



**HENRIQUE CÉSAR PEREIRA SANTOS**

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE EXAUSTÃO FORÇADO EM UMA  
INDÚSTRIA DE TORREFAÇÃO DE CAFÉ**

**LAVRAS-MG**

**2021**



**HENRIQUE CÉSAR PEREIRA SANTOS**

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE EXAUSTÃO FORÇADO EM UMA  
INDÚSTRIA DE TORREFAÇÃO DE CAFÉ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a  
Universidade Federal de Lavras, como  
requisito parcial para a obtenção do título de  
Engenheiro Mecânico.

**Prof.(a) Dr.(a) Bruna Oliveira Passos e Silva Siqueira**  
**Orientadora**

**LAVRAS-MG**

**2021**

## **Agradecimentos**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por todas as oportunidades concedidas até aqui.

A Universidade Federal de Lavras e todos os professores e colaboradores que fazem parte desse time fantástico.

À minha professora e orientadora Dra. Bruna Oliveira Passos e Silva Siqueira por todo tempo dedicado e pela confiança em aceitar orientar o trabalho.

Aos meus pais Sílvio e Doralice por tudo que fizeram e fazem por mim; e a todos os familiares, amigos, minha namorada, colegas e pessoas importantes por todo apoio, suporte e que de alguma forma colaboraram pela realização desse sonho.

## Resumo

O processo de torrefação é uma das etapas fundamentais para obtenção de café em pó ou grãos de alta qualidade. Esse processo é geralmente realizado em torradores de café que são compostos por um cilindro de torra, um queimador a gás e uma peneira para resfriamento do grão de café torrado. Este tipo de máquina é muito encontrado em pequenas fábricas de beneficiamento de café comuns nas regiões próximas à cidade de Lavras e um problema recorrente durante o processo de torra do café nestas instalações é o grande volume de fumaça gerado e a formação de fuligem que se solta do grão de café ao atingir a temperatura de torra. Os torradores industriais utilizados nessas pequenas fábricas não apresentam um sistema para exaustão da fumaça e captação da fuligem resultantes do projeto de torra de forma a dar um fim correto para estes resíduos. E como consequência podem trazer malefícios tanto para o operador da máquina, que inala a fumaça contaminada com fuligem, quanto para a qualidade do grão de café torrado produzido, que pode ter suas propriedades alteradas pela presença da fuligem que não foi devidamente extraída durante a torra. Com base nessas observações foi proposto o presente trabalho, onde –será realizado o projeto de um sistema de ventilação local exaustora para exaustão da fumaça e captação da fuligem resultantes do processo de torra de café em um torrador industrial automático de capacidade de 12 kg de café por torra, situado em uma empresa de beneficiamento de café na cidade de Ibituruna - MG. O projeto tem como objetivos a realização do dimensionamento dos dutos que compõe o sistema de exaustão e o sistema de captação de fuligem, a seleção de um exaustor que atenda as especificações do projeto para exaustão da fumaça e fuligem do torrador e ao final do projeto será realizada a análise da viabilidade econômica para implantação do sistema proposto.

**Palavras Chave:** Exaustão de torrador de café; Ventilação Local Exaustora; Exaustão de fuligem; Dimensionamento do sistema de exaustão.

## Abstract

A key stage in coffee processing is roasting to obtaining ground coffee and beans of high quality. The process is usually carried out in coffee roaster machine which are composed by a cylinder, a gas burner, and a sieve where the roasted beans are cooled in normal air. This type of machine is generally finding in small Coffee-Processing Factories that are common in nearby regions of city Lavras, in Minas Gerais and the most problem during the process of roasting coffee in this type of factories is the great volume of smoke generated and the formation of coffee waste soot the formation of coffee waste soot when reaching the roasting temperature. The Industrial roasters used in these small factories do not have a system of smoke exhaustion and capitation coffee soot resulted by the roasting, this coffee processing method does not correctly eliminate the residues produced during roasting resulting in harmful to machine operator, who inhales contaminated smoke with soot, and to the quality of the roasted coffee bean that can have its properties changed and maximize their flavor characteristics. This research was proposed with the objective of carry out the design of a local ventilation system of smoke exhaustion and capitation coffee soot an automatic industrial roaster with the capacity of 12kg of coffee by roasting, in a coffee processing company in the city of Ibituruna-MG. In addition, make the dimensions of the ducts that compose the system of exhaustion and capitation coffee soot, select an exhauster with the necessary specifics and, in the end, analyze the economic investment in the project.

**Keywords:** Exhaust coffee roaster, Local Exhaust Ventilation, Soot exhaustion, Sizing of the exhaust system.

## Lista de figuras

Figura 3.1: Montagem do sistema de VLE.....	16
Figura 4.1: Torrador de café industrial na configuração de torra.....	19
Figura 4.2: Torrador de café na configuração de despejamento de grãos.....	20
Figura 4.3: Coletor ciclone .....	25
Figura 5.1: Locais com necessidade de exaustão .....	27
Figura 5.2: Proposta de montagem dos componentes do sistema .....	28
Figura 5.3: Representação da articulação no duto do captor 1.....	33
Figura 5.4 Representação dos parâmetros do coletor .....	37
Figura 5.5: Exaustor escolhido no projeto.....	40

## **Lista de tabelas**

Tabela 5.1: Propriedades do ar em função da temperatura .....	34
Tabela 5.2: Parâmetros calculados para o coletor .....	38
Tabela 5.3: Tabela de custos do projeto.....	41

## Lista de abreviaturas e siglas

<b>TCC</b>	Trabalho de Conclusão de Curso
<b>VLE</b>	Ventilação Local Exaustora
<b>Q<sub>e</sub></b>	Vazão de entrada no captor
<b>S</b>	Área superficial do captor
<b>h</b>	Distância do captor até o corpo quente
<b>Δt</b>	Variação de temperatura entre o corpo quente e o ambiente
<b>ft<sup>2</sup></b>	Pés quadrados
<b>ft</b>	Pés
<b>°F</b>	Graus Fahrenheit
<b>°C</b>	Graus Célsius
<b>m</b>	Metros
<b>h<sub>v</sub></b>	Pressão dinâmica
<b>Δp<sub>c</sub></b>	Perda de carga
<b>F</b>	Fator de atrito
<b>A</b>	Área da seção transversal do duto
<b>v</b>	Velocidade de escoamento no duto
<b>Q<sub>d</sub></b>	Vazão no duto
<b>D</b>	Diâmetro no duto
<b>f</b>	Fator de atrito no duto
<b>ρ</b>	Peso específico do ar
<b>μ</b>	Viscosidade cinemática do ar
<b>R</b>	Constante dos gases ideais
<b>T</b>	Temperatura
<b>K</b>	Fator de perda de carga
<b>C<sub>a</sub></b>	Fator de perda de carga em curvas
<b>s</b>	Segundos

## Sumário

1	Introdução.....	11
2	Objetivos .....	13
2.1	Objetivos Específicos .....	13
3	Revisão Bibliográfica.....	14
3.1	Ventilação Industrial e Controle de Poluição .....	14
3.2	Ventilação Local Exaustora .....	15
4	Metodologia .....	19
4.1	Dimensionamento dos Captores.....	20
4.1.2	Determinação da Vazão.....	20
4.2	Dimensionamento dos Dutos.....	21
4.2.1	Cálculo da Vazão e do Diâmetro.....	21
4.2.2	Cálculo da Perda de Carga nos Dutos.....	22
4.3	Perda de Carga nas Curvas e Conexões.....	23
4.4	Dimensionamento do Coletor.....	24
4.4.1	Perda de Carga no Coletor.....	26
4.5	Seleção do Exaustor.....	26
5	Resultados e Discussões.....	27
5.1	Análise dos Captores.....	29
5.1.1	Vazão dos Captores.....	29
5.1.2	Dimensionamento e Perda de Carga nos Captores.....	30
5.1.2.1	Componente 2.....	30
5.1.2.2	Componente 1.....	31
5.2	Análise dos Dutos dos Captores.....	31
5.2.1	Dimensionamento dos Componentes.....	32
5.2.2	Perda de Carga nos Componentes.....	34
5.2.2.1	Perda de Carga na Tubulação.....	34
5.2.2.2	Perda de Carga nas Curvas.....	36
5.2.2.3	Perda de Carga na Bifurcação.....	36
5.3	Análise no Coletor.....	37
5.4	Análise no Duto do Coletor (Componente 6) .....	38
5.4.1	Perda de Carga no Duto.....	38

5.4.2	Perda de Carga na Curva.....	39
5.5	Perda de Carga na Chaminé.....	39
5.6	Seleção do Exaustor.....	40
5.7	Análise de Custos.....	41
6.	Conclusão.....	43
	Referências Bibliográficas.....	44
	Anexos.....	47

## 1 Introdução

O café é um dos produtos mais consumidos no dia a dia da população brasileira e em muitos países. De acordo com o Statista (2021) o consumo de café no mundo em 2020/21 foi de 166,63 milhões de sacas de 60 kg. Com isso o mercado para a fabricação do pó de café se torna um excelente ramo para se investir. O processo de fabricação do café começa na lavoura com a colheita, podendo ser de forma manual ou mecanizada. Posteriormente o fruto é levado à terreiros de café, onde o café perde umidade através do calor do sol, ou podendo também ser secado em secadores industriais, através do calor do fogo. Depois de perder a umidade é retirada a casca do café em máquinas de beneficiamento, restando apenas o café cru com uma taxa de umidade mínima que será retirada no processo de torra.

