dutos, curvas, filtros e demais componentes, sendo indispensável sua correta estimativa para o dimensionamento adequado do ventilador. Quando o sistema exige pressão constante em regime contínuo, deve-se preferir ventiladores de alto rendimento e curvas estáveis, como os centrífugos com pás curvadas para trás (FUNDACENTRO, 2017).

No cálculo de sistemas de exaustão, é fundamental utilizar a pressão estática que engloba as pressões nos captores, dutos e junções. Para escolher o ventilador correto, é necessário conhecer a vazão de exaustão do sistema, bem como a pressão estática ou a pressão total do ventilador (VALDIERO; THESING, 2016).

A pressão total do ventilador (PVT), conforme Clezar e Nogueira (2009), é definida como o aumento da pressão total e pode ser expressa pela seguinte equação:

$$PVT = PT_s + PT_e = (PE_s + P_{ds}) - (PE_e + P_{de}) \quad (1)$$

Em que:

- PT é a pressão total;
- PE é a pressão estática (geralmente negativa na entrada e positiva na saída);
- Pd é a pressão dinâmica (sempre positiva);
- e refere-se à entrada; - s refere-se à saída.

Além disso, a curva característica do ventilador — que relaciona vazão, pressão e potência consumida — deve ser compatível com a curva do sistema, garantindo que o ponto de operação esteja situado em região estável e segura, evitando sobrecargas ou instabilidades (MUNSON et al., 2010).

Para identificar o ponto de operação ideal de um ventilador em um sistema, basta sobrepor as curvas características do sistema e do próprio ventilador, conforme ilustrado na Figura 4.

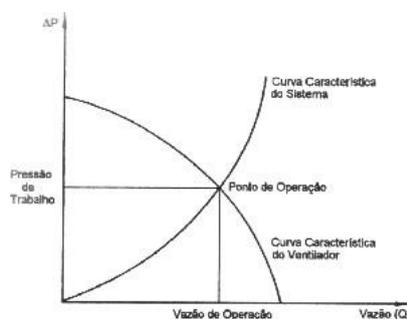


Figura 4 - Ponto de operação ideal
Fonte: Mesquita; Guimarães; Nefussi (1988)

Assim, o ponto de operação ideal de um sistema de ventilação, definido pela interseção entre a curva característica do ventilador e a curva do sistema. Esse ponto

estabelece a vazão de operação e a pressão de trabalho, de forma a garantir o ponto ideal, evitando tanto a subutilização quanto a sobrecarga do equipamento, representando o equilíbrio entre a capacidade do ventilador e as perdas de carga do sistema (MESQUITA; GUIMARÃES; NEFUSSI, 1988).

2.2.4 Dutos

Para o dimensionamento de um sistema de dutos é necessário conhecer a vazão que será captada e a velocidade que o ar conduzirá as partículas de poeira no duto. As vazões em projetos industriais geralmente são elevadas, resultando velocidades igualmente altas nos ramais. Diferente do que ocorre nos projetos de condicionamento de ar para conforto térmico, nos quais as velocidades são restringidas pelo ruído, nos projetos industriais estes limitantes não existem.

A tabela a seguir apresenta valores típicos do fator de exaustão (K), em m³/h por kg/h de produção, com base em diretrizes da ACGIH (2022) e práticas industriais para controle de poeiras em processos diversos:

Tabela 2 - Fator de exaustão (k)

Processo / Condição Operacional	Tipo de Material	Geração de Poeira	Grau de Enclausuramento	Valor típico de K (m ³ /h por kg/h)	Referência / Observação
Moagem de grãos finos (ex: milho, trigo, arroz)	Farinha / pó fino	Alta	Pouco ou nenhum	5,0 a 6,0	ACGIH (2022), Torres (2009), uso em processos agrícolas
Moagem com câmara parcialmente enclausurada	Farelos médios	Média	Parcial	4,0 a 5,0	Menor emissão por confinamento parcial
Mistura ou peneiramento de grãos secos	Farelos secos	Média	Parcial	3,5 a 5,0	Conforme ACGIH e prática em armazéns
Transporte pneumático (com ciclone ou filtro)	Pó seco	Alta	Total	4,0 a 5,5	Sistema com controle de emissão
Manuseio de materiais úmidos ou granulados (ex: grão úmido)	Úmido / pouco pulverulento	Baixa	Irrelevante	2,0 a 3,0	Baixa emissão – exaustão pode não ser necessária
Moagem de minerais ou cimento	Pó fino abrasivo	Muito alta	Nenhum	6,0 a 8,0	Necessita controle rigoroso de poeira

Fonte: Adaptado de ACGIH (2022)

Apesar das altas velocidades, o escoamento pode ser considerado incompressível, e para os cálculos da perda de carga e as propriedades do fluido, a presença do contaminante pode ser desconsiderada. O dimensionamento de dutos baseia-se na equação da continuidade e no princípio da conservação de energia para fluidos em escoamento, descrito pela equação de Bernoulli. Pela equação da continuidade tem-se que a vazão em um duto circular é calculada pela como:

$$Q = K.P \quad (2)$$

Q = vazão de ar [m³/s];

K = fator de exaustão [m³/h por kg/h];

P = quilograma de material processado por hora (kg/h).

A equação de Bernoulli para o escoamento permanente incompressível em dutos considerando a perda de carga é:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_g = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_p \quad (3)$$

Em que: ρ = massa específica do fluido [kg/m³];

P = pressão estática do fluido [Pa];

V = velocidade do fluido [m/s];

Z = altura em relação ao ponto de referência [m];

h_g = ganho de energia [m];

h_p = perda de carga ou energia dissipada [m].

O primeiro termo da equação de Bernoulli é a pressão estática, que representa a energia de pressão. Já o segundo termo é a pressão dinâmica, que corresponde a energia cinética. O último termo é a energia de posição, expressando a altura de um ponto em relação a um nível de referência. Em sistemas de ventilação, esse termo possui um valor insignificante; entretanto, em líquidos, onde a densidade é maior, esse termo torna-se crucial. As perdas no escoamento são predominantemente atribuídas à resistência viscosa

do ar, ao atrito nas paredes do duto em curvas, aos acessórios presentes na tubulação, filtros, captadores, mudança de seção, entre outros (MACINTYRE, 1990). Em 1850, Julius Weisbach propôs as seguintes correlações:

$$\Delta_p = K \frac{\rho V^2}{2} \quad (4)$$

$$\Delta_p = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (5)$$

f = fator de atrito de Darcy [adimensional];

K = coeficiente de carga localizada [adimensional];

L = comprimento do trecho da tubulação [m];

Δ_p = perda de carga distribuída [Pa].

O nome do fator de atrito foi concedido em homenagem a Henry Darcy, que em 1857, destacou a importância da rugosidade nos escoamentos turbulentos. O número de Reynolds, o formato do duto e a rugosidade tem influência sobre o fator de atrito (WHITE, 2011). Em escoamentos laminares, o fator de atrito dependerá apenas do número de Reynolds (a rugosidade não exerce ação sobre o fator de atrito).

$$f_{lam} = \frac{64}{Re} \quad (6)$$

Em que:

f_{lam} = fator de atrito em escoamento laminar [adimensional];

Re = número de Reynolds [adimensional].

O número de Reynolds é dado pela seguinte fórmula:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (7)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (8)$$

Em que:

ν = viscosidade cinemática [m²/s];

μ = viscosidade dinâmica [kg/m-s].

Já em 1939, Colebrook uniu as equações de fator de atrito escoamento em parede lisa e totalmente rugoso e chegou na seguinte equação:

$$f = \frac{1,325}{\left[\ln\left(\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (9)$$

ϵ = rugosidade da tubulação [m].

Esta equação é utilizada para determinar o fator de atrito em escoamento turbulento, o fator de atrito f também pode ser obtido de acordo com o diagrama de Moody, apresentado na figura 5.

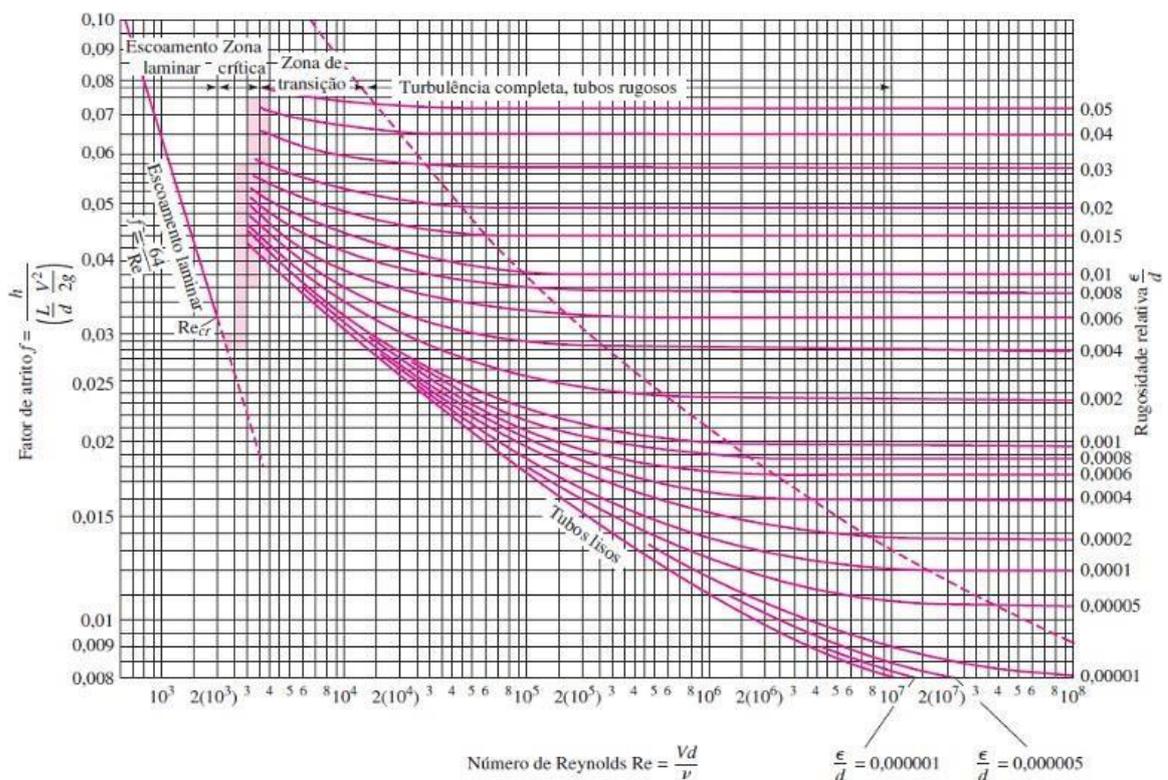


Figura 5 - Diagrama de Moody
Fonte: White (2011)

