

Centro Paula Souza
ETEC Paulino Botelho
Curso Técnico em Mecânica

Leonardo Pedro
Nedir Antonio Castelani Neto
Pedro Amorim Zago Cavichioli
Rafael Aiello

EXAUSTOR DE SOLDA

SÃO CARLOS

2026

Leonardo Pedro

Nedir Antonio Castelani Neto

Pedro Amorim Zago Cavichioli

Rafael Aiello

EXAUSTOR DE SOLDA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Técnico em Mecânica da Etec Paulino Botelho, orientado pelo Prof. Luiz Schiavone Neto, como requisito parcial para a obtenção do título de Técnico em Mecânica.

SÃO CARLOS

2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço a “Deus” e a natureza pelo dom da vida e pela sabedoria proporcionada por todo esse trajeto.

Agradeço a todos os professores que com paciência e dedicação, lecionaram e compartilharam todo o conhecimento possível. Em especial, agradeço aos Professores, Frederico Jurgensen Junior, Claudio Torres Goncalves, Fabio Kiei Nakazone, Celso Hiroshi Tamashiro e Luiz Schiavone Neto.

E a todos que de alguma forma, ajudaram na realização deste projeto.

“Nunca existiu uma grande inteligência sem uma veia de loucura”.

Aristóteles

EXAUSTOR PARA AMBIENTE DE SOLDAGEM

RESUMO

O trabalho apresenta a concepção, restauração e a aplicação de um sistema de exaustão de gases para a sala de soldagem da Etec Paulino Botelho, com a finalidade de garantir condições adequadas de saúde e segurança durante as atividades práticas. O objetivo consiste em analisar os riscos da exposição aos fumos e gases da soldagem e propor uma solução eficiente e viável para sua mitigação. A metodologia emprega levantamento bibliográfico sobre normas de segurança, estudo comparativo de modelos de exaustores e aplicação prática em oficina escolar. Os resultados demonstram que o uso do exaustor melhora significativamente a qualidade do ar, reduzindo impactos nocivos à saúde e aumentando a produtividade dos alunos. A discussão evidencia a importância da integração entre infraestrutura adequada e práticas pedagógicas, ressaltando que a adoção de medidas de segurança fortalece a formação técnica e promove conscientização ambiental e ocupacional. As considerações finais apontam que o projeto contribui para a modernização dos espaços de aprendizagem e pode servir de referência para futuras iniciativas em escolas técnicas.

Palavras-chave: Soldagem. Exaustor. Saúde ocupacional. Educação técnica. Segurança. Restauração

EXHAUST SYSTEM FOR WELDING ENVIRONMENT

ABSTRACT

The study presents the design and implementation of an exhaust system for the welding room at Etec Paulino Botelho, with the purpose of ensuring appropriate health and safety conditions during practical activities. The objective is to analyse the risks of exposure to welding fumes and gases and to propose an efficient and feasible solution for their mitigation. The methodology involves a bibliographic survey of safety standards, a comparative study of exhaust models, and practical application in a school workshop. The results show that the use of the exhaust system significantly improves air quality, reducing harmful impacts on health and increasing student productivity. The discussion highlights the importance of integrating adequate infrastructure with pedagogical practices, emphasising that the adoption of safety measures strengthens technical training and promotes environmental and occupational awareness. The final considerations indicate that the project contributes to the modernisation of learning spaces and may serve as a reference for future initiatives in technical schools.

Keywords: Welding. Exhaust system. Occupational health. Technical education. Safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	15
Figura 2 -	16
Figura 3 -	17
Figura 4 -	18
Figura 5 -	31
Figura 6 -	32
Figura 7 -	36
Figura 8 -	36
Figura 9 -	38
Figura 10 -	39
Figura 11 -	40
Figura 12 -	41
Figura 13 -	42
Figura 14 -	43
Figura 15 -	44
Figura 16 -	45
Figura 17 -	46
Figura 18 -	47
Figura 19 -	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-.....	52
Tabela 2-.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS

- **ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- **ACGIH** – *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (Conferência Americana de Higienistas Industriais Governamentais)
- **ETEC** – Escola Técnica Estadual
- **GMAW** – *Gas Metal Arc Welding* (Soldagem a Arco de Gás Metal – Processo MIG/MAG)
- **GTAW** – *Gas Tungsten Arc Welding* (Soldagem a Arco de Gás Tungstênio – Processo TIG)
- **MAG** – *Metal Active Gas* (Soldagem com Gás Ativo)
- **MIG** – *Metal Inert Gas* (Soldagem com Gás Inerte)
- **NR-15** – Norma Regulamentadora n.º 15 (Atividades e Operações Insalubres)
- **PVC** – Policloreto de Vinila
- **SMAW** – *Shielded Metal Arc Welding* (Soldagem a Arco Metal Escudado – Eletrodo Revestido)
- **VLE** – Ventilação Local Exaustora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Contextualização e Problema.....	11
1.2 Objetivos.....	12
1.3 Justificativa.....	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1 Dinâmica dos Fumos de Soldagem e Riscos Ocupacionais.....	18
2.2 Parâmetros Legais e Normas Técnicas.....	21
2.3 Engenharia de Ventilação Industrial.....	22
2.3.1 Conceitos Básicos.....	22
2.3.2 Exaustores Axiais.....	22
2.3.3 Exaustores Centrífugos.....	22
2.3.4 Exaustão em Ambientes de Soldagem.....	23
2.4 Ventilação Local Exaustora (VLE).....	23
3 METODOLOGIA.....	24
3.1 Classificação da Pesquisa.....	24
3.2 Critérios Técnicos para Adequação do Sistema.....	25
3.2.1 Base de Cálculos do Projeto.....	26
3.3 Procedimentos de Execução.....	29
4 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA.....	29
4.1 Diagnóstico da Infraestrutura da Oficina e Projeto.....	30
4.2 Levantamento Dimensional.....	31
4.2.1 Resultados do Dimensionamento.....	33
4.3 Especificação e Seleção dos Componentes.....	34
4.3.1 Motor, Fiação e Proteção Elétrica.....	34
4.3.2 Estrutura Metálica da mesa.....	37
4.3.3 Conexões dos Dutos às Mesas.....	38
4.4 Recuperação das Mesas Exaustoras.....	43
4.5 Instalação da Rede de Exaustão.....	45
4.6 Adaptação da Janela para Descarga Externa.....	48
4.7 Testes Operacionais.....	49
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E IMPACTOS.....	50

5.1 Desempenho do Sistema de Exaustão.....	50
5.2 Impacto nas Condições Ambientais da Oficina.....	51
5.3 Viabilidade Econômica e Possibilidade de Replicação.....	52
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
6.1 Conclusões.....	53
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	54
REFERÊNCIAS.....	54
APÊNDICE A - Memorial de Cálculo do Sistema de Ventilação	
Local Exaustora.....	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Problema