O processo de torra consiste em adicionar café cru em um reservatório ou cilindro que será levado ao fogo sendo que o reservatório deve estar em movimento durante todo o processo de torrefação para que os grãos ganhem calor uniformemente e percam o restante da umidade presente. Existem diversos pontos de torra, a depender do gosto de quem aprecia o café e o processo é interrompido quando se chega ao ponto desejado de torra. Durante o processo de torra do café, principalmente nos momentos finais, é emitida muita fumaça. Bailey et al. (2015) apresentaram um estudo em uma planta de beneficiamento de café com, aproximadamente, 85 trabalhadores para levantamento das morbidades provocadas pelas emissões resultantes do processo de torra e refinamento de sabor do café. Eles observaram que os trabalhadores expostos diariamente a estas emissões apresentaram sintomas de doenças respiratórias como a bronquiolite obliterativa, irritação ocular e alergias relacionadas aos compostos orgânicos presentes nos fumos emitidos nos processos de beneficiamento do café.

Segundo LeBouf (2020) a fumaça resultante da torra do café expõe os trabalhadores a uma grande quantidade de compostos químicos voláteis como, por exemplo, o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o diacetil e 2,3-pentanodiona. Um estudo do National Institute for Occupational Safety Health (NIOSH) desenvolvido em 2016 mostra que a exposição constante a estes compostos podem impactar negativamente a saúde respiratória do operador podendo causar bronquiolite obliterativa.

De acordo com os dados apresentados em LeBouf et al. (2020) e Bailey et al. (2015), pode-se concluir que as emissões resultantes do processo de torra de café

precisam ter um tratamento adequado para que não haja danos à saúde dos trabalhadores envolvidos nesses processos e um meio de realizar este tipo de tratamento é a utilização de sistemas de ventilação local exaustora para remoção da fumaça emitida durante a torra do café.

A utilização de sistemas de Ventilação Local Exaustora é uma prática muito comum no meio industrial para remoção de emissões de fumos, gases e particulados resultantes dos mais diversos tipos de processos industriais, como na indústria moveleira, processos de tratamento químicos de metais e indústria siderúrgica. Hussin et al. (2015) afirmam em seu estudo que a ventilação local exaustora é um meio de garantir a qualidade do ar interno para manter a saúde e o desempenho das pessoas e promover um ambiente saudável.

No presente trabalho de conclusão de curso busca-se solucionar o problema da remoção de fumaça e fuligem resultantes do processo de torra de café de uma indústria de torrefação de café de pequeno porte, Café da Zélia. Nesta indústria são utilizados torradores de café de pequeno porte com capacidade de torra de aproximadamente 12 quilos de café por ciclo de torra, com tempo médio de 30 a 60 minutos cada ciclo, segundo dados fornecidos pelo operador da máquina. A máquina não possui sistema de exaustão da fumaça e de filtragem da fuligem emitidas no processo de torra.

A primeira alternativa para solução do problema de exaustão da fumaça e filtragem da fuligem produzida no processo foi a busca no mercado por máquinas de torrefação de pequeno porte com sistema de exaustão de fumaça e filtragem de fuligem já instalados na mesma, porém poucos fabricantes apresentam sistema de exaustão de fumaça e nenhum fabricante apresentou sistema de filtragem de fuligem.

Sendo assim, foi elaborada uma segunda alternativa, que resultou no presente trabalho de conclusão de curso, que tem por objetivo o desenvolvimento de um sistema de ventilação local exaustora para captação da fumaça e filtragem da fuligem emitidas durante o processo de torra de café. O sistema projetado será adaptado às máquinas já utilizadas na indústria Café da Zélia, o que irá promover uma melhora da qualidade de ar no ambiente industrial e, dado ao aproveitamento das máquinas já presentes nesta indústria, resultará em menor investimento de capital quando comparado ao que seria investido se houvesse substituição destas por máquinas novas.

## **2 Objetivos**

O objetivo do presente trabalho de conclusão de curso é dimensionar um sistema de Ventilação Local Exaustora para os torradores de café da indústria Café da Zélia localizada em Ibituruna-MG, com a finalidade de remover a fumaça e a fuligem produzida durante o processo de torra do café.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Dimensionar todo o sistema de ventilação para um torrador industrial tradicional da marca Camormaq, que torra 12 kg de café por ciclo na indústria Café da Zélia localizada na cidade de Ibituruna-MG;
- Dimensionar os dutos e o exaustor do sistema;
- Projetar o sistema de separação da fuligem presente na fumaça para que a fumaça seja liberada sem resíduos no meio ambiente;
- Realizar uma análise econômica e analisar a viabilidade de implementação;

### **3 Revisão bibliográfica**

#### **3.1 Ventilação Industrial e controle de poluição**

Em termos gerais ventilar um ambiente significa deslocar ar, o que pode ser entendido como retirar ou adicionar ar a um ambiente. De acordo com Goodfellow (1982) ventilar é um método de controle do ambiente a partir de um fluxo de ar. Ainda segundo o autor a ventilação é uma das técnicas de engenharia mais importantes e o seu uso pode ser dividido em três aplicações principais:

- Controle de calor e umidade para maior conforto;
- Controle de contaminantes para níveis seguros;
- Prevenção de incêndio e explosão.

A renovação do ar dentro de um recinto tem como objetivo a obtenção de ar com um grau de pureza e velocidade de escoamento compatíveis com as exigências fisiológicas para a saúde e o bem-estar humanos, e uma adequada distribuição do mesmo no local. A renovação consegue, além disso, controlar, dentro de certos limites, a temperatura e a umidade ambiente. Entretanto, o controle rigoroso destas duas grandezas só se realiza de um modo praticamente perfeito em instalações de climatização designada, como instalações de ar condicionado.

Youhong Lu (2020) informa que a compreensão das pessoas sobre o conceito de qualidade do ar interno sofreu muitas mudanças. Inicialmente, a qualidade do ar era considerada uma série de parâmetros e indicadores de concentrações de poluentes. E a partir do desenvolvimento de pesquisas mais abrangentes e o aprofundamento contínuo da cognição das pessoas ficou evidente que a análise não deve ser puramente objetiva, mas também subjetiva. Se as pessoas estão satisfeitas com a qualidade do ar, é de qualidade, caso contrário, é de baixa qualidade.

Segundo Clezar (1999), existem dois tipos principais de ventilação industrial: ventilação geral diluidora e a ventilação local exaustora.

A ventilação geral diluidora é utilizada quando a concentração de uma certa contaminação, não nociva a saúde do operador, está acima do limite permitido, e então o ar é insuflado ou exaurido dentro do ambiente a fim de fazer a concentração do contaminante reduzir, uma vez que uma parte da massa do poluente será removida ou

diluída em uma quantidade maior de ar no recinto. Vale ressaltar que ela é aplicada no ambiente e não direto à fonte contaminante.

Já nos casos em que o contaminante é nocivo ao operador deve ser utilizado um sistema de ventilação local exaustora, VLE, e remover esse poluente durante a operação do trabalho. Esse sistema será o responsável por captar o ar poluído de operação, conduzi-lo, purificá-lo e aí então ser descarregado na atmosfera.

Como a fumaça do café é nociva à saúde devido aos compostos orgânicos voláteis gerados durante o processo de torra, o sistema do projeto a ser desenvolvido no presente trabalho deve ser de Ventilação Local Exaustora, e esse tipo de sistema será mais detalhado a seguir.

### **3.2 Ventilação local exaustora**

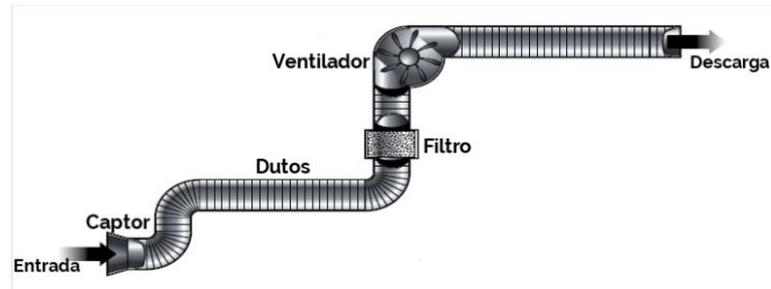
É o tipo de ventilação em que a captação da substância contaminante deve ser o mais próximo quanto possível da fonte contaminante, devido a nocividade do poluente. Ou seja, diferente da ventilação geral diluidora, em uma indústria com diversas máquinas que geram poluentes, cada máquina deverá ter seu sistema independente de captação destes poluentes, e deverá ser coletado o mais próximo possível de onde estão sendo gerados. O projeto adequado, instalação e funcionamento de cada componente é muito importante para a eficiência e eficácia do sistema, pois irá influenciar na performance final. A captação dos poluentes é um ponto fundamental do sistema, não atingindo com os objetivos se não houver uma captação adequada dos poluentes.

De acordo com Health and Safety Authority (2014), os principais elementos em um sistema de VLE são:

- Algum tipo de captor, por onde os contaminantes entram no sistema;
- Dutos, que transportam com segurança os contaminantes para um filtro/limpador/ponto de exaustão;
- Filtro, purificador de ar;
- Motor de ar: ventilador para alimentar o sistema.
- Descarga: um ponto seguro de exaustão.

A Figura 3.1 mostra como se dá a distribuição desses componentes.

Figura 3.1: Montagem do sistema de VLE.



Fonte: SABER SST.

O componente que opera a exaustão é o ventilador, que pode ser de dois tipos básicos: os axiais e os centrífugos. De acordo com Brito (2001), de maneira geral a utilização de ventiladores centrífugos se faz necessária quando é preciso criar valores de pressão mais elevados para conseguir vencer as perdas de carga de um determinado sistema, e geralmente esse tipo de ventilador é mais utilizado em sistemas de exaustão. Já os ventiladores axiais são mais utilizados quando há uma demanda de vazão mais elevada. Ainda segundo Brito (2001) o ventilador ao ser acionado por um motor, que geralmente é elétrico, cria uma diferença de pressão entre dois pontos, fazendo com que a pressão no captor seja menor que a pressão na saída do ventilador. E essa pressão negativa no captor faz com que o ar próximo ao captor seja sugado para o sistema.

Segundo Health and Safety Authority (2014) o operador deve entender por completo o sistema e seu funcionamento. E além disso entender os riscos que devem ser controlados para que seja assegurado a eficiência e eficácia do projeto.