Na construção de sistemas de ventilação local exaustora, a geometria dos dutos exerce papel fundamental no desempenho do sistema, influenciando diretamente nas perdas de carga, no consumo de energia e na eficiência do transporte do ar contaminado. Elementos como curvas, derivações, reduções e expansões devem ser cuidadosamente projetados para minimizar turbulências e resistências ao escoamento do ar. Segundo a *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH, 2023), curvas com raio curto, mudanças abruptas de seção e derivações mal posicionadas podem representar aumentos significativos nas perdas de carga, exigindo ventiladores mais potentes e aumentando o consumo energético do sistema.

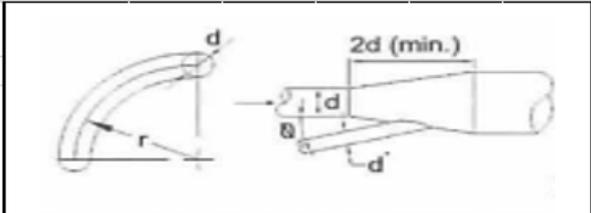
Além disso, o layout físico do ambiente industrial precisa ser considerado no traçado dos dutos, respeitando as limitações estruturais do espaço, o acesso a equipamentos e a ergonomia do ambiente de trabalho. O projeto deve buscar o melhor equilíbrio entre desempenho técnico e viabilidade física, adotando soluções como transições suaves, divisores internos e entradas tangenciais quando necessário (MACINTYRE, 1990; KAZAROFF, 2004).

Outro aspecto essencial no projeto é a previsão de portas de inspeção em locais estratégicos do sistema, como curvas, derivações e mudanças de direção. Esses pontos são especialmente suscetíveis ao acúmulo de poeira e materiais particulados, o que pode comprometer o funcionamento do sistema ao longo do tempo. A presença de aberturas de inspeção facilita a manutenção preventiva e a limpeza periódica, aumentando a vida útil dos componentes e garantindo a eficiência da exaustão (FUNDACENTRO, 2017).

Para os cálculos de perda de carga localizadas pode-se utilizar tanto o método da pressão dinâmica quanto o método do comprimento equivalente (CLEZAR; NOGUEIRA, 2009).

Para o método do comprimento equivalente é possível substituir os acessórios por um comprimento de duto reto que possui perda de carga equivalente. E pode ser calculado utilizando a seguinte tabela, de acordo com Valdiero e Thesing (2016).

Tabela 3 - Comprimento equivalente



Diâmetro em (mm)	Cotovelo de 90°			Ângulo de entrada	
	Raio de curvatura			30°	45°
	1,5d	2,0d	2,5d		
75	1,4	0,9	0,7	0,5	0,9
100	2,0	1,3	1,1	0,8	1,3
125	2,6	1,7	1,4	1,1	1,7
150	3,2	2,2	1,8	1,4	2,2
175	3,9	2,6	2,2	1,7	2,6
200	4,6	3,1	2,5	2,0	3,1
250	6,0	4,0	3,3	2,6	4,0
300	7,4	5,0	4,1	3,2	5,0
350	8,9	6,0	5,0	3,8	6,0
400	10,0	7,0	5,8	4,5	7,0
450	12,0	8,1	6,7	5,2	8,1
500	14,0	9,2	7,6	5,9	9,2
600	17,0	11,0	9,5	7,3	11,0

Fonte: Adaptado de Clezar e Nogueira (2009).

A tabela 3 é utilizada para determinar o comprimento equivalente para cotovelos de 90° com base no diâmetro da tubulação. Utilizou-se o raio de curvatura de 2,0d.

2.3 Velocidade de Captura e de Transporte

Segundo Macintyre (1990), a velocidade de captura é definida como a velocidade do ar necessária no ponto onde está o poluente, a fim de que ele possa ser transportado até o captor, superando a ação de seu próprio peso. Trata-se, portanto, da velocidade mínima capaz de induzir o deslocamento do contaminante na direção do sistema de exaustão.

No início de qualquer projeto de ventilação industrial, é fundamental estabelecer corretamente o valor da velocidade de captura, pois ela, associada ao tipo de captor utilizado, determina o ponto de partida para o dimensionamento do sistema (MACINTYRE, 1990). A correta definição desse parâmetro é essencial para garantir que o contaminante seja removido antes que se disperse pelo ambiente de trabalho.

Costa (2005) reforça que o captor deve ser projetado para envolver ou abranger adequadamente a fonte emissora do poluente, garantindo que os materiais particulados sejam capturados de maneira eficaz. Assim, a velocidade de captura deve ser suficiente para direcionar os contaminantes para o sistema de exaustão no momento de sua emissão.

No caso específico de máquinas de beneficiamento de milho, como debulhadoras, peneiras vibratórias e classificadoras, há uma significativa geração de material particulado orgânicos e partículas em suspensão. Essas partículas, quando inaladas, podem causar danos à saúde dos operadores, como doenças respiratórias ocupacionais. Portanto, é imprescindível que os sistemas de ventilação dessas máquinas operem com velocidades de captura adequadas para o controle eficaz dos contaminantes.

De acordo com a *American Conference of Governmental Industrial Hygienists – ACGIH* (1998), operações similares que envolvem liberação de poeiras em processos de manuseio de grãos exigem velocidades de captura na ordem de 2000 pés por minuto (fpm), equivalentes a aproximadamente 10,16 metros por segundo (m/s). Este valor garante que as partículas sejam captadas no instante de sua emissão, reduzindo os riscos à saúde e melhorando as condições ambientais nas instalações industriais.

Além disso, a velocidade, como observado na tabela 4, precisa ser compatível com o tipo de contaminante que será removido pelo sistema de ventilação local exaustora (CLEZAR e NOGUEIRA, 2009).

Tabela 4 - Velocidade dos contaminantes

Natureza do contaminante	Exemplos	Velocidades de projeto [m/s]
Vapores, gases e fumaça	Vapor da água, fumaça da queima de carvão	Qualquer velocidade (normalmente de 5 – 10)
Fumos	Compostos Metálicos	10 – 13
Poeira fina	Fibra de algodão, pó de madeira	13 – 15
Poeiras secas e pós	Pó de borracha, pó de algodão	15 – 18
Poeira industrial média	Grão de café, pó de granito, pó de moagem	18 – 20
Poeira grossa	Serragem, rebarbas de metal	20 – 23
Poeira grossa ou úmida	Pó de cimento úmido, pós de chumbo com pequenas lascas	Maior que 23

Fonte: Adaptado de ACGIH (1998)

Mendes et al. (2014) observam ainda que a seleção da velocidade de captura deve levar em consideração não apenas o tipo de contaminante e a natureza da operação, mas também fatores como densidade das partículas, temperatura, pressão e dinâmica do ar no ambiente de trabalho. Um sistema superdimensionado pode gerar consumo excessivo de energia, enquanto um subdimensionado compromete a eficácia da ventilação.

A tabela de Hudson apresenta fórmulas empíricas que levam em conta não só a granulometria e peso específico do material, mas também sua natureza e as características do circuito. Se horizontal ou vertical, se os dutos são de mangueiras flexíveis ou tubulação em chapas de aço, como apresentado na tabela 5:

Tabela 5 - Velocidade recomendadas (Hudson)

Dutos	Material	c_f (m/s)	c_{ar} (m/s) mangueiras	c_{ar} (m/s) dutos de chapa
Horizontais	Pó	$0,0030 \sqrt{d_{\mu m} \gamma_m}$	$1,20 \sqrt{\gamma_m}$	$0,75 \sqrt{\gamma_m}$
	Grão	$0,0038 \sqrt{d_{\mu m} \gamma_m}$	$1,52 \sqrt{\gamma_m}$	$0,91 \sqrt{\gamma_m}$
	Irregular	$0,0045 \sqrt{d_{\mu m} \gamma_m}$	$1,83 \sqrt{\gamma_m}$	$1,13 \sqrt{\gamma_m}$
Verticais	Pó	$0,0060 \sqrt{d_{\mu m} \gamma_m}$	$1,52 \sqrt{\gamma_m}$	$0,95 \sqrt{\gamma_m}$
	Grão	$0,0075 \sqrt{d_{\mu m} \gamma_m}$	$1,83 \sqrt{\gamma_m}$	$1,13 \sqrt{\gamma_m}$
	Irregular	$0,0090 \sqrt{d_{\mu m} \gamma_m}$	$2,28 \sqrt{\gamma_m}$	$1,42 \sqrt{\gamma_m}$

Fonte: Costa (2005)

Assim, a tabela 5 apresenta as velocidades recomendadas para diferentes condições de transporte pneumático, considerando a orientação dos dutos (horizontais ou verticais) e o tipo de material conduzido (pó, grão ou partículas irregulares). O parâmetro (c_f) representa o coeficiente de perda de velocidade em função do atrito e das características do material, enquanto (c_{ar}) indica a velocidade do ar no interior dos dutos, variando conforme o tipo de conduto (mangueiras ou dutos de chapa). Esses coeficientes permitem calcular a velocidade mínima necessária para garantir o transporte adequado das partículas, assegurando a suspensão do material e evitando tanto o acúmulo nos dutos quanto perdas excessivas de carga no sistema.