O processo de soldagem industrial desempenha um papel fundamental no desenvolvimento tecnológico e na manutenção mecânica contemporânea. Seja através da soldagem por Eletrodo Revestido (SMAW), MIG/MAG (GMAW) ou TIG (GTAW), a união de materiais metálicos é indispensável para a fabricação de estruturas, reparos de maquinários e prototipagem de projetos de engenharia. Contudo, a execução dessas atividades em ambientes fechados ou laboratoriais impõe desafios severos no que tange à segurança do trabalho e à integridade física dos operadores. Durante a abertura do arco elétrico e a consequente fusão dos metais e insumos, ocorre a liberação inevitável de subprodutos gasosos e particulados suspensos, conhecidos tecnicamente como fumos de soldagem. A composição físico-química desses fumos varia de acordo com o método empregado: enquanto o eletrodo revestido gera uma alta densidade de óxidos metálicos visíveis devido à queima do revestimento, processos como o TIG, embora aparentemente limpos a olho nu, produzem gases invisíveis altamente nocivos, como o Ozônio e óxidos de nitrogênio, decorrentes da reação da radiação ultravioleta com o oxigênio atmosférico. A exposição contínua e sem a devida proteção a esses agentes químicos está diretamente associada a quadros de intoxicação aguda e crônica. No curto prazo, a inalação desses vapores manifesta-se por meio de cefaleias, tonturas, náuseas e irritação imediata das vias aéreas superiores — episódios frequentemente observados em ambientes educacionais onde a taxa de renovação de ar é deficiente. Sob a ótica da higiene ocupacional, tais intercorrências evidenciam que a ventilação natural diluidora é insuficiente para garantir a salubridade em postos de soldagem. No contexto brasileiro, a segurança e a salubridade nos ambientes de trabalho são regulamentadas por parâmetros estritos. A Norma Regulamentadora 15 (NR-15) do Ministério do Trabalho e Emprego estipula os limites de tolerância para a exposição a agentes químicos. Quando as concentrações de poeiras e fumos metálicos na zona respiratória do operador ultrapassam os limites legais estabelecidos pelo Anexo n.º 11 da referida norma, o ambiente é tecnicamente classificado como insalubre.

Complementarmente, devido à necessidade de maior rigor preventivo em componentes de alta toxicidade — como o Manganês e o Cromo Hexavalente —, adotam-se as diretrizes internacionais da ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists), as quais determinam limites de exposição ainda mais restritivos para frações respiráveis de contaminantes. A superação desses limites em ambientes de aprendizado prático gera impactos diretos no rendimento pedagógico e na integridade dos estudantes. A ausência de mecanismos de engenharia voltados ao controle coletivo de contaminantes atmosféricos expõe o corpo discente e docente a riscos evitáveis. Torna-se, portanto, imperativo aplicar soluções de engenharia de ventilação capazes de interceptar e capturar os poluentes gasosos antes que eles atinjam a zona de respiração dos usuários, mitigando os riscos ocupacionais crônicos e agudos associados à atividade metalmecânica.

1.2 Objetivos

Desta forma, o trabalho estabiliza como objetivo geral a reativação e o completamento mecânico das mesas exaustoras do laboratório através do dimensionamento, confecção e montagem de uma rede de dutos fluidodinamicamente eficiente. Como objetivos específicos, busca-se analisar as variáveis operacionais dos processos de soldagem locais, avaliar os parâmetros normativos de proteção à saúde e implementar uma solução de baixo custo e alta replicabilidade institucional, promovendo um ambiente de ensino seguro, salubre e condizente com as demandas da indústria moderna.

1.3 Justificativa

Diante desse panorama, o presente Trabalho de Conclusão de Curso encontra sua justificativa e relevância prática na necessidade de readequação ambiental do laboratório de soldagem da Etec Paulino Botelho. O diagnóstico inicial da oficina revelou um cenário de ociosidade de infraestrutura: bancadas de solda equipadas com

sistemas motorizados funcionais, porém inoperantes devido à ausência completa de uma rede de tubulação e exaustão que direcionasse os poluentes para o meio externo. Para solucionar essa problemática sem demandar reformas estruturais onerosas na edificação escolar, este projeto propõe o desenvolvimento e a instalação de um sistema de Ventilação Local Exaustora (VLE). A engenharia do sistema baseia-se na captação dos poluentes diretamente na fonte geradora, conduzindo-os por meio de dutos dimensionados até a fachada da sala. A inovação prática do projeto consiste no aproveitamento de um vão de janela preexistente, onde o vidro avariado será substituído por uma vedação planejada em placas de acrílico, garantindo a estanqueidade do ambiente, o suporte mecânico da tubulação de PVC de 4 polegadas e a exaustão segura dos gases para a atmosfera externa.

A fim de apresentar de forma clara e ordenada o desenvolvimento desta pesquisa, o presente trabalho encontra-se estruturado em capítulos subsequentes. O capítulo dois aborda a fundamentação teórica, detalhando o histórico da soldagem, as características dos principais processos utilizados na atualidade e o detalhamento técnico dos riscos ocupacionais e parâmetros fluidodinâmicos. Por fim, o capítulo três dedica-se à descrição da montagem mecânica do protótipo, apresentação dos resultados obtidos em testes práticos e às considerações finais sobre a viabilidade e impacto da aplicação do sistema na instituição.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

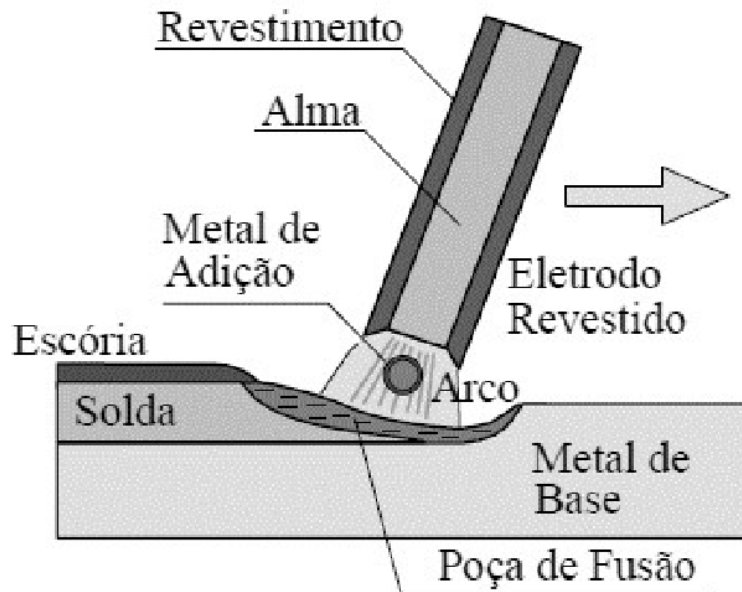
A soldagem constitui um dos métodos de união de materiais mais antigos da humanidade, com evidências de soldagem forjada em bronze datadas de aproximadamente 3000 a.C. Apesar da constante evolução tecnológica e metalúrgica, esse processo mantém sua relevância industrial e apresenta-se como o elemento central das atividades práticas analisadas neste trabalho. Para a devida compreensão dos riscos ocupacionais associados, faz-se necessária uma breve contextualização histórica e a definição dos principais processos empregados na atualidade.

Historicamente, a união de metais iniciou-se de forma rudimentar na Era do Bronze por meio da soldagem por forjamento, técnica que consistia no aquecimento e martelamento das peças. Esse método evoluiu ao longo dos séculos até que, em 1801, o cientista inglês Sir Humphry Davy descobriu o arco elétrico. Embora o processo tenha sido demonstrado publicamente em 1808, a tecnologia demandou quase um século para se tornar viável à indústria, devido à escassez de equipamentos adequados à época. O ganho de escala ocorreu durante a Primeira Guerra Mundial, impulsionado pela necessidade de reparos rápidos em maquinários militares. Superada a resistência comercial do pós-guerra, a soldagem revolucionou a manufatura global. Sua aplicação permitiu a criação de estruturas mais leves e seguras no setor aeroespacial, a união de ligas de alta resistência na construção civil e infraestrutura ferroviária, além da garantia de estanqueidade em tubulações pressurizadas no setor energético.

Atualmente, a indústria e as oficinas educacionais valem-se de diferentes variações desse método, cada qual com características operacionais específicas:

- **Soldagem por eletrodo revestido (SMAW - *Shielded Metal Arc Welding*):**
Processo a arco onde a coalescência dos metais é obtida por meio de um arco elétrico que flui entre a ponta de um eletrodo revestido e a superfície do metal de base, gerando altas temperaturas. O eletrodo é composto por uma vareta metálica que atua como metal de adição e um revestimento que, ao sofrer pirólise, gera uma barreira gasosa e uma camada de escória para proteger a poça de fusão da contaminação atmosférica durante a solidificação.