Health and Safety Authority (2014) ainda afirma que para que seja validada a necessidade de instalação de um sistema de VLE devem ser avaliados alguns fatores, como a avaliação do risco a saúde sem o sistema implementado e se outros processos mais simples não seriam suficientes para a otimização do ambiente de trabalho. Segundo o autor, uma avaliação de risco envolve antecipar, reconhecer, avaliar e controlar os perigos aos quais os funcionários estão sujeitos.

Após analisados os fatores mencionados anteriormente, e verificada a necessidade de instalação do sistema de VLE, de acordo com o autor, devem ser atendidas algumas condições, como:

- O sistema deve ser à prova de vazamentos no lado da sucção, pois o vazamento pode comprometer a exaustão, promovendo uma extração ineficiente.
- A taxa de fluxo de ar deve ser suficiente para que ocorra a captura inicial. Poeiras combustíveis, como pó de madeira, se não exauridos corretamente podem acumular na tubulação e ser um risco de incêndio ou explosão.
- Evitar geometrias que possam gerar fluxo ineficiente.
- Materiais de construção compatíveis com o contaminante a ser exaurido pelo sistema.

Um sistema de Ventilação Local Exaustora pode ser aplicado nos mais diversos tipos de indústria, como indústrias moveleiras, fábrica de tintas, entre outros. Como é o caso do estudo realizado por Lied (2011) onde o autor aplica o sistema de Ventilação Local Exaustora em uma fábrica de móveis, onde o sistema capta os particulados gerados por uma lixadeira, uma serra circular, uma serra fita e uma plaina. O particulado exaurido também é filtrado antes de ser descarregado no ambiente.

Já no estudo realizado por Morteza (2013) um sistema de Ventilação Local Exaustora foi projetado para controlar a concentração de pó de sílica cristalina em uma operação de fundição avaliando a eficiência do sistema, que pode ser concluída como satisfatória após o sistema de VLE preservar os níveis da sílica em níveis abaixo da concentração máxima permitida pelo NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). E ao verificar o estudo realizado por Michael (2012) é constatado que um sistema de ventilação exaustora aplicado em uma indústria de soldagem quando usado corretamente pode produzir reduções mais elevadas dos fumos em relação à ventilação natural ou geral diluidora.

No contexto da discussão realizada anteriormente, pretende-se no presente trabalho de conclusão de curso projetar um sistema de Ventilação Local Exaustora (VLE) seguindo a metodologia de projeto de Macintyre (1990) que será adaptado às máquinas de uma indústria de torrefação de café, com a finalidade de exaurir a fumaça emitida durante o processo de torra. Junto ao sistema de VLE será dimensionado um ciclone para filtragem da fuligem que é lançada ao meio ambiente em meio a esta fumaça. Este

sistema, devidamente projetado, promoverá melhora na qualidade do ar no ambiente de trabalho para os operadores das máquinas de torrefação e também auxiliará na diminuição de resíduos do processo de torra no ar ambiente

## 4 Metodologia

Os torradores industriais utilizados na indústria de Café da Zélia em Ibituruna-MG atualmente não possuem sistemas de exaustão. Com isso, o operador inala toda a fumaça gerada durante o processo de torra. Essas máquinas de café chegam a torrar mais de 12 kg de café por hora, gerando então uma grande quantidade de fumaça. Assim o presente trabalho de conclusão de curso contará com o dimensionamento de um sistema de ventilação local exaustora para captar essa fumaça e captar a fuligem gerada durante a torra. Para se dimensionar o sistema e escolher um ventilador que irá cumprir com o objetivo deve ser encontrada toda a perda de carga do sistema. A perda de carga é a energia perdida do fluido devido ao atrito com as paredes do duto. Isso inclui a perda nos captores, nos dutos, nas curvas, bifurcações e no coletor.

Neste item serão apresentados os métodos, considerações e as equações necessárias para todos os cálculos do trabalho.

A máquina que será realizado o dimensionamento da ventilação se encontra na figura 4.1

**Figura 4.1:** Torrador de café industrial na configuração de torra.



Fonte: Catálogo Camormaq

O projeto contará com dois captores, um captor para realizar a exaustão da fumaça durante o processo de torra e um captor para realizar a exaustão da fumaça do café torrado, que será despejado na peneira. A Figura 4.1 mostra a configuração do torrador durante o processo da torra. A Figura 4.2 mostra a configuração quando o café torrado é despejado na peneira para o resfriamento.

**Figura 4.2:** Torrador de café na configuração de despejamento dos grãos



Fonte: Catálogo Camormaq

#### 4.1. Dimensionamento dos captores

O primeiro passo para o dimensionamento do sistema de VLE é a escolha do tipo de captor e suas respectivas análises. Os dois captores do projeto serão do tipo coifa, devido as condições de captação e pela geometria do torrador.

##### 4.1.2. Determinação da vazão

Para se determinar a vazão nos captores do tipo coifa, segundo Macintyre (1990) utiliza-se a Equação 1.

$$Q_e = 5,4 \cdot S \cdot \sqrt[3]{h \cdot (\Delta t)^{1,25}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde,

$S$  = Área superficial do da superfície quente  $ft^2$

$h$  = Altura do corpo quente  $ft$

$\Delta t$  = diferença de temperatura entre o corpo e o sistema  $^{\circ}F$

Tendo obtidas as vazões na entrada e na saída do captor, podemos então calcular a perda de carga no captor pela Equação 2:

$$\Delta p_c = F \cdot h_v \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo  $F$  o fator de perda de carga que pode ser encontrado no ANEXO I para os captores. E  $h_v$  a pressão dinâmica no captor, que pode ser calculado pela equação:

$$h_v = \frac{v^2}{16,34} \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo  $v$  a velocidade no captor.

Como foram obtidas as vazões, para se obter a velocidade de entrada no captor será utilizada a equação da continuidade, apresentada a seguir:

$$Q = A \cdot v \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde  $A$  é a área da seção transversal.

## 4.2. Dimensionamento dos dutos

### 4.2.1 Cálculo da vazão e do diâmetro

Segundo Macintyre (1990) a vazão no duto é dada pela Equação 5. Note que a vazão ao sair do duto e entrar no captor sofre uma queda em seu valor. Essa queda da vazão se deve ao fato da perda de pressão no captor pela geometria.

$$Q_d = 1,2 \cdot Q_e \quad (\text{Eq. 5})$$

Já a velocidade com que a fumaça irá percorrer o duto é tabelada. E seu valor e os critérios a serem adotados se encontram no ANEXO II.

Tendo então a velocidade no duto e sua vazão, é possível reorganizar a equação (4) e chegar na equação do diâmetro do duto que se encontra na Equação 6.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Encontrado o diâmetro do duto, o próximo passo é a escolha do material. A escolha será feita com base nas dimensões e o resíduo a ser transportado. Como a fumaça do café possui uma pequena quantidade de humidade retirada do café durante o processo da torra, e a fuligem não é corrosiva o aço galvanizado é uma boa escolha para o projeto.

#### 4.2.2. Cálculo da perda de carga nos dutos

O cálculo da perda de energia, ou perda de carga, dentro dos dutos circulares será calculada utilizando a fórmula de Darcy e Weisbach. Para essa fórmula é utilizada a rugosidade absoluta do material do duto e da densidade do material da densidade do fluido.

A Equação 7 mostra como se calcula a perda de carga nos dutos.

$$\Delta p = f \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{\rho V^2}{2} \right) \quad (\text{Eq.7})$$

Sendo  $L$  o comprimento do duto e  $D$  o seu diâmetro.

Já a grandeza  $f$  é o coeficiente de atrito e depende de duas grandezas: rugosidade relativa do duto e o número de Reynolds. A rugosidade relativa  $\frac{\epsilon}{D}$ , sendo  $\epsilon$  a rugosidade absoluta e  $d$  o diâmetro do duto.

Para dutos de aço galvanizado,  $\epsilon = 0,00015$  m de acordo com WHITE (2018).

O número de Reynolds é calculado pela Equação 8.

$$Re = \frac{vD}{\mu} \cdot \rho \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade cinemática e  $\rho$  o peso específico e  $v$  a velocidade do fluído.

Os valores para a viscosidade e peso específico podem ser encontrados em tabelas de propriedades fluído-mecânicas em função de várias temperaturas. Para temperaturas que não se encontram nas tabelas se utilizam as Equações 9 e 10.

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (\text{Eq. 9})$$

Sendo  $P$  a pressão,  $T$  a temperatura em Kelvin e  $R$  a constante universal dos gases. Para o caso do ar  $R = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$  de acordo com WHITE (2018)

$$\frac{\mu}{\mu_0} \approx \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0,7} \quad (\text{Eq.10})$$

Sendo  $\mu_0 = 1,71 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ , e  $T_0 = 273 \text{ K}$ , White (2018).

Após calculados os dois parâmetros pode se usar então o diagrama de Moody, presente no ANEXO IV retirado de White (2018) para encontrar o fator de atrito e com isso determinar a perda de carga.

### 4.3. Perda de carga das curvas e conexões

Para o cálculo da perda de carga para os demais componentes do sistema os valores são obtidos a partir da Equação 11.

$$\Delta p = K \frac{\rho V^2}{2} \quad (\text{Eq. 11})$$

Sendo  $K$  o coeficiente de perda de carga para cada tipo de elemento. No caso das curvas, a constante  $K$  é substituída por  $C_o$ .

Para curvas de  $90^\circ$   $C_o$  é calculado pela Equação 12.

$$C_o = \frac{6,852}{D^{0,626}} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde  $D$  é o diâmetro do duto em milímetros.