2.4 Dimensionamento e Eficiência do Ciclone

Conforme apontado por Macintyre (1990), a especificação de um ciclone se baseia em suas dimensões padronizadas. Há duas categorias principais para escolher: o ciclone-

padrão A, otimizado para alta eficiência, e o ciclone-padrão B, voltado para média eficiência. O ponto de partida para esse dimensionamento é sempre o cálculo do diâmetro do ciclone, um valor que precisa ser derivado da vazão de ar Q (em pés por minuto).

$$\text{Ciclone padrão A: } Q = 300 \cdot d^2 \text{ (pés}^3\text{/min)} \quad (10)$$

$$\text{Ciclone Padrão B: } Q = 800 \cdot d^2 \text{ (pés}^3\text{/min)} \quad (11)$$

Na figura 6, observa-se as principais variáveis geométricas que compõem a estrutura do ciclone, como a largura do duto de entrada (ℓ), altura da entrada (h), diâmetro da chaminé (d_d), altura do corpo cilíndrico (s), comprimento da parte cilíndrica (L) e comprimento da parte cônica (L'). Esses parâmetros são fundamentais para o dimensionamento e desempenho do equipamento, influenciando diretamente a eficiência de separação e a perda de carga do sistema.

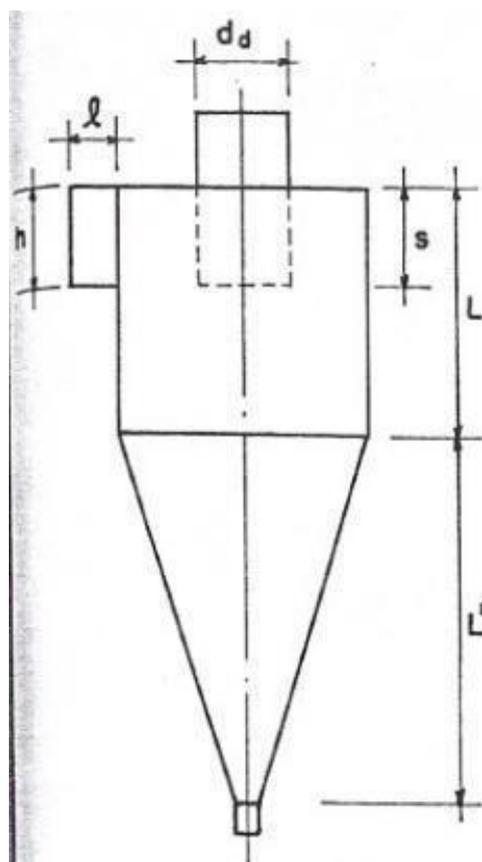


Figura 6 - Dimensões do ciclone
Fonte: Macintyre (1990)

Segundo Stairmand (1951), o correto dimensionamento dessas variáveis é essencial para o desempenho ótimo do ciclone, garantindo a adequada retenção das partículas e o menor consumo energético possível.

A tabela 6 apresentada fornece os fatores multiplicativos utilizados para o dimensionamento geométrico de dois modelos de ciclones padrões, denominados Ciclone padrão A e Ciclone padrão B, baseando-se em proporções relativas ao diâmetro do corpo principal do ciclone (d).

Tabela 6 - Fatores para dimensões do ciclone

Modelo	Fator multiplicativo						
	d	h	l	s	d_d	L	L'
Ciclone padrão A	1	0,5	0,2	0,5	0,5	1,5	2,5
Ciclone padrão B	1	0,75	0,375	0,875	0,75	1,5	2,5

Fonte: Adaptado de Macintyre (1990)

A perda de carga em ciclones é expressa em polegadas de coluna d'água (*Pol.de água*). Esse parâmetro indica a resistência que o fluxo de ar encontra ao atravessar o ciclone, calculado conforme mostrado na Equação (12).

$$\Delta_p = \frac{12.l.h}{k.d_d^2 \cdot \sqrt[3]{\frac{L^3}{d} \sqrt{\frac{L}{d}}}} \quad (12)$$

Para o cálculo da eficiência do ciclone de poeira, um componente essencial no sistema de controle de emissões, que é definida como a capacidade de remover partículas suspensas no fluxo gasoso.

Assim, adotou-se a metodologia de cálculo baseada na força centrífuga, a qual considera a separação das partículas devido ao movimento rotacional das partículas no interior do ciclone. Logo, para a determinação do diâmetro médio de partícula coletado com 50% de eficiência d_{50} , utiliza-se a Eq. (13). Esta equação relaciona as propriedades do escoamento e das partículas, sendo expressa por:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot B_c}{2 \cdot \pi \cdot N_e \cdot V_i \cdot (\rho_p - \rho_g)}} \quad (13)$$

Dessa forma, o valor de (d_{50}), indica o diâmetro limite a partir do qual as partículas possuem 50% de probabilidade de serem coletadas, constituindo um parâmetro essencial para a avaliação da eficiência global do ciclone.

Em que:

- d_{50} = Diâmetro de corte (m);
- μ = Viscosidade dinâmica do gás (em Pa·s ou kg/(m·s));
- B_c = Largura da entrada do ciclone (m);
- N_e = Número de voltas efetivas que o gás executa no ciclone;
(Para um ciclone padrão tipo Lapple, um valor comum é $N_e=5$.);
- V_i = Velocidade de entrada do gás no ciclone (em m/s);
- ρ_p = Massa específica (densidade) da partícula (em kg/m³);
- ρ_g = Massa específica (densidade) do gás (em kg).

Por fim, para o cálculo de eficiência, Leith & Licht (1972) utiliza-se:

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_{pi}}\right)^\beta} \quad (14)$$

Em que:

- d_{pi} = Diâmetro da partícula (em μm);
- β = Parâmetro de inclinação.

Para o β descreve a "nitidez" da curva de eficiência fracionária. Valores maiores de β indicam uma separação mais eficiente em uma faixa estreita de tamanhos de partícula (LEITH e LICHT 1972).

- Para $\beta = 1$ a curva é muito suave: a eficiência aumenta gradualmente com o diâmetro;
- Para $\beta = 2$ temos uma transição mais marcada em torno de d_{50} ;

- Para $\beta=5$ e $\beta=10$ a curva fica muito íngreme: partículas um pouco menores que d_{50} têm eficiência praticamente nula e um pouco maiores têm eficiência muito alta — ou seja, alta seletividade (curva “nítida”).

2.5 Processo de Produção

A moagem é um processo amplamente empregado na indústria de alimentos e rações, tendo como principal finalidade a redução do tamanho das partículas por meio da fragmentação de grãos. Essa etapa é normalmente realizada utilizando moinhos de martelo ou de rolos, os quais promovem a quebra mecânica dos materiais (FERREIRA et al., 2018).

A diminuição do tamanho das partículas resulta em maior área superficial específica, o que favorece processos subsequentes, como a mistura, a gelatinização do amido e a digestibilidade dos nutrientes (MARTINS et al., 2020). Entretanto, apesar da fragmentação, a moagem não é suficiente para romper a matriz proteica dos grãos de forma significativa, mantendo parte das estruturas intactas (SILVA & COSTA, 2017).

Na figura 7, observa-se um sistema integrado composto por moedor de grãos, ventilador centrífugo e ciclone separador. Esse conjunto é utilizado para realizar a moagem de grãos, promover o transporte pneumático do material particulado e, posteriormente, realizar a separação das partículas sólidas do fluxo de ar. O ventilador cria o fluxo necessário para transportar o pó moído até o ciclone, onde ocorre a deposição do material em função da força centrífuga.



Figura 7 - Sistema de moagem
Fonte: conquistamaquinas/triturador-de-milho

A figura 8, representa a amostra de fragmentos de grãos de milho em peneiras com diferentes diâmetros de malha. A primeira imagem, à esquerda, ilustra uma peneira com furos hexagonais de 6,00 mm, seguida por peneiras de 3,25 mm, 2,00 mm e 1,25 mm, respectivamente. A última imagem, à direita, representa o fundo da coluna de peneiras, onde são retidos os fragmentos de menor granulometria. A série de imagens demonstra o processo de classificação granulométrica de uma amostra de milho através de peneiramento.

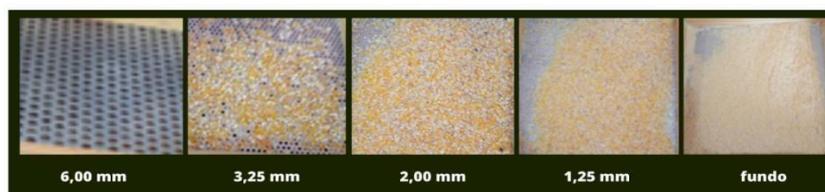


Figura 8 - Granulometria
Fonte: irancho.com.br/granulometria

Essa análise visual demonstra de forma clara como a moagem resulta em partículas de diferentes tamanhos e como a peneiragem é utilizada para quantificar e classificar essa distribuição granulométrica. A uniformidade do tamanho das partículas é fundamental para definir o tipo de coletor.

2.6 Equipamento

Na figura 9, tem-se a vista panorâmica de um sistema de moagem e separação de sólidos particulados por via pneumática, comumente utilizado em operações de processamento de grãos, como o milho.