Figura 1 – Soldagem eletrodo revestido

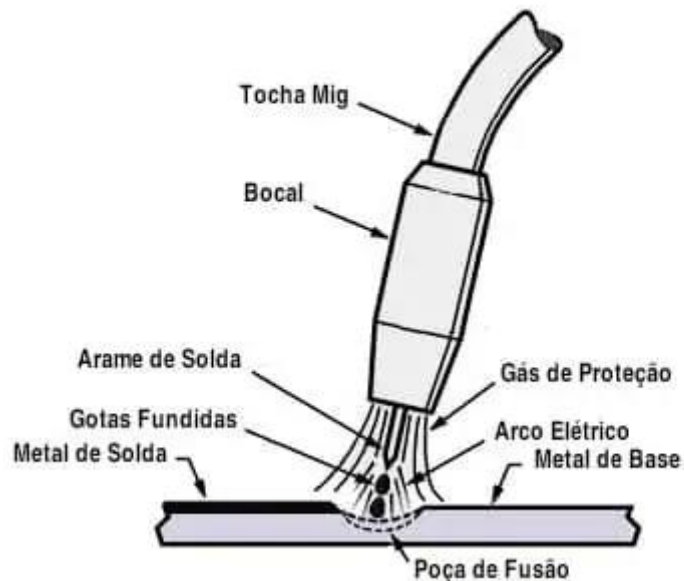


Fonte: (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

- **Soldagem MIG/MAG (GMAW - Gas Metal Arc Welding):** Técnica de união por fusão onde o arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo contínuo (arame) e o metal de base. No processo MIG (*Metal Inert Gas*), utiliza-se um gás inerte, como argônio ou hélio, para proteger o arco e a poça de fusão contra a oxidação. No processo MAG (*Metal Active Gas*), emprega-se um gás ativo, como o dióxido de carbono (CO_2) ou misturas gasosas, para desempenhar a função de proteção e estabilização do arco.

Figura 2 – Soldagem MIG/MAG

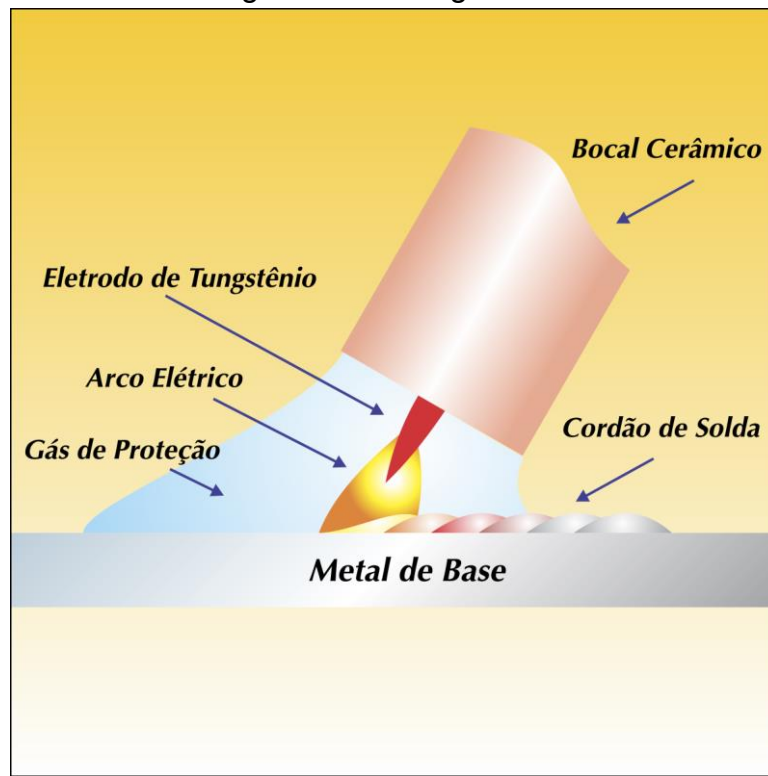
SOLDA MIG



Fonte: Delarco Soldas.

- **Soldagem TIG (GTAW - Gas Tungsten Arc Welding):** Diferente dos processos consumíveis, o arco elétrico na TIG é estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça de trabalho. O eletrodo atua exclusivamente como condutor de calor, enquanto o material de adição (vareta), quando necessário, é inserido manualmente na poça de fusão. O processo ocorre sob uma atmosfera de gás inerte (geralmente argônio puro ou misturas com hélio) que flui através do bocal da tocha.

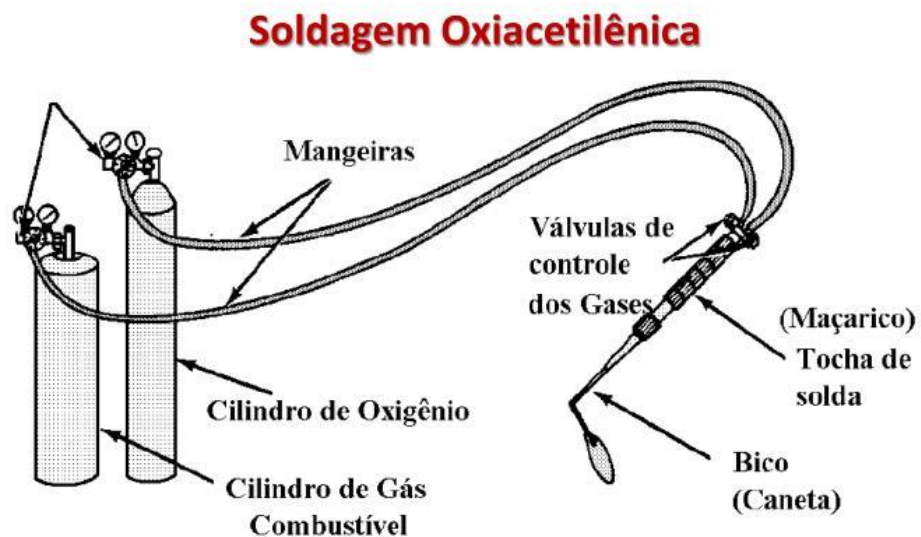
Figura 3 – Soldagem TIG



Fonte: Retoedu.

- **Soldagem Oxiacetilênica:** Processo de fusão que utiliza a queima de uma mistura de dois gases — oxigênio (comburente) e acetileno (combustível) — para gerar uma chama de altíssima temperatura, alcançando aproximadamente 3000 °C. Distingue-se dos processos elétricos por depender exclusivamente de uma reação química exotérmica para fundir o metal de base e o material de adição.

Figura 4 – Soldagem Oxiacetilênica



Montagem padrão para soldagem Oxiacetilênica

Fonte: apostila de soldagem oxiacetilênica UFTPR

Fonte: SlideServe.

Independentemente do processo tecnológico escolhido para a união dos metais, a geração de altas temperaturas e a fusão dos insumos acarretam um efeito colateral inevitável: a emissão de subprodutos gasosos e particulados. É a compreensão da natureza física e química dessas emissões que fundamenta a necessidade de sistemas de exaustão adequados, conforme detalhado a seguir.

2.1 Dinâmica dos Fumos de Soldagem e Riscos Ocupacionais

O ambiente de manufatura metalmecânica exige um entendimento rigoroso das transformações físico-químicas que ocorrem durante a união de materiais metálicos. Os Riscos da solda, em geral, incluem, inalação de fumos e gases prejudiciais,

radiação não ionizante, calor extremo, cegueira, queimaduras e ruído. Como o tema de nosso projeto se aplica a gases e fumos, daremos maior notoriedade a tal assunto.