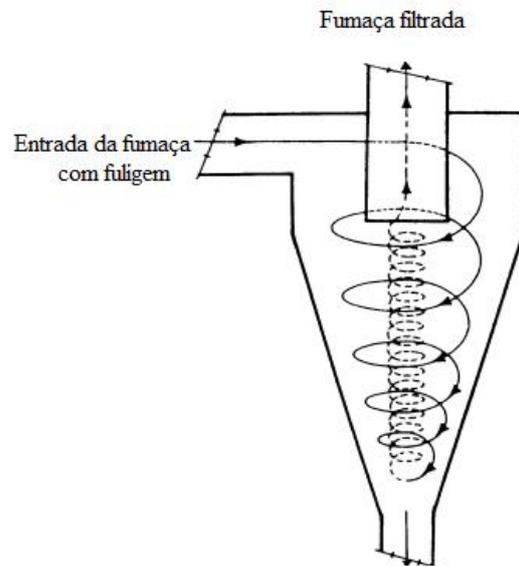
A Equação 13 é utilizada para curvas com ângulos diferentes de  $90^\circ$

$$C_o = 1,15 \frac{\theta}{90} C_{oT} \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde  $C_{oT}$  é um o coeficiente calculado pela equação (12) com o diâmetro da curva em questão, considerando a hipótese de que a curva fosse de  $90^\circ$  e  $\theta$  o ângulo real da curva.

#### 4.4. Dimensionamento do coletor

Por fim então deve ser escolhido o coletor para filtrar a fuligem, para que a fumaça saia limpa para a atmosfera. E para realizar essa separação será utilizado um coletor centrífugo. Esses coletores empregam um movimento rotatório no gás, de modo que a força centrífuga aplicada às partículas, sejam lançadas de encontro as paredes, devido a razão dessa força ser maior que as forças de coesão molecular e da gravidade. Com isso se cria um fluxo helicoidal descendente. E o coletor utilizado será do tipo cilíndrico, alongado e a parte inferior cônica como mostrado na figura 4.3.

**Figura 4.3:** Coletor ciclone

**Fonte:** Adaptado de Macintyre (1990)

Para dimensionar o ciclone o primeiro passo é escolher o modelo. Existem os ciclones padrão A de alta eficiência e padrão B de média eficiência.

Para o projeto em questão como a fuligem é uma impureza relativamente grande, um ciclone de média eficiência atende à demanda.

O primeiro passo é encontrar o diâmetro principal do ciclone que é dado pela equação:

$$d = \sqrt{\frac{Q}{800}} ft \quad (\text{Eq.14})$$

Convertendo para o sistema internacional temos:

$$d = \sqrt{Q \cdot 0,24606} \quad (\text{Eq.15})$$

Depois de encontrado o valor do diâmetro principal, é utilizada a tabela dos fatores multiplicativos para encontrar o restante dos parâmetros. Os valores dos fatores multiplicativos se encontram no ANEXO IV.

#### 4.4.1 Perda de carga no coletor

A perda de carga no coletor é obtida a partir dos valores de todos os fatores encontrados para cada modelo, e é expressa pela equação 16.

$$\Delta p = \frac{12 \cdot l \cdot h}{K \cdot d_d^2 \cdot \sqrt[3]{\frac{L}{d}} \cdot \sqrt[3]{\frac{L'}{d}}} \quad (\text{Eq.16})$$

#### 4.5. Seleção do exaustor

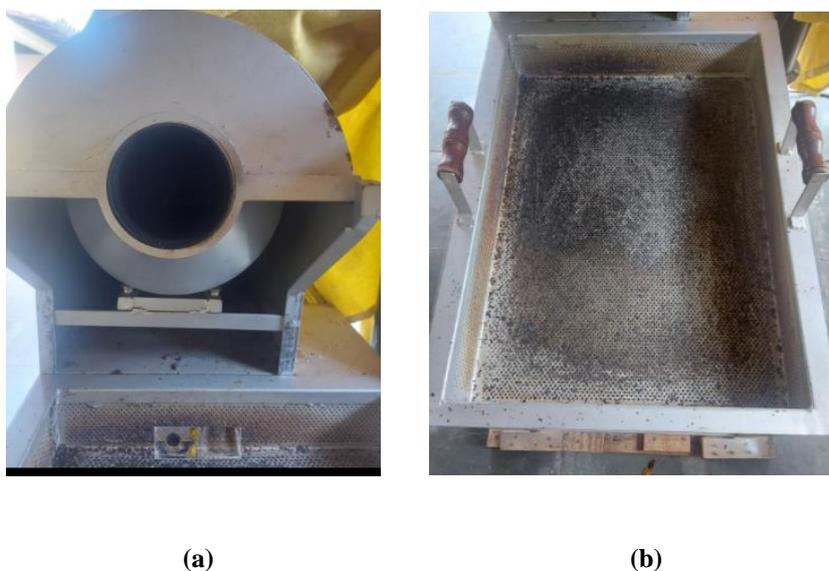
Após calculadas todas as perdas de carga do sistema deve então ser escolhido o exaustor que será responsável pelo funcionamento do escoamento. E as condições são: vencer a perda de carga que apresentou o maior valor pra determinado trecho, possuir de descarga maior do que a necessária e uma vazão volumétrica maior ou igual à vazão total do sistema.

## 5 Resultados e discussões

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos para o projeto a partir da metodologia abordada no item 3 do presente trabalho.

O torrador para o qual está sendo projetado o sistema de ventilação local exaustora apresenta dois pontos de exaustão. No bocal do torrador, apresentado na Figura 5.1 (a) que é para extrair do recinto a fumaça gerada durante o processo de torra, e na peneira apresentada na Figura 5.1 (b) para extrair a fumaça e fuligem liberadas do café após o processo de torra. apresentada na Figura 5.1 (b) para extrair a fumaça e fuligem liberadas do café após o processo de torra.

**Figura 5.1:** Locais com necessidade de exaustão



**Fonte:** Do autor

Na Figura 4.2 é mostrada a configuração do sistema de exaustão e apresenta os seguintes componentes:

- I- Captor do bocal do torrador.
- II- Captor da peneira de resfriamento.
- III- Duto para o captor do bocal do torrador.

IV- Duto para o captor da peneira de resfriamento.

V- Coletor da fuligem.

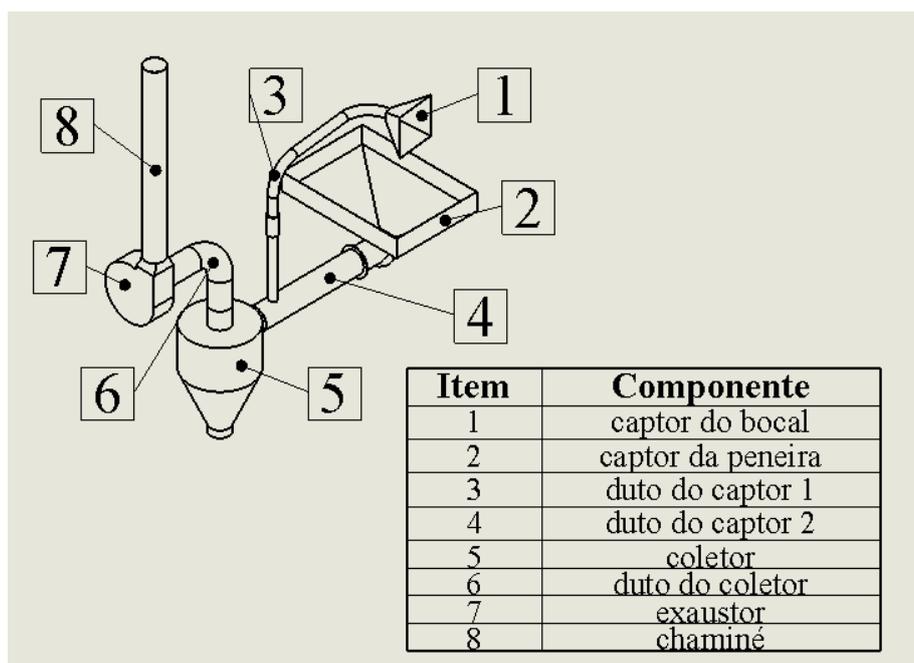
VI- Duto para o coletor.

VII- Ventilador (exaustor).

VIII- Chaminé.

As medidas dos componentes presentes serão abordadas no decorrer de cada seção do presente trabalho.

**Figura 5.2:** Proposta de montagem dos componentes do sistema



Fonte: Do autor

Com o esquema de montagem definido foram realizados os cálculos para o dimensionamento do sistema de VLE. A primeira análise a ser feita é dos captosres, tanto a definição quanto o cálculo da perda de carga e depois para o restante dos componentes. O objetivo é determinar a perda de carga de cada componente para que ao final seja dimensionado um exaustor que consiga vencer as condições que devem ser atendidas para que seja assegurado o funcionamento do sistema. Os tópicos a seguir mostram todos esses cálculos e considerações

## 5.1 Análise dos captosres

### 5.1.1 Vazão dos captosres

As dimensões da peneira apresentada na Figura 4.1 (b) são: 700 mm x 500 mm de comprimento e largura respectivamente. A altura da peneira é de 100 mm. A temperatura máxima do café imediatamente após a torra chega até a 200°C. Então podemos calcular a vazão pela equação (1) da seção 3 do trabalho. A equação não trabalha com o sistema internacional de medidas, tendo então de converter as medidas para o sistema inglês. A área superficial do corpo quente, que é a área superficial da peneira, será então de  $S = 3,7673 \text{ ft}^2$ . A altura do corpo quente  $h = 0,3609 \text{ ft}$ . Considerando que a temperatura ambiente é de 25°C, a diferença de temperatura já convertida será de  $\Delta t = 315^\circ\text{F}$ . Tendo então a vazão:

$$Q_e = 5,4 \cdot 3,7673 \cdot \sqrt[3]{0,3609 \cdot (315)^{1,25}} = 154,1897 \text{ ft}^3/\text{min} , \text{ que no sistema internacional é } Q_e = 0,0728 \text{ m}^3/\text{s} .$$

Para o dimensionamento do captor do bocal, componente 1, a área superficial do corpo quente será a área do bocal do cilindro de torra. O diâmetro do bocal do torrador é de 110 mm. O que resulta em uma área superficial de  $S = 0,4092 \text{ ft}^2$ . A altura  $h$  do corpo quente até o captor será nesse caso a distância do captor até a abertura do torrador. Não é tão interessante colocar o captor muito próximo pois ele irá absorver calor durante o processo de torra, fazendo com que a torra possa demorar mais e assim elevando o custo da produção do café torrado, uma vez que esse captor estará exaurindo a fumaça durante o processo. Deve-se então ter uma distância considerável entre o captor e o bocal. A distância será de 70mm, ou  $0,2297 \text{ ft}$ . A diferença de temperatura será adotada a mesma do caso anterior, considerando então a pior das hipóteses, que é quando o café atinge sua temperatura máxima. Com isso terá:

$$Q_e = 5,4 \cdot 0,4092 \cdot \sqrt[3]{0,2297 \cdot (315)^{1,25}} = 14,8712 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

No sistema internacional  $Q_e = 0,0070 \text{ m}^3 / \text{s}$ .