Figura 9 - Triturador TRF-750
Fonte: Trapp

O sistema é composto por duas unidades principais:

1. Unidade de Moagem (à esquerda):

- Moinho (1): Trata-se de um moinho de martelos, equipamento de redução de tamanho por impacto, onde a matéria-prima é pulverizada ao colidir com martelos que giram a alta velocidade dentro da caixa de moagem. A eficiência do processo é determinada pela velocidade de rotação, pelo design dos martelos e pelo tamanho da peneira interna que retém o material até que atinja a granulometria desejada.
- Motor Elétrico (2): Atua como a força motriz do sistema. Converte energia elétrica em energia mecânica rotacional, transmitindo o movimento ao

rotor do moinho através de um sistema de transmissão (polias e correias, não visíveis na imagem).

- Tremonha de Alimentação (3): Funil de entrada onde o material a ser moído é carregado manualmente ou por um sistema de alimentação. Seu formato cônico garante o fluxo contínuo do material para o interior da câmara de moagem por gravidade.

2. Unidade de Separação (à direita):

- Ventilador/Exaustor (4): Principal componente do transporte pneumático. Gera um fluxo de ar que cria uma pressão negativa (vácuo) na tubulação, succionando o material moído do moinho e transportando-o em suspensão até a entrada do ciclone.
- Tubulação de Transporte (5): Canaliza o fluxo de ar e material particulado do moinho para o ciclone.
- Ciclone (6): Equipamento de separação inercial que utiliza a força centrífuga para remover partículas sólidas do fluxo gasoso. O fluxo de ar e sólidos entra tangencialmente, criando um movimento espiral. As partículas mais densas são arremessadas contra a parede do ciclone, perdem velocidade e caem no cone inferior, onde são coletadas. O ar limpo sobe pelo centro do ciclone e é exaurido pelo ventilador.
- Estrutura de Suporte (7): Garante a estabilidade e o correto posicionamento vertical do ciclone e do exaustor.

O triturador TRF-750 é utilizado para moer, cortar e triturar sementes e cascas de cereais, cana-de-açúcar, capim, ramas de mandioca entre outros. O modelo é acionado por motor elétrico, as lâminas de corte são em aço, sua transmissão de força é através de correias.

As características técnicas do triturador são:

- Nome Produto: Triturador Forrageiro TRF-750 7,5cv Monofásico Motor WEG 220/440v, acompanha o conjunto Ciclone Trapp;
- Fabricante: Trapp;
- Diâmetro da polia (mm): 100;
- Comprimento da tubulação (m): 1,5;
- Número de canais: 2;

- Tipos de correia: B-75;
- Quantidade de correias: 2;
- Rotação do disco (rpm): 3.700;
- Tipo de martelo: móvel;
- Número de martelos: 20;
- Número de facas: 2.

As características de produção do triturador são dadas em função das peneiras:

- Peneira de 3 mm: 550/700 kg/h (Quirera fina);
- Peneira de 5 mm: 600/1.000 kg/h (Quirera grossa);
- Peneira de 12 mm: 800/1.100 kg/h (Rolão);
- Peneira lisa: 2.000/3.100 kg/h (Ração verde).

Assim, foi utilizada para o desenvolvimento do trabalho a peneira de 3mm com uma taxa de produção de 700 kg/h, caracterizando assim, a produção de quirera fina.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo é apresentado o tipo de pesquisa assim como os materiais e métodos utilizados para elaboração do projeto.

3.1 Tipo de Pesquisa

De acordo com Gil (2002, p.17), a pesquisa pode ser definida como:

Procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos. A pesquisa é requerida quando não se dispõe de informações suficientes para responder ao problema, ou então quando a informação disponível se encontra em tal estado de desordem que não possa ser adequadamente relacionada ao problema.

Logo, a pesquisa pode ser classificada objetivamente em três tipos, descritiva, exploratória e explicativa. O principal objetivo das pesquisas descritivas é analisar, descrever e observar por meio de dados os fenômenos ou população avaliados. A pesquisa exploratória tem como objetivo desenvolver maior familiaridade com o assunto, com intuito de torná-lo mais explícito ou construir hipóteses. Por sua vez a pesquisa explicativa tem como intuito identificar fatores determinantes ou contribuem para o aumento de ocorrências dos eventos (GIL, 2002).

Esse trabalho se trata de uma pesquisa exploratória, que pode ser definida, de acordo com Lakatos e Marconi (2021) como, “investigações [...] cujo objetivo é a formulação de questões ou de um problema, com tripla finalidade: desenvolver hipóteses, aumentar a familiaridade do pesquisador com um ambiente, [...] ou modificar e clarificar conceitos.” Além disso, Gil (2002) conceitua as pesquisas exploratórias como a primeira etapa para se obter uma investigação mais ampla sobre o assunto abordado.

A forma de abordagem do problema, a pesquisa ainda pode ser dividida em quantitativa e qualitativa. A pesquisa quantitativa é aquela em que é possível se traduzir em números, opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Utiliza-se muito de recursos e técnicas estatísticas. Já a pesquisa qualitativa é aquela em que há uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito, ou seja, uma relação indissociável entre o mundo objetivo e o subjetivo. O ambiente natural é a principal fonte de busca de informações assim como o pesquisador é o instrumento-chave (MARCONI; LAKATOS, 2021).

Logo, esse trabalho tem caráter quantitativo uma vez que se trata de um projeto de instalação industrial local exaustora e é apresentado os resultados.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, Gil (2002), aponta as seguintes possibilidades:

- Pesquisa Bibliográfica: quando for baseado em material já publicado e acessível, livros, artigos e internet;
- Pesquisa Documental: elaborado a partir de material que não receberam tratamento analítico;
- Pesquisa Experimental: quando se define um objetivo de estudo, selecionam-se variáveis, definem-se formas de controle e de observação dos efeitos que as variáveis causam no objeto de estudo;
- Levantamento: quando há a interrogação direta às pessoas sobre algo que se deseja saber;
- Estudo de Caso: quando há uma pesquisa profunda e detalhada sobre um ou poucos objetos de maneira a permitir o amplo e detalhado conhecimento;
- Pesquisa Expost-Facto: quando ocorre após o acontecimento do fato;
- Pesquisa-Ação: quando supõe uma intervenção participativa na realidade social;
- Pesquisa Participante: quando a relação entre pesquisador e participante se estreita, envolvendo ambos na pesquisa.

Portanto esse trabalho envolve 4 tipos de procedimentos técnicos:

1. Pesquisa Bibliográfica, pois provém de materiais já elaborados, como artigos científicos e livros;
2. Pesquisa Documental, pois os materiais utilizados ainda não receberam tratamento analítico;
3. Pesquisa Experimental. pois, com as variáveis analisadas, há uma observação dos efeitos;
4. Estudo de Caso, pois é utilizado de material previamente publicado para se ter a base de cálculos, além de se realizar pesquisas cujo objetivo é detalhar ao máximo, um ou poucos objetos de estudo (GIL, 2002).

3.2 Materiais e Métodos

Após a definição do problema, este trabalho apresenta um estudo bibliográfico com o objetivo de abordar os conceitos e fundamentos da ventilação local exaustora, descrevendo de forma detalhada as etapas que compõem um sistema de exaustão. Posteriormente, são realizados cálculos analíticos para o dimensionamento de coletores, como ciclones separadores, e de ventiladores centrífugos, de modo a selecionar os equipamentos mais adequados, com base nos resultados obtidos. Por fim, é conduzida uma análise comparativa para determinar a solução de melhor desempenho.

A Figura 10 apresenta o fluxo de trabalho desenvolvido para a execução deste estudo, evidenciando a sequência lógica adotada desde a definição dos objetivos até a conclusão, passando pelas etapas de levantamento teórico, coleta e análise de dados, cálculos de dimensionamento e seleção dos equipamentos.

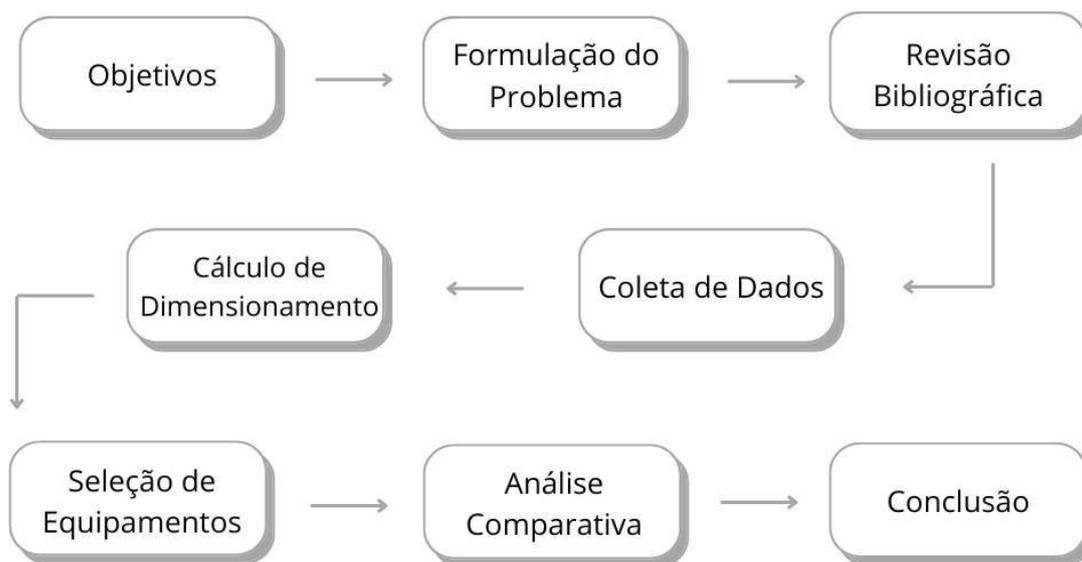


Figura 10 - Fluxo de Trabalho
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Assim, o fluxograma apresentado organiza de forma sequencial as etapas metodológicas deste trabalho. Inicialmente, são definidos os objetivos, tanto gerais quanto específicos, que direcionam as ações a serem desenvolvidas. A partir deles, passa-se para a formulação do problema, em que se descrevem as dificuldades enfrentadas no processo de moagem do milho, como a geração de poeira e os impactos à saúde

ocupacional e ao desempenho dos equipamentos. Para sustentar a investigação, procede-se à revisão bibliográfica, que reúne conceitos fundamentais sobre ventilação local exaustora, parâmetros de projeto, critérios de dimensionamento e referências normativas, servindo como base teórica para as etapas seguintes.