A geração de contaminantes atmosféricos na soldagem tem início com a abertura do arco elétrico, que atinge temperaturas localizadas na ordem de 3000C°. Essa temperatura excede o ponto de ebulição dos metais envolvidos, desencadeando dois fenômenos simultâneos:

Vaporização Metálica: Na **poça de fusão** (região onde o metal de base e o metal de adição encontram-se no estado líquido), a alta temperatura faz com que partes dos elementos de liga sofram volatilização instantânea. Esses vapores metálicos ascendem rapidamente a partir da zona de poça de fusão.

Pirólise e Queima do Revestimento/Gases: Nos processos que utilizam eletrodos revestidos (SMAW), o calor do arco provoca a decomposição térmica (pirólise) dos compostos fluxantes do revestimento (como carbonatos, silicatos e celulose). Essa queima projeta uma barreira gasosa protetora, mas também gera uma quantidade massiva de subprodutos sólidos e gasosos. Em processos com proteção gasosa externa (como MIG/MAG), a ionização e a dissociação dos gases de proteção sob o arco também geram reações secundárias com o oxigênio atmosférico circundante.

Ao deixarem a zona do arco, esses vapores térmicos superaquecidos entram em contato com a massa de ar ambiente, que se encontra a uma temperatura drasticamente menor. Essa diferença térmica força uma **condensação imediata** seguida de **oxidação**, transformando o gás em micropartículas sólidas conhecidas como **fumos metálicos**.

A composição dos fumos provenientes da soldagem não constitui fumaça convencional, como a da combustão de carbono, mas sim uma complexa nuvem, composta por **partículas finas e ultrafinas de óxidos metálicos**.

A composição química desses particulados é um reflexo direto da metalurgia do consumível e do metal de base:

- **Óxidos de Ferro (Fe_2O_3 , Fe_3O_4):** Constituem a matriz principal e linha de frente dos fumos na soldagem de aços carbono. Eles resultam da oxidação

imediate do ferro volatilizado pelo arco elétrico em contato com o oxigênio atmosférico.

- **Dióxido de Manganês (MnO_2):** Elemento presente na grande maioria dos aços e nos consumíveis de adição para conferir tenacidade à junta soldada. Apesar de surgir em menor proporção que o ferro, possui um elevado potencial de neurotoxicidade ocupacional, podendo afetar o sistema nervoso central do operador em caso de exposição prolongada sem a exaustão adequada.
- **Óxidos de Alumínio (Al_2O_3):** Gerados de forma expressiva durante a soldagem de ligas de alumínio (especialmente através dos processos MIG e TIG operados no laboratório). A vaporização do metal de base e do fio ou vareta de adição produz um particulado denso que atua como um forte agente irritante para as membranas mucosas e trato respiratório superior. A sua deposição contínua está associada ao risco de desenvolvimento de patologias pulmonares crônicas (como a aluminose) e episódios agudos de febre dos fumos metálicos

A granulometria dessas partículas é majoritariamente **respirável**, situando-se em dimensões inferiores a microns metro (entre 0,01 μm e 1 μm). Devido a esse diâmetro reduzido, o particulado possui a capacidade de contornar os sistemas de filtragem natural das vias respiratórias superior humana, atingindo diretamente a região alveolar.

Devido ao efeito da ausência de circulação de ar, a dispersão e a permanência desses contaminantes no espaço físico da oficina são regidas por princípios de termodinâmica e mecânica dos fluidos. O calor gerado pelo arco elétrico cria uma corrente de convecção ascendente. Os fumos metálicos pegam carona nessa coluna de ar quente, subindo em direção à zona de respiração do operador. Contudo, devido à escala nanométrica das partículas, a força gravitacional exercida sobre elas é desprezível às forças de arrasto do ar. Isso significa que os óxidos metálicos possuem uma velocidade de sedimentação extremamente lenta, comportando-se de forma estável em suspensão no ar.

Em um ambiente de baixa circulação de ar ou ausência de sistemas de exaustão, a taxa de renovação do volume de ar do ambiente é insuficiente para

dispersar o contaminante. expondo não apenas o soldador, mas toda a zona operacional da oficina.

2.2 Parâmetros Legais e Normas Técnicas

O dimensionamento eficaz de um sistema de exaustão localizada para soldagem requer a análise rigorosa entre os limites de tolerância biológica e as variáveis fluidodinâmicas do escoamento do ar. A engenharia de ventilação industrial baseia-se em parâmetros normativos para garantir que os contaminantes sejam capturados antes de atingirem a zona respiratória do operador. No Brasil, a regulamentação dos limites de tolerância para agentes químicos no ambiente de trabalho é regida pelo **Anexo n.º 11 da Norma Regulamentadora 15 (NR-15) (Brasil, 1978)**. No entanto, devido à defasagem histórica de alguns valores locais, a legislação nacional determina que, na ausência de parâmetros específicos ou para maior rigor preventivo, utilizam-se as diretrizes da **ACGIH** (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*).

As normas estabelecem o Limite de Exposição Ocupacional, que estipula a concentração máxima permitida para uma jornada padrão de 8 horas diárias:

- **Manganês (Fumos):** A ACGIH adota um limite rigoroso de $0,02\text{mg}/\text{m}^3$ (fração respirável), devido aos seus efeitos neurotóxicos.
- **Cromo Hexavalente CrVI):** Elemento crítico na soldagem de aço inox, com limite em $0,0002\text{mg}/\text{m}^3$ pela ACGIH, dada a sua classificação como carcinogênico confirmado.

Fumos de Ferro Totais: A NR-15 estabelece um limite de $5\text{ mg}/\text{m}^3$ para poeiras incômodas ou fumos de ferro gerais.

2.3 Engenharia de Ventilação Industrial

2.3.1 Conceitos Básicos

Um exaustor é um dispositivo mecânico projetado especificamente para realizar a sucção, remoção e troca de ar, gases, fumaça ou vapores entre dois ambientes distintos. Na grande maioria dos casos, ele é impulsionado por um motor elétrico acoplado a uma hélice ou ventoinha.

A principal função das pás dessa hélice é girar para gerar um fluxo direcionado de ar, puxando os contaminantes ou o ar quente de um local e empurrando-os para fora. Na indústria e em oficinas mecânicas, os exaustores são classificados de duas maneiras principais: pelo formato da hélice (aerodinâmica) e pelo tipo de instalação.

Os principais exaustores utilizados, dentre outros, são divididos conforme as características de seus rotores e hélices.

2.3.2 Exaustores Axiais

Axial: As pás giram em torno do próprio eixo do motor, fazendo com que o ar seja empurrado em linha reta (no sentido longitudinal ao eixo). É o modelo mais comum em ventiladores domésticos e radiadores, destacando-se por movimentar grandes volumes de ar (alta vazão), embora não tenha muita força para empurrar o ar por tubos muito longos.

2.3.3 Exaustores Centrífugos

Centrífugo: Possui um rotor com palhetas disposto dentro de uma carcaça que lembra o formato de um caracol. O ar entra pelo centro de giro e é jogado para as extremidades das pás pela força centrífuga, saindo de forma perpendicular. Esse sistema gera alta velocidade e grande pressão estática, sendo o modelo ideal para sistemas que utilizam dutos e tubulações compridas.

2.3.4 Exaustão em Ambientes de Soldagem

Os exaustores também podem ser definidos pelo modelo e tipo de instalação aplicados ao ambiente prático:

- **Exaustor de Mesa:** É integrado ou posicionado diretamente sobre a bancada de trabalho do operador. Possui aberturas ou grades onde ocorre a sucção, puxando os gases e fumos diretamente para baixo ou para trás, evitando que poluentes subam até o rosto do trabalhador.
- **Exaustor Portátil:** Montado em uma estrutura móvel e leve, geralmente equipada com dutos flexíveis que podem ser posicionados exatamente onde o trabalho está acontecendo. É muito utilizado para alcançar locais de difícil acesso, como o interior de tanques ou porões.
- **Exaustor Fixo com Coifa:** Uma estrutura robusta e permanente instalada acima da área de trabalho. A coifa capta os gases ascendentes e os direciona para a tubulação de descarte.