## 5.1.2 Dimensionamento e perda de carga nos captores

### 5.1.2.1 Componente 2

A instalação na máquina será feita de modo que a peneira do café torrado fique dentro do captor, e para que isso aconteça as medidas do captor, componente 2, serão então 720 mm x 520 mm de comprimento e largura respectivamente, tendo então uma área de  $A=0,3744 \text{ m}^2$ .

Para determinar a velocidade de escoamento no captor pode-se usar a equação (4) que é a equação da continuidade, uma vez que temos a área superficial e já foi encontrada a vazão do captor. Podemos então isolar a velocidade na equação:

$$0,0728 = 0,3744 \cdot v$$

$$v = 0,1944 \text{ m/s}.$$

Com isso pode ser calculado então a pressão dinâmica nos captores, a partir da equação (3).

$$h_v = \frac{0,1944^2}{16,34} = \mathbf{0,0023 \text{ mm ca}}$$

Para a determinação da perda de carga dos captores deve ser descoberto o ângulo alfa de abertura da coifa. O ângulo escolhido foi de 120° devido a geometria da peneira e o espaço da peneira até o chão. São considerações que facilitarão no processo de manufatura do captor e montagem do sistema. Com isso consultado o ANEXO I obtemos um fator de atrito de  $F=0,27$ .

Calculando então a perda de carga teremos:

$$\Delta p_c = 0,27 \cdot 0,0023 = \mathbf{0,0006 \text{ mm ca}}$$

### 5.1.2.2 Componente 1

As dimensões do captor do bocal, componente 1, são 150 mm x 150 mm de comprimento e largura, tendo assim uma área de  $A=0,0225 \text{ m}^2$ .

Analogamente como foi realizado para encontrar a velocidade de escoamento componente 2, faremos para o elemento 1, e com isso a velocidade de escoamento no captor do bocal será  $v = \mathbf{0,3111 \text{ m/s}}$  e a pressão dinâmica  $h_v = \mathbf{0,0059 \text{ mm ca}}$ .

Já o ângulo de abertura do captor neste caso será 30°, por maior facilidade de manufatura, que consultando novamente o ANEXO I tem-se  $F=0,1$ , obtendo então coincidentemente uma perda de carga de  $\Delta p_c = \mathbf{0,0006 \text{ mmca}}$ .

Note que os valores de perda de carga são muito baixos, mas justificáveis por apresentarem uma velocidade de escoamento muito baixa para ambos os casos.

## 5.2 Análise dos dutos dos captores (componentes 3 e 4)

Como os componentes 3 e 4 são os dutos que saem do captor, suas análises serão simultâneas.

### 5.2.1 Dimensionamento dos componentes

Como foi dito na seção anterior, a vazão nos dutos é 20% maior que a vazão do captor devido à perda de pressão do ar ao sair do duto e entrar no captor. Pode então ser calculada a vazão para os dois componentes. Para o componente 4:

$$Q_d = 1,2 \cdot 0,0728 = 0,0874 \text{ m}^3/\text{s}$$

E para o caso do componente 3  $Q_d = 0,0084 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para fazer o dimensionamento dos dutos devemos então definir a velocidade de operação dentro dos dutos. Consultando o ANEXO II tem-se que a velocidade máxima de escoamento do ar em dutos principais de um bom projeto é de 9 m/s e a velocidade mínima de 6 m/s. Será adotada então 9 m/s para o componente 4, com o intuito diminuir ao máximo o diâmetro do duto, uma vez que são grandezas inversamente proporcionais.

Já para o componente será adotado 6 m/s, pois o valor de vazão nesse duto foi muito baixo, e seu diâmetro não assuma um valor muito pequeno, por questões de considerações de projeto. Com isso pela equação da continuidade teremos que o diâmetro do componente 4 será:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0874}{\pi \cdot 9}} = 0,1112 \text{ m}$$

Entretanto não existe tubos no mercado com tal medida. Consideremos então um duto com diâmetro de 114,3 mm (4,5"). Com isso devemos recalculer a velocidade no duto e verificar se a velocidade com o diâmetro escolhido ainda se encontra dentro do intervalo aceitável para dutos principais.

$$0,1143 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0874}{\pi \cdot v}}$$

$$v = 8,4947 \text{ m/s}$$

Como o valor está dentro do intervalo entre 6m/s e 9m/s, que é o intervalo ideal de velocidades de escoamento para dutos principais, o valor do diâmetro do duto será de 114,3 mm e a velocidade no duto será 8,4947 m/s.

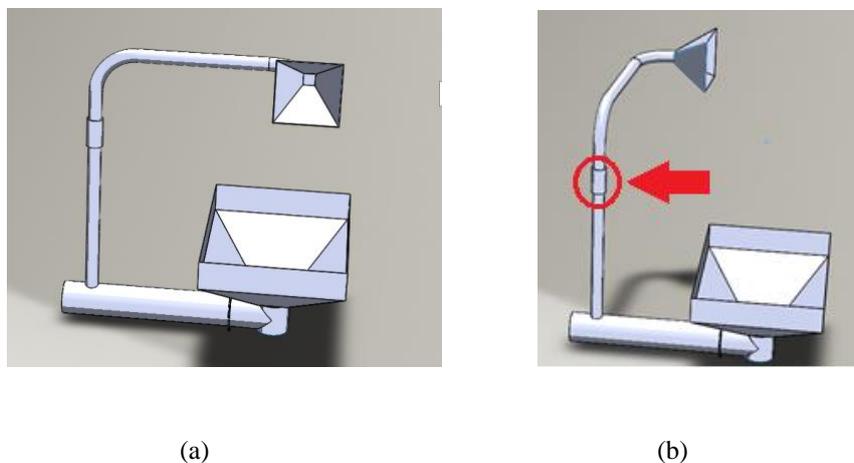
Para o componente 3 teremos:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0084}{\pi \cdot 6}} = 0,0422$$

Existe tubulação com o diâmetro encontrado de 42,2 mm (5/3”), e com isso não se faz necessário recalcular a velocidade.

Quando termina o processo de torra de café, e é necessário jogar o café na peneira para o resfriamento, esquematicamente apresentado na Figura 4.1, se o componente 3 for fixo na configuração que encontra na Figura 5.3 (a), não será possível jogar o café, pois o captor irá impedir o movimento do cilindro do café torrado. O projeto deve contar então com uma articulação, para que parte do duto tenha o grau de liberdade de rotação, permitindo assim a movimentação do componente 1. A Figura 5.3 (b) mostra o componente 1 em uma posição diferente da apresentada na Figura 5.3 (a), e além de mostrar também o local da articulação.

**Figura 5.3:** Representação da articulação no duto do captor 1



**Fonte:** Do autor

## 5.2.2 Perda de carga nos componentes

### 5.2.2.1 Perda de carga na tubulação

Para a determinação da perda de carga nos dutos devem ser obtidos os dados da viscosidade e peso específico do ar para as temperaturas de operação. Será trabalhada a pior das hipóteses, que será o caso da temperatura que apresentar a maior perda de carga. E para isso será calculado a perda de carga tanto para 200°C (temperatura máxima durante a operação) e 25°C (temperatura mínima de operação). Na Tabela 5.1 são mostrados os valores dessas propriedades em função da temperatura.

**Tabela 5.1:** Propriedades do ar em função da temperatura

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{kg/m}^3$	$\mu, \text{N} \cdot \text{s/m}^2$	$\nu, \text{m}^2/\text{s}$	$T, ^\circ\text{F}$	$\rho, \text{slug/ft}^3$	$\mu, \text{lb} \cdot \text{s/ft}^2$	$\nu, \text{ft}^2/\text{s}$
-40	1,52	1,51 E-5	0,99 E-5	-40	2,94 E-3	3,16 E-7	1,07 E-4
0	1,29	1,71 E-5	1,33 E-5	32	2,51 E-3	3,58 E-7	1,43 E-4
20	1,20	1,80 E-5	1,50 E-5	68	2,34 E-3	3,76 E-7	1,61 E-4
50	1,09	1,95 E-5	1,79 E-5	122	2,12 E-3	4,08 E-7	1,93 E-4
100	0,946	2,17 E-5	2,30 E-5	212	1,84 E-3	4,54 E-7	2,47 E-4
150	0,835	2,38 E-5	2,85 E-5	302	1,62 E-3	4,97 E-7	3,07 E-4
200	0,746	2,57 E-5	3,45 E-5	392	1,45 E-3	5,37 E-7	3,71 E-4
250	0,675	2,75 E-5	4,08 E-5	482	1,31 E-3	5,75 E-7	4,39 E-4
300	0,616	2,93 E-5	4,75 E-5	572	1,20 E-3	6,11 E-7	5,12 E-4
400	0,525	3,25 E-5	6,20 E-5	752	1,02 E-3	6,79 E-7	6,67 E-4
500	0,457	3,55 E-5	7,77 E-5	932	0,89 E-3	7,41 E-7	8,37 E-4

Fonte: White (2007)

Para a temperatura de 25°C não possuem os dados já tabelados. Devem ser utilizadas as equações (9) e (10) para gases ideais. Teremos então:

$$\rho = \frac{101325}{287 \cdot 298} = 1,185 \text{ kg/m}^3$$

$$\frac{\mu}{0,0000171} \approx \left(\frac{298}{273}\right)^{0,7} \text{ com isso } \mu = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$$

Com isso pode ser determinado o número de Reynolds.