Com esse embasamento, realiza-se a coleta de dados, na qual são levantadas informações referentes às características do processo produtivo, às condições do ambiente, aos equipamentos utilizados e às necessidades específicas de exaustão. Esses dados constituem a base para o cálculo de dimensionamento, etapa responsável por organizar e estruturar o sistema proposto, considerando as condições operacionais e os requisitos técnicos. Posteriormente, realiza-se a seleção dos equipamentos, contemplando captores, dutos, ciclone separador e ventilador, de modo a garantir que o conjunto atenda aos parâmetros estabelecidos de eficiência e segurança.

Em seguida, desenvolve-se a análise comparativa, entre o equipamento calculado e um equipamento comercial, observando aspectos de desempenho, eficiência de separação de partículas e perdas de carga. Essa comparação possibilita identificar vantagens e limitações de cada opção, apoiando a escolha da solução mais adequada. Por fim, a etapa de conclusão reúne os principais resultados obtidos ao longo do estudo, indicando a alternativa de projeto que melhor atende às necessidades do processo e apresentando recomendações voltadas à manutenção preventiva, ao monitoramento do desempenho do sistema e a possíveis melhorias futuras.

3.3 Variáveis e Indicadores

Para os pesquisadores a palavra variável é uma das mais empregadas quando se quer conferir precisão aos enunciados científicos, sejam eles hipóteses, teorias, leis princípios ou generalizações (GIL, 2002). De acordo com Gil (2002), variável é tudo aquilo que assume diferentes valores ou aspectos, relacionados aos casos particulares ou circunstâncias. Dessa forma variável é tudo aquilo que pode assumir diferentes valores. Já os indicadores, segundo Gil (2002) são conceitos concretos que possibilitam a métrica do valor de variável.

A Tabela 7 apresenta as principais variáveis e indicadores considerados no dimensionamento do sistema de exaustão, abrangendo captores, canalizações, coletores e ventiladores.

Tabela 7 - Variáveis e indicadores

Variáveis	Indicadores
Captore	Velocidade de captura
	Vazão de ar
	Perda de carga
	Coefficiente de atrito
Canalizações	Velocidade de ar
	Diâmetro
	Material
	Perda de carga
Coletores	Tamanho de partículas
	Perda de carga
Ventiladores	Seleção de equipamento
	Vazão
	Pressão

Fonte: Pesquisa direta (2025)

3.4 Instrumentos de Coleta de Dados

A coleta de dados foi realizada por meio de consultas de livros e artigos. A coleta também foi realizada com a observação do layout do galpão e análise dos equipamentos presentes que influenciam diretamente no desenvolvimento do sistema de exaustão.

3.5 Tabulação de Dados

Esta etapa é desenvolvida por meio da coleta de dados dos equipamentos. Todos os dados coletados serão tabulados por meio do software Microsoft Excel, possibilitando o cálculo rápido e eficaz dos parâmetros desejados. A documentação dos resultados será realizada por meio da ferramenta Microsoft Word e Microsoft Excel.

3.6 Considerações Finais

O capítulo apresenta os tipos de pesquisa, os métodos e materiais que são utilizados. Além de definir os indicadores e variáveis, bem como os instrumentos de coleta e tabulação de dados. No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos.

4 RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos a partir do dimensionamento do sistema de ventilação exaustora local de uma máquina de moagem de milho. Incluem-se os cálculos de vazão, velocidades, perdas de carga, dimensionamento do ciclone, seleção do ventilador e uma análise comparativa entre modelo vendido no mercado (TRF 750 Trapp) e o modelo de projeto calculado.

4.1 Cálculo do Sistema

A Figura 11 apresenta o desenho esquemático detalhado do conjunto formado pela máquina de moagem e o ciclone separador, modelo TRF 750 Trapp, evidenciando todos os componentes que integram o sistema.

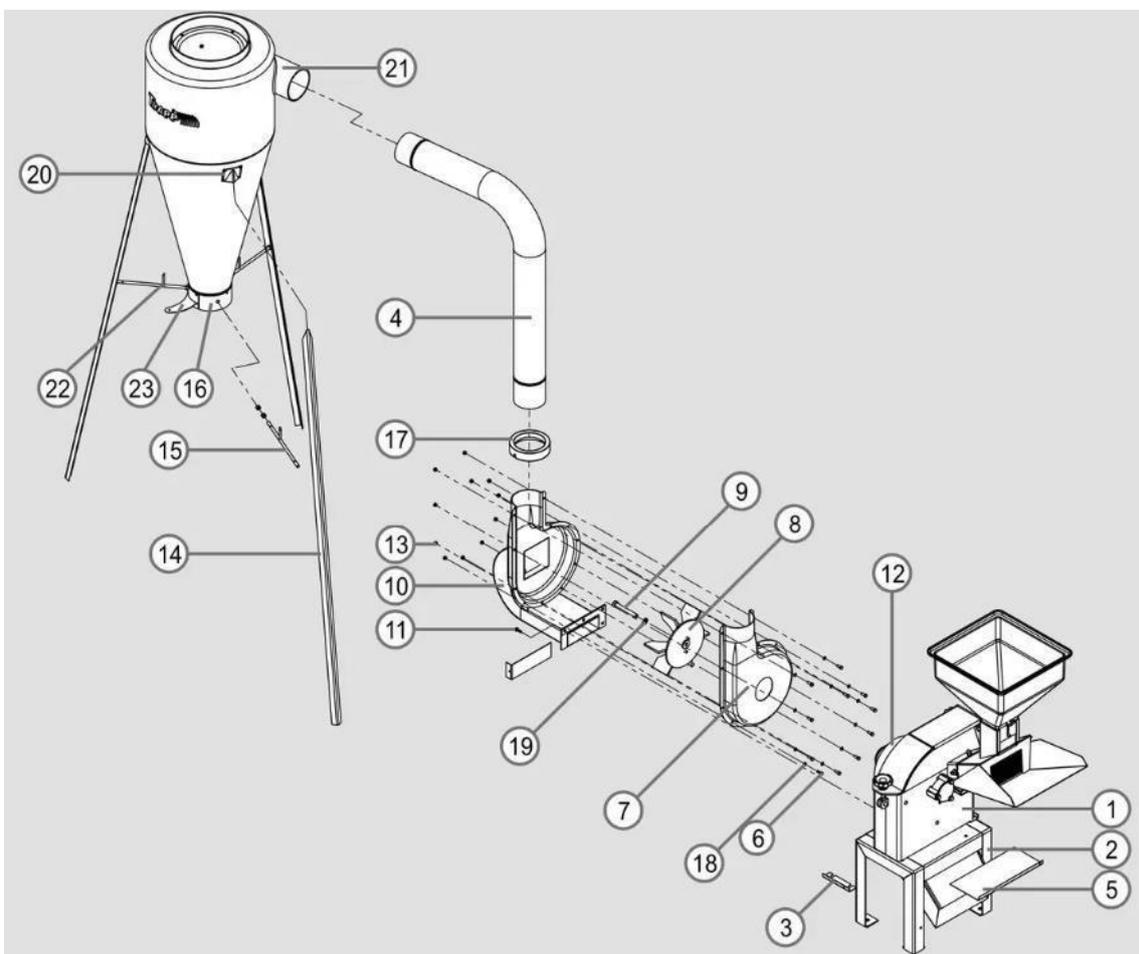


Figura 11 - Desenho esquemático
Fonte: trapp/produto/trf-750/ciclone

1. Alimentador do moinho;
2. Câmara de moagem;
3. Estrutura de suporte do moinho;
4. Tubulação de saída do moinho;
5. Porta de inspeção/manutenção;
6. Base do ventilador;
7. Rotor do ventilador;
8. Motor do ventilador;
9. Disco de impulsão (hélice interna);
10. Carcaça do ventilador;
11. Suporte lateral do ventilador;
12. Entrada do ventilador;
13. Parafusos de fixação;
14. Estrutura de sustentação do ciclone;
15. Chave de suporte ou travamento;
16. Saída de material separado (coletor);
17. Vedação ou flange de conexão;
18. Tubulação de ar;
19. Placa de orientação interna;
20. Corpo do ciclone;
21. Saída de ar limpo;
22. Pés de sustentação;
23. Válvula ou registro de saída;

Esse tipo de representação permite visualizar de forma clara a disposição das peças, suas conexões e o caminho percorrido pelo fluxo de ar e material particulado.