Em resumo, o exaustor funciona como um sistema de segurança essencial para a saúde ocupacional do soldador, garantindo a renovação do ar e mantendo os ambientes de trabalho limpos e seguros.

2.4 Ventilação Local Exaustora (VLE)

A Ventilação Local Exaustora (VLE) é uma medida de engenharia essencial na higiene ocupacional, projetada para capturar contaminantes — como poeiras, gases e vapores — diretamente na sua fonte de emissão. Ao contrário da ventilação geral, que apenas tenta diluir a poluição espalhada pelo ambiente, a VLE age de forma pontual. O objetivo é impedir que os agentes tóxicos cheguem à zona de respiração do trabalhador, o que a torna uma solução muito mais segura e eficiente.

O funcionamento físico de um sistema de VLE depende de quatro componentes básicos integrados:

- **Captor (ou coifa):** A porta de entrada do sistema, projetada para envolver a fonte ou direcionar a sucção do ar poluído.
- **Dutos:** A rede de tubulações que transporta o ar sujo. Eles devem manter uma velocidade interna alta o suficiente para que as partículas não caiam e entupam o caminho.
- **Filtro (Purificador):** Equipamento que limpa o ar, retendo o contaminante antes que ele seja jogado na atmosfera.
- **Ventilador (Exaustor):** É o componente que gera a força do sistema criando a pressão negativa responsável por puxar o ar através da coifa, dos dutos e dos filtros.

Para que tudo isso funcione na prática, o sistema precisa garantir a chamada "velocidade de captura". Trata-se da força de sucção mínima que o captor precisa ter para vencer as correntes de ar do ambiente e arrastar o poluente para dentro da tubulação.

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação da Pesquisa

Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo aplicado, experimental e descritivo, focado diretamente na engenharia de manutenção e melhoria de infraestrutura tecnológica voltada à segurança ocupacional. O trabalho define-se como pesquisa aplicada devido ao seu propósito de solucionar um problema real, prático e imediato: a insalubridade causada pelo acúmulo de fumos metálicos na sala de soldagem da Etec Paulino Botelho. O caráter experimental consolida-se através da intervenção física e braçal realizada nas instalações, englobando a limpeza pesada das bancadas, a reforma elétrica dos motores ociosos e a montagem física de uma rede de dutos comerciais. Por fim, a abordagem é descritiva ao documentar detalhadamente todas as variáveis operacionais observadas, as exigências normativas aplicáveis e as respostas visuais obtidas nos testes de fluxo de ar.

3.2 Critérios Técnicos e Limitações do Projeto

O desenvolvimento do sistema de exaustão obedeceu a critérios de engenharia prática adaptados às restrições severas do ambiente escolar público. O desenho da tubulação priorizou o menor percurso linear possível e a redução drástica no número de curvas de 90°, diminuindo a resistência interna ao fluxo para otimizar a capacidade de arrasto dos poluentes metálicos densos.

O projeto apresenta três limitações técnicas fundamentais que delimitaram a atuação do grupo:

Ausência de Documentação Original: Os exaustores e motores instalados no laboratório são equipamentos antigos e herdados de gestões anteriores, não possuindo placas de identificação legíveis, manuais técnicos ou as curvas características de vazão e pressão originais de fábrica.

Impossibilidade de Medições Instrumentadas: Devido à indisponibilidade momentânea de equipamentos de precisão calibrados na instituição como, manômetros de coluna de líquido ou tubos de Pitot, a validação da eficiência aerodinâmica do sistema não pôde ser quantificada em valores numéricos exatos de vazão ou perda de carga. Exceto pelo anemômetro simples que foi adquirido para a realização do projeto.

Foco na Recuperação de Infraestrutura Existente: O objetivo central concentrou-se estritamente no *retrofit* e na reabilitação funcional dos ativos ociosos. Como o prédio é uma estrutura pública estadual, reformas civis complexas (como quebrar vigas, pilares ou paredes de alvenaria estrutural para a passagem de dutos) eram completamente inviáveis devido a restrições orçamentárias e burocráticas. Por essa razão, adotou-se o critério de engenharia reversa para criar uma saída limpa e estanque aproveitando o vão de um vidro quebrado na janela da própria oficina, utilizando tubos rígidos comerciais de PVC de 4 polegadas pela sua leveza, imunidade à corrosão e facilidade de montagem mecânica sem necessidade de ferramentais pesados de caldeiraria.

3.2.1 Base de Cálculos do Projeto

Para projetar um sistema de exaustão, é necessário seguir uma sequência lógica de cálculos de engenharia de ventilação industrial, que têm por finalidade, determinar dimensões de dutos, a fim de gerar o fluxo mais eficiente do sistema. As fórmulas básicas são:

Vazão específica: Determina o valor do fluxo de ar em uma região específica qualquer do sistema, ela tende a se desviar do valor real da vazão, dado a fugas e vazamentos.

$$Q = V * A$$

$$Q = \text{Vazão em m}^3/\text{s}$$

$$V = \text{Velocidade em m/s}$$

$$A = \text{Área do duto em m}^2$$

Vazão média: Apresenta um valor mais próximo ao real, porque dá o valor médio entre o fluxo de entrada e o fluxo de saída.

$$Q = (V1 + V2) / 2 * A$$

$$V1 = \text{Velocidade de entrada}$$

$$V2 = \text{Velocidade de saída}$$

Pressão Dinâmica: A pressão dinâmica é a pressão exercida pelo ar em movimento, seu resultado será a força mínima que o exaustor precisa exercer para alcançar a velocidade de vento referida. Ela será a base para calcular as perdas de carga.

$$Pd = (\rho * V^2) / 2$$

Pd = Pressão dinâmica (Pa ou Pascal)

ρ = Massa específica (densidade) do ar (kg/m³) - *Aproximadamente 1,20kg/m³ ao nível do mar e a 20°C*

Perda de Carga (Delta P): A perda de carga é a resistência que o ar encontra ao longo do trajeto. Ela é dividida em duas partes: a perda nos trechos retos (distribuída) e a perda nas conexões (localizada).

A. Perda de Carga Distribuída (Trechos Retos)

Utiliza-se a equação de Darcy-Weisbach.

$$Pcd = f * (L / Dh) * Pd$$

Pcd = Perda de carga no trecho (Pa)

f = Fator de atrito de Darcy (adimensional) - *Obtido no Diagrama de Moody ou calculado via fórmulas empíricas (como Colebrook-White), dependendo da rugosidade do duto e do Número de Reynolds.*

L = Comprimento do duto (m)

Dh = Diâmetro hidráulico do duto (m) - *Para dutos circulares, é o próprio diâmetro.*

Pd = Pressão dinâmica calculada anteriormente.