Como dito na seção anterior a rugosidade absoluta dos aços galvanizados é 0,00015. Para o componente 4 se tem:

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,00015}{0,1143} = 0,0013$$

Para o caso de 25°C será:

$$R_e = \frac{8,4947 \cdot 0,1143}{0,0000182} \cdot 1,185 = 6,32 \cdot 10^4$$

Consultando o diagrama de Moody para os valores encontrados o fator de atrito será  $f = 0,025$ . O comprimento total do componente 4 é  $L = 0,65 \text{ m}$ . E o valor da perda de carga pode ser calculado:

$$\Delta p = 0,025 \left( \frac{0,65}{0,1143} \right) \left( \frac{1,185 \cdot 8,4947^2}{2} \right) = 6,0784 \text{ Pa}$$

Para o caso de 200°C o número de Reynolds será  $R_e = 2,81 \cdot 10^4$  e o fator de atrito  $f = 0,026$ . A perda de carga será  $\Delta p = 3,98 \text{ Pa}$ .

Como a perda de carga foi maior para o caso onde a temperatura do ar estava ambiente, essa será levada adiante admitindo assim a pior das hipóteses.

Para o componente 4 à temperatura de 25°C terá:

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,00015}{0,0422} = 0,0036$$

$$R_e = \frac{6 \cdot 0,0422}{0,0000182} \cdot 1,185 = 1,64 \cdot 10^4$$

Ao consultar o diagrama de Moody, o fator de atrito será  $f = 0,034$ .

O comprimento total do elemento 3 é  $L = 1 \text{ m}$ . A perda de carga será então:

$$\Delta p = 0,034 \left( \frac{1,5}{0,0422} \right) \left( \frac{1,185 \cdot 6^2}{2} \right) = 25,78 \text{ Pa}$$

### 5.2.2.2 Perda de carga nas curvas

Todas as curvas do sistema são de 90°, utilizando assim somente as equações (11) e (12).

Para a curva no componente 4 teremos:

$$C_o = \frac{6,852}{114,3^{0,626}} = 0,35$$

$$\Delta p = 0,35 \frac{1,185 \cdot 8,4947^2}{2} = 14,96 \text{ Pa}$$

As curvas presentes no componente 4 apresentarão o mesmo valor, uma vez que nenhuma propriedade das equações (11) e (12) se alteram no decorrer do escoamento no componente. Calculando então seu valor tem-se que:

$$C_o = \frac{6,852}{42,2^{0,626}} = 0,66$$

$$\Delta p = 0,66 \frac{1,185 \cdot 6^2}{2} = 14,08 \text{ Pa}$$

Como são duas curvas, a perda total será  $\Delta p = 28,16 \text{ Pa}$ .

### 5.2.2.3 Perda de carga na bifurcação

Assim como nos captores, para a perda de carga na bifurcação será utilizada a equação (2). Para encontrar a pressão dinâmica é necessário saber a velocidade na bifurcação. Como a bifurcação é o ponto de encontro dos componentes 3 e 4, a vazão será a vazão somada dos dois componentes  $Q_t = 0,0958 \frac{m^3}{s}$ .

Utilizando novamente a equação da continuidade:

$$v = \frac{0,0958}{0,0103} = 9,3 \frac{m}{s}$$

Podemos então determinar a pressão dinâmica:

$$h_v = \frac{9,3^2}{16,34} = 5,2931 \text{ mmca}$$

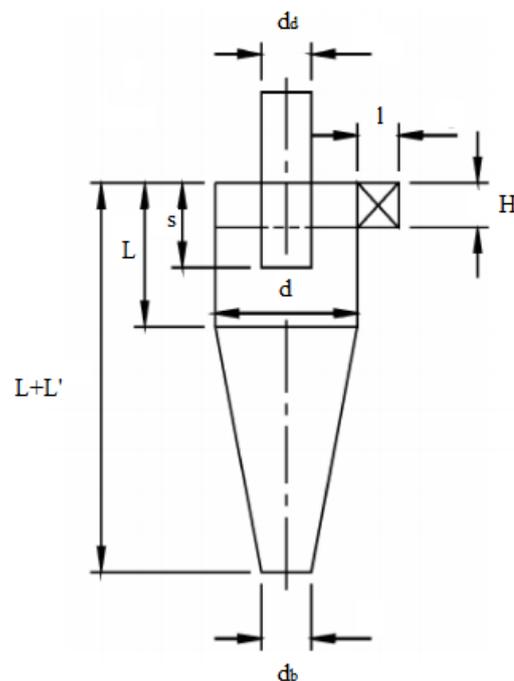
$$\Delta p = 1 \cdot 5,2937 = 5,2931 \text{ mmca}$$

Transformando para o sistema internacional  $\Delta p = 51,93 \text{ Pa}$ .

### 5.3 Análise do coletor

Para a produção ou dimensionamento do coletor existem várias medidas a serem definidas. A representação de cada uma dessas medidas encontra-se na Figura 5.4.

**Figura 5.4:** Representação dos parâmetros do coletor



**Fonte:** Adaptado de Macintyre (1990)

A determinação de cada uma dessas medidas depende do diâmetro principal  $d$  que é calculado pela equação (14). E para encontrar o valor dos outros parâmetros se utiliza os fatores multiplicativos do ANEXO IV retirado de Macintyre (1990).

$$d = \sqrt{0,0958 \cdot 0,24606} = 0,1535 \text{ m}$$

E os outros parâmetros estão apresentados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2:** Parâmetros calculados para o coletor

	D	H	L	S	$d_d$	L	L'
<b>(m)</b>	0,1535	0,1152	0,0576	0,1343	0,1152	0,2303	0,3838
<b>(ft)</b>	0,5036	0,3780	0,1890	0,4406	0,3780	0,7556	1,259

**Fonte:** Adaptado de MACINTYRE (1990)

Como a entrada no captor se dará sem a necessidade de guia, ou seja, a linha de entrada no captor é a mesma linha de escoamento, o valor da constante K da equação (16) será  $K = 0,5$ . Com isso a perda de carga no coletor será:

$$\Delta p = \frac{12 \cdot 0,1890 \cdot 0,3780}{0,5 \cdot 0,5036^2 \cdot \sqrt[3]{0,7556} \cdot \sqrt[3]{1,2590} \cdot \sqrt[3]{0,5036}} = 4,351 \text{ inH}_2\text{O} = 1083,76 \text{ Pa}$$

## 5.4 Análise no duto do coletor (componente 6)

### 5.4.1 Perda de carga no duto

Ao analisar a Figura 4.3, pode-se perceber que existem duas saídas no coletor. Uma que é a da fuligem, e a outra da fumaça livre da fuligem, que continuará circulando pelo sistema e será descartado no ambiente. O duto depois do coletor geralmente irá operar em uma vazão diferente da vazão total do sistema. Isso se deve ao fato de que haverá uma vazão na outra saída do coletor com a fuligem filtrada dentro deste coletor. Entretanto o sistema também irá operar sem presença de fuligem em alguns momentos. E são nesses momentos que a perda de carga no duto será maior, uma vez que a perda de carga é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade no duto. E essa velocidade será a mesma que entrou no coletor, que foi calculada no tópico 5.2.2.3 que foi  $v = 9,3 \frac{m}{s}$ . Podemos então calcular o número de Reynolds:

$$R_e = \frac{9,3 \cdot 0,1143}{0,000182} \cdot 1,185 = 6,92 \cdot 10^4$$

A rugosidade relativa é a mesma encontrada para a componente 4 que foi:

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,00015}{0,1143} = 0,0013$$

Consultando mais uma vez o diagrama de Moody se tem  $f = 0,026$ .

Considerando que o comprimento total do duto será de  $L = 0,45 \text{ m}$ , o valor da perda de carga será:

$$\Delta p = 0,026 \left( \frac{0,45}{0,1143} \right) \left( \frac{1,185 \cdot 9,3^2}{2} \right) = 5,25 \text{ Pa}$$

#### 5.4.2 Perda de carga na curva

A curva do componente 6 também é de  $90^\circ$ . O coeficiente de perda assim como para o componente 4 será:

$$C_o = \frac{6,852}{114,3^{0,626}} = 0,35$$

E a perda de carga:

$$\Delta p = 0,35 \frac{1,185 \cdot 9,3^2}{2} = 17,94 \text{ Pa}$$

#### 5.5 Perda de carga na chaminé

O dados para o cálculo da perda de carga na chaminé serão quase iguais os cálculos realizados na seção 4.4.1, alterando apenas o comprimento do duto, que no caso da chaminé será  $L = 6 \text{ m}$ . O fator de atrito sendo o mesmo, o valor da perda de carga será de :

$$\Delta p = 0,026 \left( \frac{6}{0,1143} \right) \left( \frac{1,185 \cdot 9,3^2}{2} \right) = 69,94 \text{ Pa}$$

## 5.6 Seleção do exaustor

Para ser especificado o exaustor, como já identificado previamente, o ventilador deve vencer duas condições: vencer a perda de carga que apresentou o maior valor pra determinado trecho e apresentar uma vazão volumétrica maior ou igual à vazão total do sistema. Com isso ao dimensionar o exaustor para o projeto em questão, a pressão de sucção deve ser superior a maior perda de carga do sistema e a vazão maior que a vazão total.

A maior perda de carga apresentada no sistema foi a perda de carga no coletor, apresentando um valor de **1083,76 Pa** ou **110,48 mmca**. E a vazão total do sistema é **0,0958  $\frac{m^3}{s}$**  ou **5,748  $\frac{m^3}{min}$** .