4.2 Cálculo de Vazão

A vazão de ar necessária no dimensionamento foi determinada a partir da produção horária do moedor de milho, com uma produção de quirera fina, referente a 700 kg/h. O fator de exaustão (K) indica a quantidade de ar necessária para controlar a emissão de poeira em função da massa de material processado. Seu valor varia conforme o tipo de material, a intensidade de geração de poeira e o grau de enclausuramento do processo. Em operações com grãos finos, como milho, trigo e arroz, onde a geração de poeira é alta

e o enclausuramento geralmente é reduzido, a ACGIH (2022) recomenda valores de 5,0 a 6,0 m³/h de ar por kg/h de produção. Dessa forma, para o presente estudo, adotou-se $K = 5$ m³/h por kg/h, valor considerado adequado às condições do processo de moagem de milho. Assim, utilizando a equação 2, calcula-se a vazão do ar.

$$Q_{ar} = 5 \cdot 700 = 3500 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{ar} = \frac{3500}{3600} = 0,9722 \frac{m^3}{s}$$

4.3 Cálculo de Velocidade

A determinação da velocidade de transporte para o pó de milho foi fundamentada na metodologia da Tabela de Hudson, que estabelece critérios técnicos baseados na granulometria e no peso específico do material, bem como na disposição dos dutos do sistema. A análise considera as distintas condições de escoamento em trechos horizontais e verticais para assegurar a eficiência do transporte pneumático.

Os cálculos indicaram a necessidade de uma velocidade de ar de 26,15 m/s para os dutos horizontais e 33,61 m/s para os verticais, sendo esta última maior para compensar a ação da gravidade. As perdas de velocidade inerentes ao sistema (V_f), que representam a velocidade mínima para manter as partículas em suspensão, foram calculadas em 2,37 m/s e 4,75 m/s, respectivamente.

Subtraindo-se as perdas, obteve-se uma velocidade de transporte efetiva de 23,78 m/s na horizontal e 28,86 m/s na vertical. Com base nesses resultados, adotou-se uma velocidade média de operação de 26 m/s, valor considerado suficiente para garantir o arraste contínuo do material e evitar a sua deposição nas tubulações, assegurando o correto funcionamento do sistema, como mostrado na tabela 8 abaixo.

Tabela 8 - Cálculo de velocidades

Velocidades (m/s)			
	V_{ar}	V_f	V_{total}
Horizontal	26,15	2,37	23,78
Vertical	33,61	4,75	28,86

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Dessa forma, os valores obtidos indicaram velocidades de 26,15 m/s e 33,61 m/s, subtraindo as perdas de velocidade no sistema (V_f), chega-se a uma velocidade de 26,32 m/s, sendo adotado a média de 26 m/s.

4.4 Diâmetro do Duto

O dimensionamento do diâmetro dos dutos leva em consideração a vazão de ar, que foi calculada no tópico anterior e a velocidade de escoamento na tubulação.

$$Q = A \cdot V \quad A = \frac{0,97}{26} = 0,0374 \text{ m}^2$$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = 218 \text{ mm} \cong 0,22 \text{ m}$$

4.5 Perda de Carga

Uma vez calculados o diâmetro e velocidade média, tem-se o comprimento de 1,5m conforme especificado na ficha técnica, massa específica ρ do ar é aproximadamente 1,2 kg/m³ e viscosidade cinemática ν , 0,0000154m²/s, para temperatura ambiente de 30°C e 1 atm, é possível calcular a perda de carga pela equação (5), de forma que o coeficiente de atrito f é obtido pela equação (9), número de Reynolds Re pela equação (7) e a rugosidade absoluta ϵ do aço galvanizado é 0,15mm. Dessa forma, tem-se:

$$Re = \frac{26 \cdot 0,218}{0,0000154} = 368052$$

$$f = \frac{1,325}{\left| \ln \left(\frac{0,00015}{\frac{0,22}{3,7}} + \frac{5,74}{368052^{0,9}} \right) \right|^2} = 0,0198 \cong 0,020$$

Nota-se que o regime de escoamento é turbulento, identificado pelo alto valor de Re , e o fator de atrito de 0,020 indicam que uma quantidade considerável de energia será dissipada ao longo do duto.

4.5.1 Perda de Carga no Duto

Refere-se à perda de energia por atrito do ar com a superfície interna da tubulação. Para seu cálculo, foi empregada a equação universal da perda de carga (Darcy-Weisbach):

$$\Delta_p = f \frac{L \rho \cdot V^2}{D} \frac{1}{2} = 0,02 \cdot \frac{1,5}{0,22} \cdot \frac{1,2 \cdot 26^2}{2} = 55,31 Pa$$

4.5.2 Perda de Carga na Curva

A perda de carga nas curvas é calculada por meio do método do comprimento equivalente, onde as curvas são transformadas em um comprimento reto com base nas tabelas de conversão, sendo necessário interpolação para o valor exato.

Após transformar os acessórios em comprimentos retos, com base na tabela 3, obtém-se o comprimento total utilizado para os cálculos de perda de carga.

Na máquina, tem-se uma curva de 90° e a relação R/D, utilizada é de 2 é possível obter um comprimento de 3,46m.

$$\Delta_p = f \frac{L \rho \cdot V^2}{D} \frac{1}{2} = 0,02 \cdot \frac{3,46}{0,22} \cdot \frac{1,2 \cdot 26^2}{2} = 127,6 Pa$$

4.6 Ciclone

O dimensionamento de um ciclone é realizado a partir da vazão de trabalho, ou seja, o volume de ar que o equipamento deve processar por unidade de tempo. Inicialmente, a vazão de 3500 m³/h foi convertida para o sistema de unidades inglês, resultando em 2060 ft³/min.

Em seguida, foi utilizada uma fórmula baseada em um fator multiplicativo de um "Ciclone Padrão Classe B" para determinar as dimensões do equipamento. Essa fórmula relaciona a vazão (Q) com o diâmetro da tubulação (d).

A partir da equação de dimensionamento, o diâmetro do ciclone (d) foi isolado e calculado:

$$Q = 800 \cdot d^2 \quad d = \sqrt{\frac{2060}{800}} = 1,6 \text{ pés} = 0,49$$

O cálculo do diâmetro do ciclone resultou em 1,6 pés, que equivale a 0,49 metros. Esse valor de diâmetro, junto com outros fatores multiplicativos, é então utilizado para determinar todas as outras dimensões do ciclone (tabela 9), como o diâmetro do corpo, a altura e a largura das entradas e saídas, garantindo que o ciclone seja projetado para operar com a vazão específica do projeto.

Tabela 9 - Dimensionamento do ciclone

Dimensionamento do ciclone				
Medidas	Fatores	d	Metros	Pés
d	1	0,49	0,49	1,607612
h	0,75	0,49	0,3675	1,205709
l	0,375	0,49	0,18375	0,602854
s	0,875	0,49	0,42875	1,40666
Dd	0,75	0,49	0,3675	1,205709
L	1,5	0,49	0,735	2,411417
L'	2,5	0,49	1,225	4,019029

Fonte: Pesquisa direta (2025)

4.6.1 Perda na Transição Circular- Retangular

A transição entre o duto circular de diâmetro 0,22 m e a entrada retangular do ciclone ($0,3675 \times 0,18375$ m) provoca uma perda localizada de carga, que deve ser considerada no dimensionamento do sistema de exaustão. A perda de carga localizada em elementos como curvas, registros e transições pode ser estimada pela Equação 6, na qual o coeficiente de perda K assume valor tabelado de 0,2 para transições suaves (MACINTYRE, 1990)

Assim, a área da entrada circular corresponde a $0,038 \text{ m}^2$ e a área de saída retangular de $0,0675 \text{ m}^2$, a razão entre as áreas corresponde a 1,78, configurando que a peça funciona como um difusor, pois ocorre uma expansão da área e conseqüente redução da velocidade do fluido.

$$\Delta P = 0,2 \cdot \frac{1,2 \cdot 26^2}{2} = 81,12 \text{ Pa}$$

O resultado obtido indica que a transição em questão gera uma perda de carga localizada de 81,12 Pa. Além disso, o cálculo evidencia que a geometria da transição tem impacto direto sobre o desempenho: quanto mais abrupta a mudança de seção, maior o coeficiente K e, conseqüentemente, a perda de carga.

4.6.2 Perda de Carga no Ciclone

O cálculo da perda de carga (Δ_p), faz-se necessário para a determinação da eficiência energética do sistema e para a seleção do ventilador. Para essa análise, foi utilizada a Equação 12, que integra parâmetros geométricos do equipamento e características do escoamento.

Na fórmula, considera um coeficiente de perda (K), cujo valor é de 1,0 para ciclones com guias de entrada retas. Esse coeficiente é um fator empírico que reflete as perdas de energia causadas pela geometria específica da entrada do equipamento.

$$\Delta_p = \frac{12 \cdot 0,602854 \cdot 1,2057}{1 \cdot 1,2057^2 \cdot \sqrt[3]{\frac{2,4114}{1,6076}} \sqrt[3]{\frac{4,019}{1,6076}}} = 3,8574 \text{ Pol. de água ou } 960,01 \text{ Pa}$$

O resultado obtido para a perda de carga foi de 3,8574 polegadas de coluna de água (*Pol. de água*), o que equivale a 960,1 Pa. Esse valor representa a diferença de pressão entre a entrada e a saída do ciclone. Em termos práticos, ele quantifica a energia que o ar perde ao percorrer as espirais internas do equipamento e ser submetido às forças centrífugas.

4.7 Perda de carga total

A perda de carga total é um dos principais parâmetros no projeto de sistemas de exaustão, pois determina a resistência que o ar encontra ao percorrer os dutos e equipamentos. Ela é composta por dois tipos: perda de carga contínua, causada pelo atrito do ar com as paredes internas dos dutos; e perda de carga localizada, provocada por curvas, registros, conexões e transições no sistema. A Tabela 10 mostra as perdas de carga parciais e a perda total.