B. Perda de Carga Localizada (Singularidades)

Aplicada em curvas, joelhos, derivações, reduções, dampers, filtros e grelhas.

$$P_{cl} = K * P_d$$

P_{cl} = Perda de carga na singularidade (Pa)

K = Coeficiente de perda de carga localizada (adimensional) - *Este valor é estritamente tabelado (tabelas da ASHRAE ou SMACNA) e varia para cada tipo e ângulo de conexão.*

C. Perda de Carga Total do Sistema (Delta P_{total})

É o somatório das perdas no trajeto mais crítico (o caminho que oferece maior resistência do ponto de captação até a descarga).

$$P_{total} = P_{cd} + P_{cl}$$

P_{total} = É a somatoria de todas as perdas de carga

Por fim, a força mínima necessária para que o exaustor atenda às necessidades referenciadas nos cálculos atrás, é representada por:

$$P_n = P_{total} + P_d$$

P_n = Pressão necessária em Pa (Pascal)

3.3 Procedimentos de Execução

O roteiro de execução prática do projeto dividiu-se em cinco etapas lógicas sequenciais:

1. **Limpeza e Inspeção das Mesas:** Remoção mecânica por raspagem da fuligem espessa, carepas de solda e graxa incrustadas que obstruíam as grades de captação e os defletores internos das bancadas ociosas.
2. **Medições e Diagnóstico Elétrico:** Mapeamento da rede elétrica local e testes preliminares de partida direta para verificar a integridade das bobinas e mancais dos motores elétricos.
3. **Corte e Instalação do Acrílico:** Limpeza dos estilhaços do caixilho da janela e fixação de uma placa de acrílico usinada sob medida com duas furações circulares feitas com serra-copo para a recepção dos dutos.
4. **Montagem e Fixação da Tubulação:** Alinhamento dos tubos rígidos de PVC de 4 polegadas, rebarbamento interno com lixa e ancoragem firme nas divisórias do laboratório utilizando abraçadeiras metálicas comerciais para neutralizar as vibrações mecânicas do escoamento.
5. **Testes Operacionais:** Acionamento dos motores para verificar o sentido correto de rotação das hélices e análise qualitativa do comportamento aerodinâmico da pluma térmico-convectiva de fumaça gerada no arco elétrico, validando visualmente a capacidade de sucção e arrasto do poluente para fora do ambiente escolar.

4 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

Este capítulo descreve as etapas reais de execução do projeto na oficina de soldagem da Etec Paulino Botelho, partindo do diagnóstico inicial dos equipamentos instalados até a montagem física da tubulação e a realização dos testes de fluxo de ar.

4.1 Diagnóstico da Infraestrutura da Oficina e Projeto

A ambientação da oficina de solda consiste em duas baias principais onde são realizadas as soldas, tendo seu perímetro delimitado por pequenas paredes de madeira. Cada baia possui duas máquinas de solda cada e uma mesa exaustora ao centro. Para uma melhor compreensão dos tópicos seguintes, iremos diferenciar as mesas sendo, a mesa com sistema centrífugo como “Mesa 1”, e a mesa com sistema axial sendo a “Mesa 2”.

O levantamento das condições iniciais revelou um cenário de ociosidade da infraestrutura existente. Ambas as mesas exaustoras possuíam seus respectivos motores e sistemas de captação montados, porém encontravam-se inoperantes. A causa central da inatividade era a completa ausência de um sistema elétrico e de proteção da rede de energia, além de uma falta da rede de tubulação que conduzisse os fumos e gases retidos pelas grades para o ambiente externo. Na configuração em que se encontravam, se possível o acionamento dos motores apenas faria a recirculação do ar contaminado dentro da própria sala de aula, agravando a dispersão dos poluentes.

Durante a análise do espaço físico, constatou-se que a oficina não contava com aberturas prévias ou chaminés projetadas próprias para ventilação industrial, apenas uma janela basculante de frente as baias de solda. Como as instalações pertencem a um prédio público estadual, intervenções de alvenaria — como a quebra de paredes estruturais ou vigas para a passagem de dutos — foram imediatamente descartadas por limitações burocráticas e orçamentárias.

A solução de engenharia adotada foi a identificação de um ponto de descarga externa aproveitando as janelas basculantes da sala: Onde nós retiramos uma parte em formato de quadrangular na lateral esquerda da janela. Esse ponto estratégico foi selecionado para receber uma adaptação mecânica em chapa de acrílico, permitindo a transição selada da tubulação interna para a atmosfera externa sem a necessidade de obras civis.

Figura 5 – Mesas exaustoras em suas perspectivas baias



Fonte: Do autor.

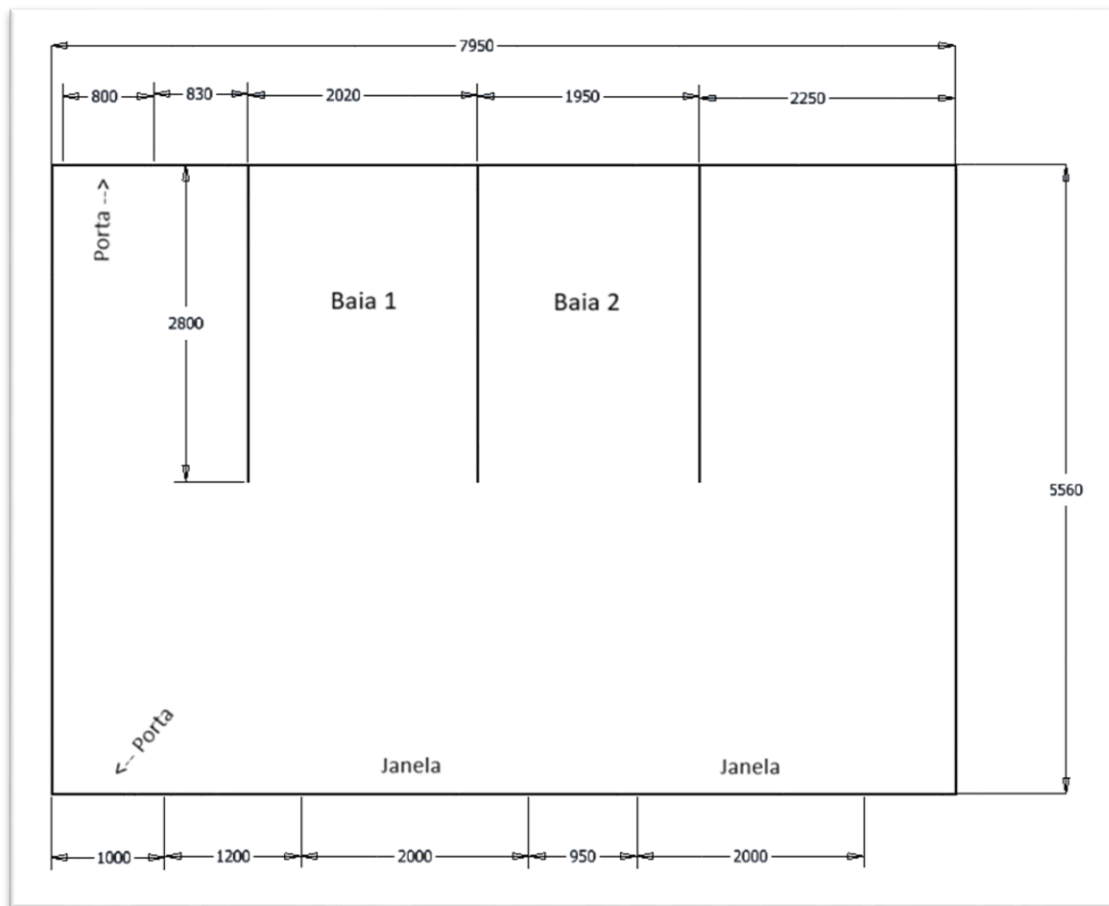
4.2 Levantamento Dimensional

A etapa de levantamento dimensional consistiu na coleta de medidas em bloco para subsidiar o corte dos materiais e a montagem física de todos os componentes da rede de exaustão. Os dados foram extraídos utilizando trenas metálicas e paquímetros, garantindo a precisão necessária para o acoplamento dos dutos de PVC e a fabricação da placa de vedação.

Abaixo estão descritas as principais dimensões levantadas na infraestrutura:

Dimensões da Sala de Soldagem:

Figura 6 – Desenho da Planta da Sala



Fonte: Do autor.