Ao consultar o catálogo da Ventisilva, uma grande empresa nacional fabricante de ventiladores em geral foi encontrado um que atende as condições de projeto, que se encontra na Figura 5.5 (a). O exaustor possui rotor de pás retas e suas propriedades se encontram na Figura 5.5 (b).

**Figura 5.5:** Exaustor escolhido no projeto



**Fonte:** Catálogo Ventisilva

E com isso todos os componentes do sistema foram dimensionados podendo então ser realizada uma análise de custos.

### 5.7 Análise de custos

Para a execução do projeto foi procurado um serralheiro para que pudesse então ser feito um orçamento de toda a parte dos componentes que devem ser manufaturados. O coletor dimensionado em questão não é encontrado no mercado com tais dimensões. Foi solicitado então um orçamento a algumas empresas do ramo, entretanto não houve retorno por parte das mesmas. Foi então estimado um valor com base em coletores de medidas próximas. O valor do exaustor escolhido é fornecido no catálogo do fabricante e se encontra no ANEXO IX. A Tabela 5.3 mostra os componentes necessários e seus respectivos valores.

Tabela 5.3: Tabela de custos do projeto

<b>Produto</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
Sistema de dutos	Todas as tubulações, curvas e montagem do sistema	R\$ 1.400,00
Ventilador	Exaustor dimensionado para o sistema	R\$ 3.721,09
Componentes elétricos	Chave interruptor para acionamento e fiação para ligação do motor.	R\$35,00
Coletor	Valor estimado do coletor com base em coletores com medidas próximas	R\$ 400,00
	Total	R\$ 5.556,09

Fonte: Do autor

Como o projeto após a instalação do sistema de exaustão não irá gerar um novo produto, ou não agrega valor ao produto final, não é possível fazer uma análise de viabilidade econômica. Isso se deve ao fato de ser uma adequação de funcionamento do processo. Então não há um parâmetro para embasamento sobre o retorno financeiro da sua implementação. Entretanto o projeto pode ser enviado à empresa fabricante do torrador juntamente de um plano de negócio para que a empresa estudasse a viabilidade de implementação em larga escala, uma vez que a fabricação em maior escala reduziria os custos.

Como a montagem proposta inicialmente para o projeto atendeu todas as condições necessárias para validação do projeto, pode então ser apresentado o detalhamento de equipamentos de calderaria e usinagem, que se encontram anexadas no final do trabalho. Todos os tubos e chapas possuem uma espessura de 2 mm. A chaminé não foi detalhada por se tratar de um tubo que será utilizado com a configuração de compra, com o diâmetro de 114,3 milímetros e 6 metros de altura.

## **6 Conclusão**

Após realizadas todas as análises aplicadas no decorrer do presente trabalho pode ser concluído que o trabalho cumpriu com todos os objetivos propostos. Com a aplicação do sistema de VLE a torrefação de café não sofrerá mais com as constantes reclamações dos vizinhos pela fumaça que se espalhava pelo galpão de operação e nos recintos próximos. Não será necessária a varreção constante da indústria uma vez que a fuligem será depositada em um só ponto. E o mais importante, a fumaça que anteriormente era toda inalada pelo operador será jogada no ambiente a uma altura que não atingirá nenhuma residência nos arredores.

O custo da implementação do sistema não é tão alto uma vez que pode solucionar um problema muito grande, podendo até comprometer vidas.

Como mencionado anteriormente, o projeto pode ser levado como proposta em um plano de negócios à empresa fabricante do torrador, ou a alguma empresa que tenha o interesse de produzir em uma escala maior, fazendo assim com que os custos de produção do sistema reduzam e atraia mais clientes.

## Referências Bibliográficas

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Instalações centrais de ar-condicionado para conforto – Parâmetros básicos de projeto. Disponível em: <https://www.refrigeracao.net/Legislacao/NBR6401.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2021

BAILEY, Rachel L. Respiratory Morbidity in a Coffee Processing Workplace With Sentinel Obliterative Bronchiolitis Cases. *American Journal of Industrial Medicine*. 58: 1235-1245 (2015)

BRITO, Lúcio. Tuberculose nosocomial medidas de controle de engenharia. **Bol. Pneumol. Sanit.**, Rio de Janeiro , v. 9, n. 2, p. 33-50, dez. 2001

CAMORMAQ, Exceptional Roasters – Torrador Tradicional. Disponível em : <https://www.carmomaq.com.br/produtos/torrador-tradicional/>. Acesso em 20 fev. 2021

CLEZAR, C. A.; NOGUEIRA, A. C. R. **Ventilação Industrial** . 1ª Ed.. Florianópolis: Editora da UFSC, 1999.

HEALTH AND SAFETY AUTHORITY. **Local Exhaust Ventilation (LEV) Guidance**. Published in January 2014

HOWARD D. GOODFELLOW & JAMES W. SMITH (1982) Industrial ventilation — a review and update, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 43:3, 175-184, DOI: 10.1080/15298668291409578

HUSSIN, Norasikin Binti. Improving indoor air quality using local exhaust ventilation (LEV). *Jurnal Teknologi* . 2015 DOI: 10.11113/jt.v76.5665

LEBOUF, Ryan F. Exposures and Emissions in Coffee Roasting Facilities and Cafés: Diacetyl, 2,3-Pentanedione, and Other Volatile Organic Compounds. Original Research. 10.3389/pubh.2020.561740. Published: 18 September 2020

LIED, EDUARDO. (2011). Dimensionamento de sistema de ventilação local exaustora (VLE): estudo de caso de uma indústria de móveis, em Sta Terezinha de Itaipu, PR, Brasil. *Estudos Tecnológicos em Engenharia*. 7. 1-11. 10.4013/ete.2011.71.01.

MACINTYRE, A. J. **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**. 2ª Ed.. Rio de Janeiro: LTC, 1990.0

MICHAEL R. Flynn, Pam Susi, Local Exhaust Ventilation for the Control of Welding Fumes in the Construction Industry - A Literature Review, *The Annals of Occupational Hygiene*, Volume 56, Issue 7, August 2012, Pages 764-776, <https://doi.org/10.1093/annhyg/mes018>

MORTEZA, MORTEZAVI MEHRIZI, et al. "Projeto, construção, avaliação e eficiência da ventilação de exaustão local no controle de poeira e partículas de sílica cristalina e formaldeído em uma fábrica de fundição." *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, vol. 64, nº 1, 2013, pp. 123-130. <https://doi.org/10.2478/10004-1254-64-2013-2196>. Acessado em 1 de junho de 2021

NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY HEALTH (NIOSH). Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Diacetyl 2,3-Pentanedione. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 2016-111 (2016). Available online at: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2016-111/>. Acessado em 01 de junho de 2021

REPOSITÓRIO UFLA, Manual de normalização e estrutura de trabalhos acadêmicos: TCCs, monografias, dissertações e teses. 3. ed. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/41282>. Acesso em: 01 junho 2021

SABER SST. Ventilação Local Exaustora: Quando Usar e Como Não Errar. Disponível em: [https://www.sabersst.com.br/ventilacao\\_industrial/](https://www.sabersst.com.br/ventilacao_industrial/). Acessado em 27/12/2020

STATISTA, Business Data Platform – Consumo de café em todo o mundo de 2012/13 a 2020/21. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/292595/global-coffee-consumption/#statisticContainer>. Acesso em: 21 maio 2021

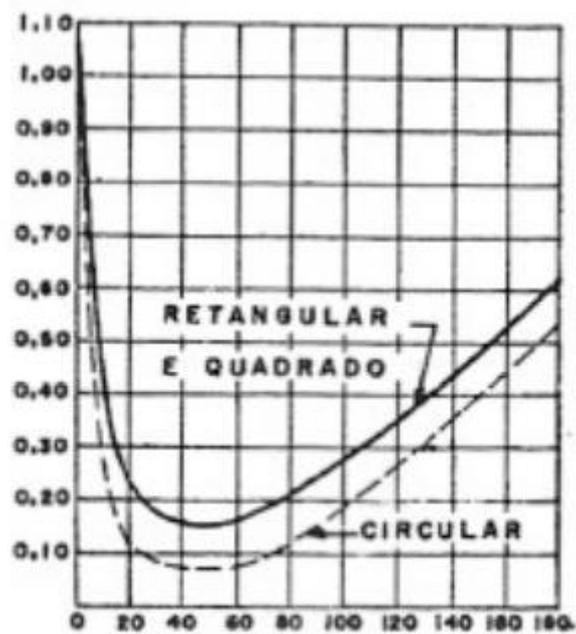
SI HARUN et al 2017 IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng. 238 012013

VENTISILVA, Líder em ventilação industrial e residencial – Exaustor Monofásico EC1 MAR. Disponível em : <https://www.ventisilva.com.br/exaustor-monofasico-ec1-mar-84p?xuf=MG>. Acesso em : 22 fev. 2021

WHITE, F.M. Mecânica dos fluidos. 8ª Ed.: AMGH editora LTDA, 2018.