Tabela 10 - Perdas de Carga

Perda de Carga Total	
Tubo	55,31
Curva	127,6
Transição	81,12
Ciclone	960,81
Total	1224,84 Pa
	124,89 mmca

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Assim, de acordo com a tabela 10, a perda de carga total do sistema foi de 1.224,84 Pa, equivalente a aproximadamente 124,89 mmca. Esses valores serviram de base para a seleção do ventilador centrífugo, que deve ser capaz de fornecer a vazão projetada vencendo essa resistência. Os cálculos seguiram a equação de Darcy-Weisbach e os coeficientes recomendados pela norma ABNT NBR 13912 e pelo manual da ACGIH (2019).

4.8 Eficiência do ciclone

Para o calcular a eficiência de coleta de um ciclone para partículas com 0,5 mm de diâmetro (ou 500 μm), referente ao milho moído, foi usado o modelo de Leith & Licht.

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-5} \cdot 0,3675}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 26 \cdot (1250 - 12)}} = 7,2 \mu\text{m}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{7,2}{500}\right)^2} = 0,9997 = 99,97\%$$

Observa-se na Figura 12 que, para partículas muito finas (menores que 5–10 μm), a eficiência de coleta do ciclone é reduzida, uma vez que essas partículas acompanham o fluxo de ar e apresentam menor tendência à separação pela força centrífuga. Com o

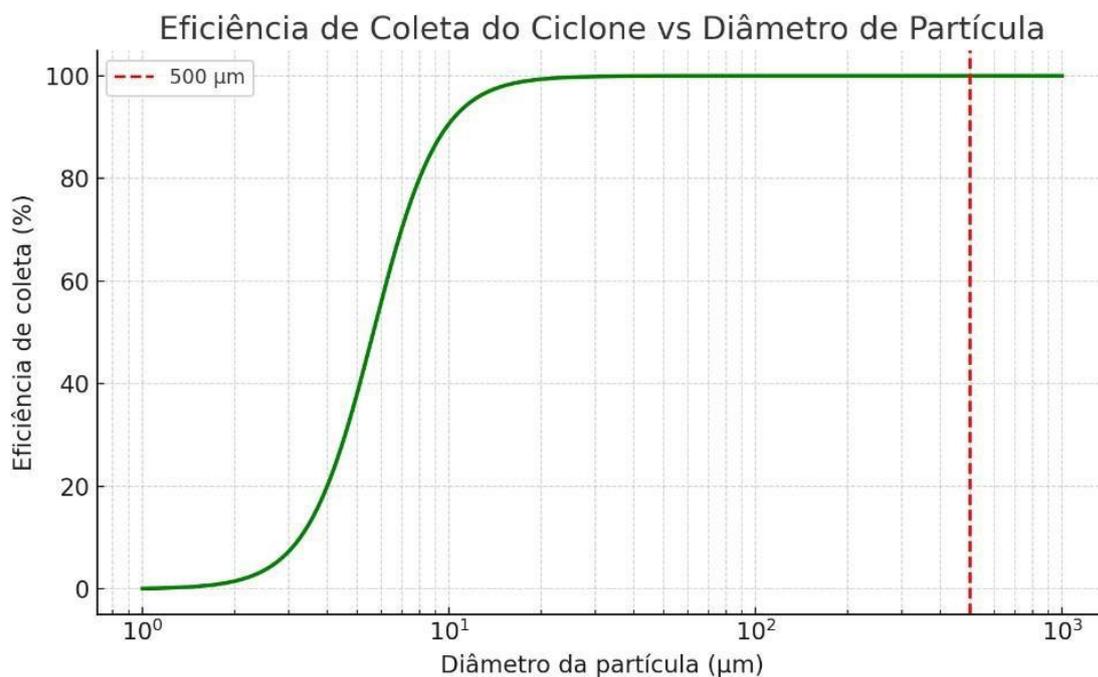


Figura 12 - Eficiência de coleta
Fonte: Pesquisa direta

aumento do diâmetro, a eficiência cresce rapidamente, atingindo valores próximos de 100% para partículas acima de aproximadamente 20 μm . A linha tracejada vermelha evidencia o diâmetro de 500 μm , indicando que partículas dessa ordem são coletadas com eficiência praticamente total. Assim, confirma-se que o ciclone é altamente eficiente na separação de partículas grossas, embora apresente limitações para partículas muito finas, característica inerente a esse tipo de equipamento.

4.9 Seleção do Ventilador

A seleção do ventilador para o sistema de transporte pneumático foi realizada considerando os requisitos de projeto obtidos nos cálculos anteriores. O sistema demanda uma vazão volumétrica de 3500 m³/h e uma pressão estática de 124,89 mmca. As condições do ar adotadas para o dimensionamento foram 30 °C de temperatura e 760 mmHg de pressão atmosférica, o que resulta em uma massa específica de 1,205 kg/m³.

Com base nesses parâmetros, foi selecionado um ventilador centrífugo da marca Ideal Ventiladores, modelo VC-1000, que atende plenamente à faixa de operação estabelecida para o projeto. O equipamento apresenta características técnicas compatíveis com a necessidade de transporte de pó de milho moído, garantindo a vazão requerida e a pressão estática suficiente para vencer as perdas de carga distribuídas e localizadas do sistema.



Figura 13 -Dados da Seleção do Ventilador
 Fonte: Pesquisa direta (2025)

A Figura 13 apresenta o ventilador centrífugo VC-1000, fabricado pela Ideal Ventiladores. Observa-se que o modelo possui capacidade de até 90 m³/min (5400 m³/h), com pressão máxima de 500 mmca, o que supera a demanda projetada de 3500 m³/h e 124,89 mmca, garantindo assim margem de segurança operacional. Além disso, o

equipamento opera com motor trifásico de 10 CV (7,5 kW), rotação de 3520 rpm e nível de ruído em torno de 87 dB(A), valores condizentes com a aplicação.

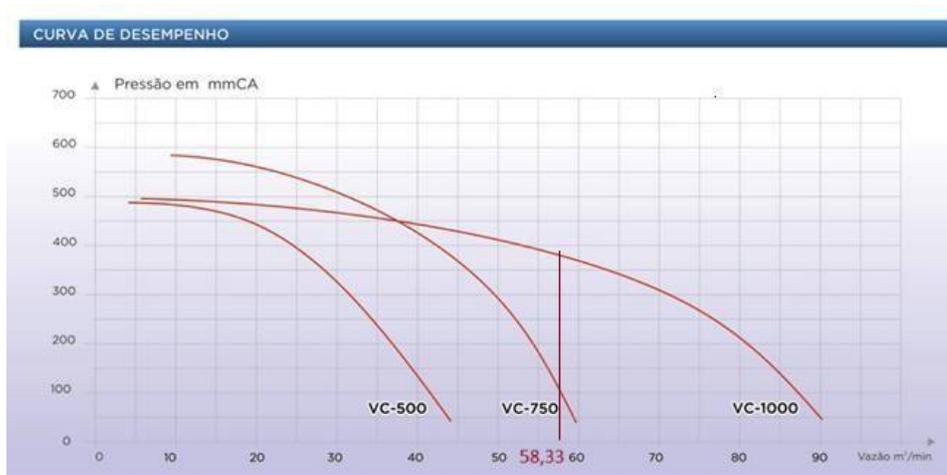


Figura 14 - Curva de operação do ventilador

Fonte: Pesquisa direta

A Figura 14 apresenta a curva de desempenho dos ventiladores da linha VC -1000, fornecida pelo fabricante Ideal Ventiladores. O gráfico relaciona a vazão de ar (m³/min) com a pressão estática disponível (mmca) para cada modelo, possibilitando a determinação do ponto de operação adequado ao sistema de transporte pneumático projetado.

Para o presente estudo, a necessidade calculada corresponde a uma vazão de 3500 m³/h ($\approx 58,3$ m³/min) e uma pressão estática de 124,89 mmca. Observando a curva característica, verifica-se que o ponto de operação situa-se dentro da faixa de desempenho do modelo VC-1000, atendendo os requisitos de projeto, como também apresenta uma margem operacional de segurança, garantindo que variações no sistema (como acréscimos de perda de carga localizada, desgaste ou pequenas obstruções) não comprometam a eficiência do transporte pneumático.

Assim, a curva característica confirma que a seleção do ventilador VC-1000 foi tecnicamente adequada, assegurando o equilíbrio entre vazão e pressão para a aplicação proposta.

4.10 Comparativo

A fim de avaliar a adequação do ciclone vendido comercialmente, frente ao modelo adotado no presente projeto, foi realizada uma comparação dimensional, onde o ciclone

comercial (calculado com diâmetro base $d = 0,38$ m) e o ciclone de projeto, cujas dimensões foram estimadas com base em um diâmetro equivalente de $d = 0,49$ m. Ambos os ciclones seguem as mesmas proporções geométricas do Padrão B, permitindo uma comparação direta.

A figura 15 mostra um comparativo das dimensões principais entre o ciclone comercial (0,38 m de diâmetro) e o ciclone de projeto (0,49 m de diâmetro), evidenciando variações nos parâmetros.