Dimensões das Mesas Exaustoras:

- **Mesa 1 (Sistema Centrífugo):** A área útil de trabalho (grade de captação) possui as dimensões de 800 mm de largura por 1045 mm de comprimento. A altura da bancada em relação ao solo é de 800 mm. O bocal de descarga do exaustor apresenta um diâmetro externo de 100 mm por 76 mm, o qual exigiu um adaptador para a tubulação de 4 polegadas (100 mm).
- **Mesa 2 (Sistema Axial):** A área útil de trabalho possui 810 mm de largura por 1045 mm de comprimento. A altura da bancada é de 795 mm. O bocal de saída do sistema axial mediu 240 mm de diâmetro.

Distâncias Percorridas e Tubulação: A tubulação adotada possui diâmetro comercial de 4 polegadas (100 mm). Para minimizar as perdas de carga por atrito e

singularidades (curvas), o trajeto foi planejado buscando a menor distância linear até a janela.

- O trecho correspondente à Mesa 1 demandou um comprimento linear de aproximadamente 8,4 metros de tubos e a utilização de 5 curvas de 90°.
- O trecho da Mesa 2 exigiu cerca de 8,4 metros de tubulação reta, com a aplicação de 7 curvas de 90°.

Adaptação da Janela: O vão do vidro avariado, selecionado como ponto de descarga do ar contaminado, apresentou um requadro com dimensões de 185 mm de largura por 185 mm de altura. Estas medidas foram utilizadas como base para o corte da chapa de acrílico de 2 mm de espessura, que atuará como flange de fixação para as extremidades dos dutos no ambiente externo.

4.2.1 Resultados do Dimensionamento

Conforme os cálculos detalhados no apêndice A, obtivemos o resultado da vazão e da perda de carga de ambos os sistemas.

A mesa 1 apresenta uma vazão aproximada de 192m³/h e com uma perda de carga total de 129,80Pa. O que apresenta ser um ótimo desempenho devido o sistema centrifugo.

A mesa 2 apresenta uma vazão aproximada de 33,91m³/h e uma perda de carga de 5,98Pa.

Em resumo, as curvas escolhidas, o comprimento dos dutos e seu diâmetro, apresenta um desempenho considerável, se baseando em custo e praticidade.

4.3 Especificação e Seleção dos Componentes

A seleção dos materiais empregados na montagem da rede de exaustão baseou-se em critérios práticos de viabilidade econômica, facilidade de instalação e resistência mecânica adequada à aplicação na oficina.

Para a tubulação de transporte dos fumos, optou-se pela utilização de tubos e conexões comerciais de PVC (Policloreto de Vinila) rígido com diâmetro de 4 polegadas (100 mm). A justificativa técnica para o uso do PVC apoia-se na sua leveza, imunidade estrutural à oxidação e montagem puramente de encaixe e colagem, o que dispensou o uso de processos onerosos e demorados de caldeiraria fina. Sob a ótica econômica, o material apresenta um custo significativamente inferior aos dutos de chapa galvanizada tradicionais, viabilizando o projeto dentro das limitações de uma instituição pública.

Para o ponto de descarga na janela, escolheu-se uma chapa de acrílico com 2 mm de espessura. O acrílico ofereceu a vantagem mecânica de permitir furações limpas com serra-copo para a transição dos dutos, assegurando a estanqueidade do ambiente sem o risco de trincas inerente ao vidro, além de não bloquear a entrada de luz natural. A ancoragem de todo o sistema nas divisórias de madeira foi realizada utilizando abraçadeiras metálicas comerciais, que neutralizam as vibrações geradas pelos motores e pelo escoamento aerodinâmico interno.

Abaixo, detalham-se as especificações das adequações elétricas e estruturais necessárias diretamente nas bancadas.

4.3.1 Motor, Fiação e Proteção Elétrica

A Mesa 1, equipada com sistema de exaustão centrífuga acionado por um motor trifásico, possuía em seu projeto original uma proteção elétrica baseada em fusíveis térmicos individuais por fase. Embora esse arranjo desempenhasse um papel básico no seccionamento sob condições de falha, ele expunha o motor ao risco severo de queima por falta de fase. Caso apenas um dos fusíveis atuasse, as fases

remanescentes sofreriam uma sobrecorrente severa para compensar a perda de torque, resultando no superaquecimento e na possível queima das bobinas. Para sanar essa vulnerabilidade, substituiu-se o sistema por um disjuntor trifásico, que possui um gatilho mecânico unificado e garante o seccionamento simultâneo das três fases sempre que uma anomalia for detectada em qualquer uma delas, resguardando a integridade do motor.

Já a Mesa 2, dotada de sistema de exaustão axial e alimentação elétrica monofásica, não possuía nenhum dispositivo de proteção contra surtos elétricos.

Para a adequação e proteção de ambos os motores e de suas respectivas fiações, implementou-se a utilização de disjuntores termomagnéticos com valores de corrente nominal dimensionados especificamente para a carga de cada equipamento. A montagem dos disjuntores foi realizada em caixas de proteção dedicadas com trilho de fixação, utilizando também cabos multivias (Cabo PP) e tomadas adequadas para garantir a segurança mecânica e elétrica das ligações.

Figura 7 - Antigos fusíveis térmicos



Fonte: Do autor.

Figura 8 - Disjuntor termomagnético e caixa de montagem



Fonte: Do autor.

4.3.2 Estrutura Metálica da mesa

A estrutura base das mesas é fabricada integralmente em ferro, apresentando em seu topo uma grade que atua como superfície de apoio para a realização das soldas. Devido à grande extensão da área da grade em contraste com as dimensões reduzidas de algumas peças a serem soldadas, identificou-se a necessidade de instalar um suporte fixador (morsa). Esse elemento tem a função dupla de imobilizar o corpo de prova com firmeza e garantir o contato adequado para o aterramento do circuito da máquina de solda.

A fixação da morsa foi projetada aproveitando o espaçamento natural entre os perfis longitudinais da grade, utilizando dois parafusos de ancoragem. Esse arranjo mecânico permite que a ferramenta fique posicionada na região central da bancada, mantendo também a mobilidade de deslizar ao longo das frestas até as extremidades, facilitando a acomodação de conjuntos soldados de maiores dimensões.

Figura 9 – Estrutura física da mesa 2 (Axial)



Fonte: Do autor.

4.3.3 Conexões dos Dutos às Mesas

O bocal de descarga original da Mesa 1 apresentava uma geometria retangular. Para viabilizar a transição do escoamento e permitir o acoplamento estanque com os dutos de PVC, fabricou-se uma peça adaptadora estruturada em aço e chapa galvanizada, convertendo a saída retangular para um perfil circular. A Mesa 2, por sua vez, já contava com uma saída circular, porém com diâmetro consideravelmente superior ao da rede de exaustão projetada, exigindo igualmente a instalação de um adaptador de redução para adequar o bocal à nova tubulação.

Figura 10 - Saída original mesa 1



Fonte: Do autor.

Figura 11 - Saída adaptada mesa 1



Fonte: Do autor.

Figura 12 - Saída original mesa 2



Fonte: Do autor.

Figura 13 - Saída Adaptada mesa 2



Fonte: Do autor.

Figura 14 – Soldagem do adaptador mesa 2



Fonte: Do autor.

4.4 Recuperação das Mesas Exaustoras

Como as bancadas encontravam-se inativas, porém ainda expostas ao ambiente da oficina, elas sofreram com o acúmulo contínuo de resíduos ao longo do tempo. Dessa forma, antes de qualquer acoplamento com a nova rede de dutos, foi necessária a intervenção física para a recuperação funcional dos equipamentos.