**YOUHONG LU. A Novel Indoor Air Quality Standards and Design Methods in Environmental Assessment.** Conference Series. 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1549 022083

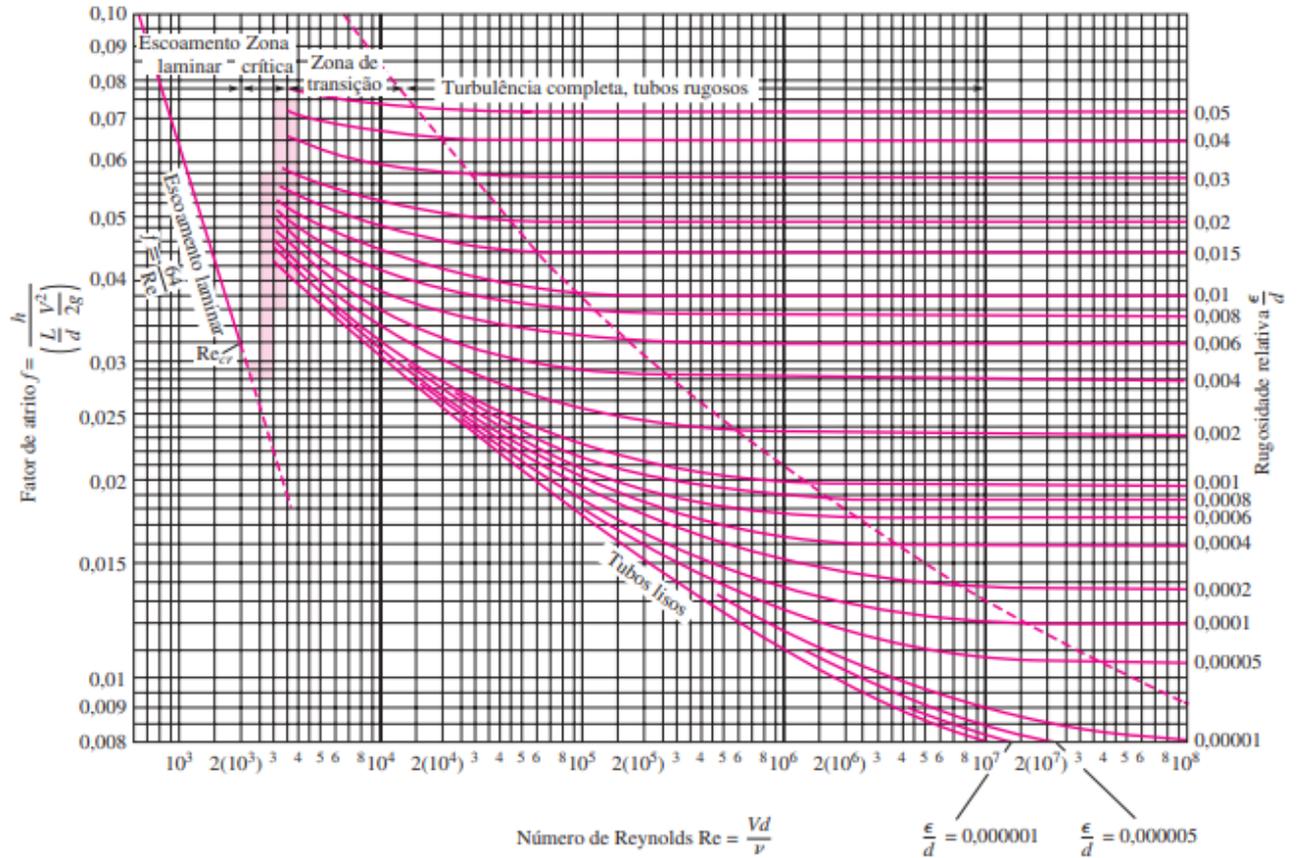
## ANEXO I



## ANEXO II

Designação	Recomendadas (m/s)			Máximas (m/s)		
	Residências	Escolas, teatros e edifícios públicos	Prédios industriais	Residências	Escolas, teatros e edifícios públicos	Prédios industriais
Tanadas de ar exterior	2,50	2,50	2,50	4,00	4,50	6,00
Serpentinas — resfriamento	2,25	2,50	3,00	2,25	2,50	3,60
— aquecimento	2,25	2,50	3,00	2,50	3,00	7,50
Lavadores de ar — borrifador	2,50	2,50	2,50	3,50	3,50	3,50
— alta velocidade	—	—	9,00	—	—	9,00
Descarga do ventilador mín	5,00	6,50	8,00	—	—	—
máx	8,00	10,00	12,00	8,50	11,00	14,00
Dutos principais mín	3,50	5,00	6,00	—	—	—
máx	4,50	6,50	9,00	6,00	8,00	10,00
Ramais horizontais mín	—	3,00	4,00	—	—	—
máx	3,00	4,50	5,00	5,00	6,50	9,00
Ramais verticais mín	—	3,00	—	—	—	—
máx	2,50	3,50	4,00	4,00	6,00	8,00

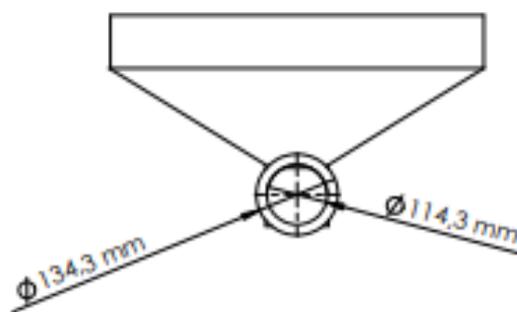
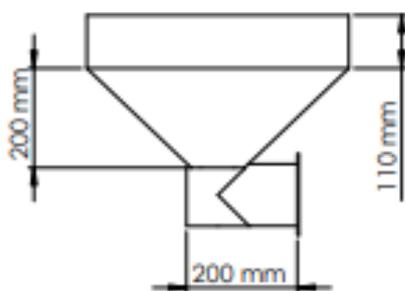
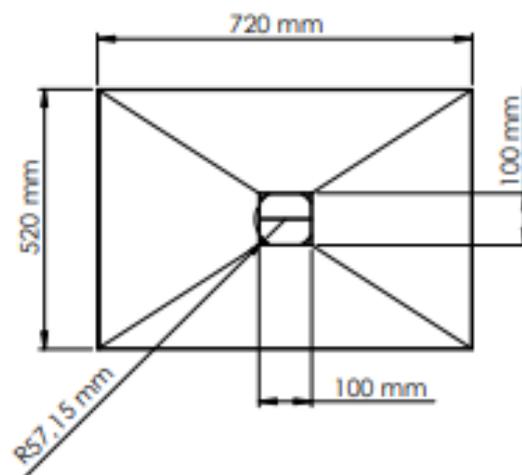
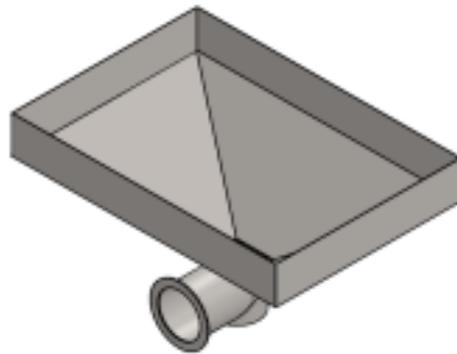
ANEXO III



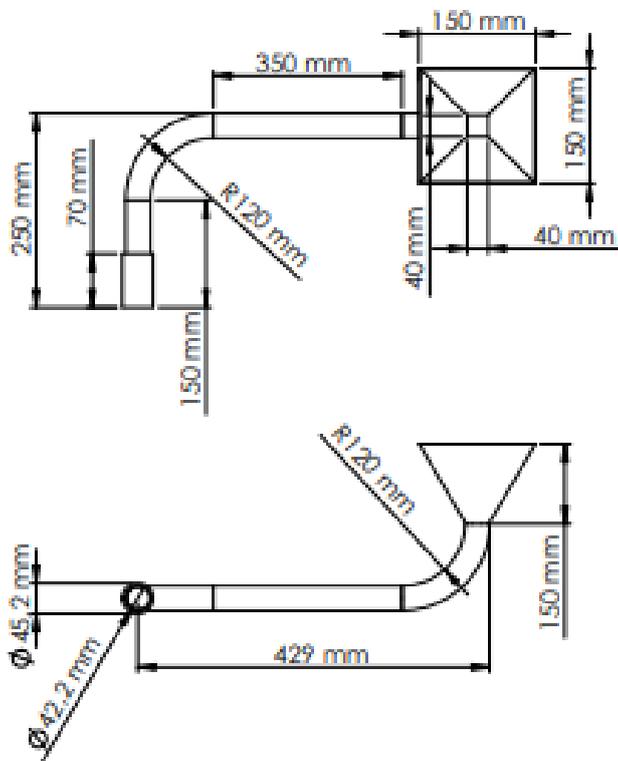
ANEXO IV

<i>Ciclone padrão A</i>							
Dimensão	<i>d</i>	<i>h</i>	<i>l</i>	<i>s</i>	<i>d<sub>d</sub></i>	<i>L</i>	<i>L'</i>
Fator multiplicativo do diâmetro <i>d</i>	1	0,5	0,2	0,5	0,5	1,5	2,5
<i>Ciclone padrão B</i>							
Dimensão	<i>d</i>	<i>h</i>	<i>l</i>	<i>s</i>	<i>d<sub>d</sub></i>	<i>L</i>	<i>L'</i>
Fator multiplicativo do diâmetro <i>d</i>	1	0,75	0,375	0,875	0,75	1,5	2,5

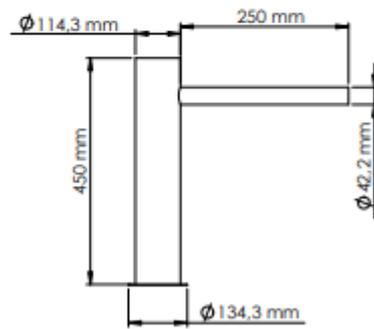
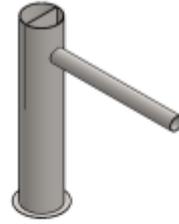
## ANEXO V



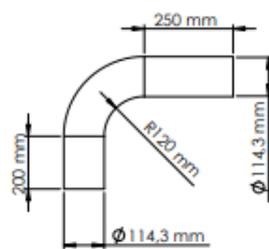
## ANEXO VI



## ANEXO VII



## ANEXO VIII



## ANEXO IX

## Exaustor Monofásico EC1 MAR

Em 5 X R\$ 744,22 no cartão\*

Ou R\$ 3.721,09 à vista

Preços válidos exclusivamente para entregas no estado de Minas Gerais. Para entregas nos estados AL, AP, MG, MS, PR, RJ e RS haverá incidência de ST sobre o valor dos produtos.



1 item

 **Comprar**Entrega em até **60 dias úteis**

O prazo de entrega pode variar de acordo com seu CEP.

Calcular frete e prazo de entrega desse produto:

CEP de entrega

**Calcular o Frete**[Características Técnicas](#)