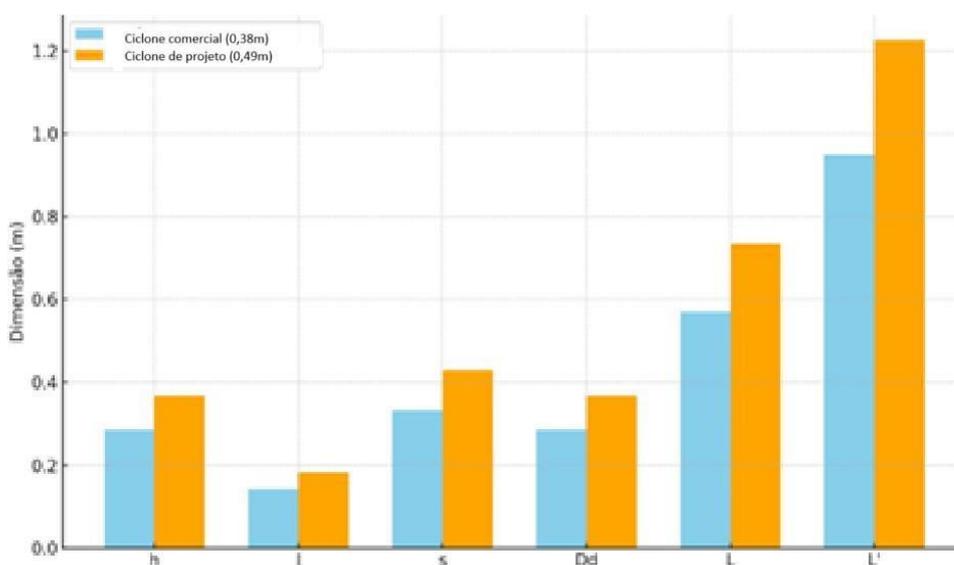


Figura 15 - Comparativo de medidas
Fonte: Pesquisa direta (2025)

A tabela 10 apresenta as dimensões dos ciclones, comercial e de projeto, utilizados para análise e cálculos de desempenho.

Tabela 11 - Dimensões dos ciclones

Dimensões	Comercial (m)	Projeto (m)
d	0,38	0,49
h	0,285	0,3675
l	0,143	0,18375
s	0,3325	0,42875
Dd	0,285	0,3675
L	0,57	0,735
L'	0,95	1,225

Fonte: Pesquisa direta (2025)

A partir dos dados acima, observa-se que o ciclone de projeto possui dimensões

cerca de 29% superiores às do modelo calculado, uma vez que seu diâmetro base é 0,11 m maior. Essa ampliação reflete-se proporcionalmente em todas as dimensões lineares, mantendo-se as características geométricas do ciclone tipo B.

$$\frac{V_b}{V_a} = \left(\frac{0,49}{0,38}\right)^3 = 1,47$$

Em termos volumétricos, considerando que o volume de um ciclone é função cúbica do diâmetro, estima-se que o volume interno do ciclone de projeto seja aproximadamente 1,47 vezes maior que o do modelo de 0,38 m. Essa diferença pode implicar maior capacidade de separação, maior tempo de residência das partículas e, conseqüentemente, maior eficiência para determinadas faixas granulométricas, especialmente em sistemas com vazões de ar mais elevadas.

De acordo com Barth (1964) e Leith & Licht (1972), o aumento no tempo de residência e na força centrífuga associada a um raio maior favorece a separação de partículas menores. Assim:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{1}{\left(\frac{3500}{3600}\right)} \approx 1,03s \qquad t = 1,03 \cdot 1,47 = 1,51s$$

Contudo, o aumento nas dimensões também pode impactar o desempenho aerodinâmico, exigindo motores com maior potência para superar as perdas de carga adicionais, que tendem a crescer de forma quadrática com o aumento da velocidade.

Com o intuito de avaliar as diferenças de desempenho entre o ciclone comercial e o ciclone projetado, elaborou-se uma análise comparativa considerando parâmetros técnicos, operacionais e econômicos. A Tabela a seguir apresenta os principais benefícios e malefícios de cada configuração, destacando aspectos relacionados à perda de carga, eficiência de separação, custo energético e aplicabilidade em sistemas com diferentes características de carga particulada.

Assim, a diferença de modelos implica:

Tabela 12 - Análise comparativa

Critério	Ciclone Comercial	Ciclone de Projeto
Benefícios	<ul style="list-style-type: none"> • Menor perda de carga, resultando em menor consumo energético; • Mais econômico em operação e instalação; • Eficiência adequada para partículas médias e grossas (até 98% para 0,5 mm). 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior tempo de permanência (47% superior), favorecendo a separação de partículas finas; • Maior eficiência de separação (até 99,5% para 0,5 mm); • Melhor desempenho em sistemas com alta carga particulada e exigência ambiental.
Malefícios	<ul style="list-style-type: none"> • Menor tempo de residência, comprometendo a eficiência para partículas finas; • Menor eficiência global em sistemas com ampla faixa granulométrica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior perda de carga (1224,89 Pa), exigindo ventiladores mais potentes; • Maior custo energético e necessidade de espaço físico adicional.

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Essa análise comparativa reforça a importância de selecionar corretamente o diâmetro base do ciclone conforme a vazão de ar, o tipo de material particulado e o espaço físico disponível para instalação.

Dessa forma, o modelo ciclone de projeto mostra-se mais adequado para sistemas industriais com alta carga de partículas e maiores exigências ambientais, como controle de emissões em processos de moagem. Esse modelo também tem a vantagem de permitir o funcionamento do triturador com diferentes tipos de peneiras. Por outro lado, o modelo comercial, com dimensões menores e menor consumo energético, pode ser preferível em sistemas com cargas de partículas menores e menor rigor de controle ambiental, proporcionando uma solução mais econômica e compacta.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de exaustão local voltado ao manuseio do milho. Com base em fundamentos técnicos, normas da ACGIH e literatura especializada, são realizados o dimensionamento completo dos componentes do sistema e a seleção adequada de equipamentos.

Através da aplicação de equações e da metodologia proposta por autores como Macintyre (1990) e Leith & Licht (1971), é possível determinar uma vazão ideal de 3500 m³/h, com velocidade de transporte de 26 m/s e dimensionamento de dutos compatíveis com o regime de escoamento desejado. O ciclone separador projetado (modelo padrão B) apresenta elevada eficiência de coleta (99,97%) para partículas de até 500 µm, enquanto o ventilador centrífugo selecionado foi da marca Ideal Ventiladores modelo VC-1000.

Adicionalmente, o estudo comparativo entre o ciclone calculado e um ciclone comercial para o mesmo tipo de equipamento, demonstra que o aumento do diâmetro no ciclone calculado implica maior volume interno e maior eficiência para granulometrias finas, ainda que à custa de maior potência exigida.

Por fim, o projeto atende às recomendações normativas e critérios de saúde ocupacional, promovendo um ambiente de trabalho mais seguro e salubre, com controle efetivo de poluentes particulados. A proposta aqui desenvolvida pode servir como modelo para a implantação de sistemas similares em outros ambientes industriais agrícolas.

5.2 Recomendações

- Desenvolver e implementar um código computacional para o dimensionamento do sistema de exaustão local;
- Realizar um estudo mais aprofundado na seleção do ventilador, visto que o mesmo se localiza antes do ciclone, e, portanto, está sujeito à passagem de particulados em seu interior;
- Desenvolver uma alternativa com o ventilador localizado na saída do ciclone, operando com ar limpo e compará-la com a recomendação anterior;
- Considerar o uso de um sistema de filtragem complementar, por exemplo, um filtro, caso seja necessário reduzir ainda mais a concentração de partículas no ar de exaustão;
- Reavaliar a vazão e o dimensionamento dos componentes em caso de ampliações no sistema, com a utilização de um conjunto de máquinas em funcionamento.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ACGIH. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design*. 23rd ed. Cincinnati, 2022.

ACGIH. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Operation and Maintenance*. 3rd ed. Cincinnati, 2023.

CLEZAR, C. A.; NOGUEIRA, E. R. A. *Ventilação Industrial*. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2009.

COSTA, E. A. C. *Manual de Ventilação Industrial*. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

FUNDACENTRO. *Norma de Higiene Ocupacional NHO 01: Avaliação da exposição ocupacional a aerodispersóides*. Brasília, DF, 2017.

GIL, Antonio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas S.A., 2002.

Industrial Ventilation Committee. *Industrial Ventilation A Manual of Recommended Practice for Design*. 23rd Ed. Cincinnati: American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), 1998.

KAZAROFF, M. N. *Sistemas de Ventilação Industrial*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on the shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. *Journal of Food Engineering*, v. 49, n. 4, p. 359–367, 2001.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. *Fundamentos de metodologia científica*. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

MACINTYRE, A. J. *Ventilação Industrial e Controle da Poluição*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1990.

MELHADO, V. A.; OLIVEIRA, C. R. *Tecnologia de Processamento de Grãos*. Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos, 2016.

MENDES, R. et al. *Patologia do Trabalho*. 3. ed. Rio de Janeiro: Atheneu, 2014.

MESQUITA, A. L. A.; GUIMARÃES, G.; NEFUSSI, N. *Ventilação Industrial*. São Paulo: CETESB, 1988.

MUNSON, B. R. et al. *Fundamentos da Mecânica dos Fluidos*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

OTAM VENTILADORES INDUSTRIAIS. Ventiladores industriais: catálogo técnico e de aplicação. São Paulo: Otam Ventiladores Industriais, 2003.

SANTOS, J. C. *Higiene Ocupacional: Agentes Biológicos, Químicos e Físicos*. 8. ed. São Paulo: Érica, 2015.

STAIRMAND, C. J. The design and performance of cyclone separators. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, v. 29, p. 356-383, 1951.

VALDIERO, A. C.; THESING, G. *Ventiladores Industriais: Seleção, Aplicação e Manutenção*. Caxias do Sul: Educs, 2016.

WHITE, F. M. *Mecânica dos Fluidos*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

[HTTP://PORTAL.MTE.GOV.BR/LEGISLACAO/NORMAS-REGULAMENTADORAS-1.PDF](http://portal.mte.gov.br/legislacao/normas-regulamentadoras-1.pdf)

MÁQUINA MOEDOR DE MILHO Acesso em:

<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-4263433384-triturador-forrageiro-c-ciclone-trf750-75cv-mono-trapp- JM>