A primeira etapa do processo consistiu em uma limpeza pesada da estrutura. Realizou-se a remoção mecânica, por meio de raspagem e escovação, de toda a fuligem espessa, respingos, carepas de solda e graxa incrustadas nas grades superiores de captação e nos defletores internos. Essa desobstrução foi um passo

crítico não apenas por questões de conservação, mas para restaurar a área útil de sucção geométrica projetada para a mesa, garantindo que o ar fluísse livremente para os motores sem gerar perda de carga excessiva logo na entrada do sistema.

Em paralelo, executou-se a inspeção técnica dos conjuntos moto-ventiladores. Procedeu-se com a avaliação mecânica dos rotores e mancais para certificar que o eixo girava livremente, sem atrito com a carcaça centrífuga, já o axial se encontra com algum desgaste ou acúmulo de sujeira na parte do platinado. Confirmada a integridade mecânica, foram realizados testes elétricos preliminares de partida direta. Esses acionamentos curtos permitiram atestar a saúde das bobinas, a ausência de ruídos anormais de rolamento e a confirmação do sentido correto de rotação das hélices, atestando que os motores estavam aptos para a operação contínua.

Figura 15 – Interior da mesa 2



Fonte: Do autor.

Figura 16 – Teste do motor centrifugo antes da limpeza



Fonte: Do autor.

A etapa final de recuperação englobou a preparação dos bocais de saída das carcaças. As extremidades por onde os gases eram expelidos foram lixadas e desoxidadas. Esse preparo da superfície metálica teve como finalidade garantir um encaixe limpo e uma boa vedação durante a fixação dos adaptadores e reduções descritos no tópico anterior, deixando as mesas inteiramente prontas para a conexão com a nova tubulação de PVC.

4.5 Instalação da Rede de Dutos Exaustão

Com os adaptadores devidamente acoplados nas saídas das mesas, iniciou-se a etapa de montagem e consolidação física da rede de dutos de PVC de 4 polegadas.

O trajeto da tubulação foi estrategicamente planejado buscando a menor distância linear possível e a redução drástica do uso de singularidades, como curvas acentuadas de 90°, visando minimizar as perdas de carga por atrito e garantir o arraste eficiente dos particulados metálicos em suspensão.

A montagem mecânica dos tubos ocorreu de forma modular e sequencial, partindo da conexão com os bocais de recalque dos motores em direção ao ponto de descarte projetado na janela. Para assegurar a total estanqueidade ao longo do percurso e impedir qualquer vazamento de ar contaminado de volta para o ambiente da oficina, as extremidades de todas as conexões e tubos retos de PVC passaram por um processo de rebarbamento e lixamento. Em seguida, a união das peças foi consolidada por meio de luvas de esgoto e conexões de encaixe apropriadas para o material.

Figura 17– Acoplamento completo da mesa 1



Fonte: Do autor.

Figura 18 – Acoplamento completo da mesa 2



Fonte: Do autor.

O roteiro da tubulação foi desenhado para acompanhar o contorno das baias, evitando interferências na ergonomia e na movimentação dos alunos durante as aulas práticas. A fixação e sustentação da rede estrutural foram executadas utilizando as próprias divisórias de madeira que delimitam as áreas de soldagem. Para isso, aplicaram-se abraçadeiras metálicas comerciais espaçadas ao longo das prumadas, rigidamente fixadas com parafusos. Essa ancoragem foi dimensionada não apenas para suportar o peso da montagem, mas principalmente para travar o sistema contra as vibrações mecânicas transmitidas pelo funcionamento dos motores e pelo escoamento aerodinâmico interno.

Por fim, a integração primária do sistema exigiu um cuidado especial com a vedação. Na interface exata onde a tubulação plástica encontra os adaptadores metálicos fabricados para a Mesa 1 e Mesa 2, fez-se o uso de compostos selantes para preencher as pequenas folgas dimensionais decorrentes da união de materiais

de naturezas distintas. O rigor nessa vedação inicial é um fator determinante para o sucesso da captação, pois evita perdas de pressão estática na origem e garante que todo o volume de ar succionado pelas grades seja integralmente transportado e descartado pela rede.

4.6 Adaptação da Janela

A etapa final da montagem física consistiu na criação de uma interface de descarga segura para o ambiente externo, respeitando a restrição de não realizar intervenções de alvenaria no prédio público. Durante o planejamento do trajeto, a estratégia inicial sofreu uma otimização: em vez de estender a rede até uma janela basculante mais distante, optou-se por direcionar a exaustão para um esquadro de janela com formato quadrangular, localizado em um ponto mais próximo e alinhado de forma quase paralela à saída da tubulação.

Essa alteração de rota trouxe ganhos diretos em eficiência aerodinâmica e viabilidade econômica. O percurso mais retilíneo permitiu a eliminação de curvas adicionais no trajeto, reduzindo consideravelmente as perdas de carga localizadas no sistema e favorecendo o arrasto dos gases. Além disso, a diminuição da distância resultou em economia na aquisição de materiais, exigindo menor metragem de tubos de PVC. Para realizar o fechamento dessa janela e a passagem segura dos dutos, desenvolveu-se um painel de vedação utilizando uma placa plana de acrílico, material escolhido por oferecer o suporte mecânico adequado, ser imune ao risco de estilhaçamento durante a furação e preservar a entrada de luz natural na oficina.

Antes da fixação definitiva, a placa de acrílico passou por um processo de usinagem sob medida. Com o auxílio de uma ferramenta serra-copo, foram executadas duas furações circulares de diâmetro compatível para abraçar os tubos de PVC de 4 polegadas, referentes às descargas individuais da Mesa 1 e da Mesa 2.

Após a furação, a chapa de acrílico foi rigorosamente instalada e travada na esquadria metálica da janela. Em seguida, as extremidades finais da rede de dutos foram transpassadas pelos orifícios, projetando a saída de escape para o lado de fora do prédio. Para assegurar a total estanqueidade do ambiente e evitar que correntes

de vento forçassem o retorno dos gases nocivos para o interior da sala, aplicou-se vedação no perímetro de contato entre o acrílico e a tubulação de PVC, consolidando a barreira física e finalizando o trajeto mecânico do sistema de exaustão.

4.7 Testes Operacionais

Após a conclusão das etapas de montagem física e readequação elétrica, procedeu-se à realização dos testes operacionais com o intuito de validar a eficiência e a segurança de todo o conjunto. Esta validação abrangeu tanto as melhorias estruturais e elétricas aplicadas nas mesas exaustoras preexistentes quanto a implementação inédita da rede de tubulação de descarte. A avaliação foi dividida em três fases principais: análise eletromecânica, medição de fluxo de ar e ensaio prático de captação de fumos.

Inicialmente, executou-se o acionamento dos motores da Mesa 1 e da Mesa 2. Verificou-se que o sentido de rotação das hélices estava correto e compatível com a geometria das volutas. Com o auxílio de um alicate amperímetro, aferiu-se a corrente de trabalho de cada motor em regime nominal, registrando 2,2 A para a Mesa 1 e 1,7 A para a Mesa 2. Estes valores práticos confirmaram que o dimensionamento dos disjuntores termomagnéticos, descritos no tópico 4.3.1, estava adequado à carga, não ocorrendo quedas de tensão ou desarme durante os picos de partida. Adicionalmente, a ancoragem da tubulação demonstrou-se robusta, mantendo níveis de vibração mecânica aceitáveis e atestando a estanqueidade das vedações nos adaptadores de chapa.

Na segunda fase, buscou-se avaliar o comportamento fluidodinâmico do sistema. Conforme ressaltado nas limitações técnicas da metodologia, o laboratório não dispunha de equipamentos de precisão laboratorial (como tubos de Pitot ou manômetros de coluna de líquido) para a obtenção de dados exatos sobre a perda de carga total. Como alternativa viável, utilizou-se um anemômetro portátil para aferir a velocidade do ar na face de captação das grades. As medições in loco indicaram uma velocidade média de sucção de 6,4 m/s na Mesa 1 e de 1,2 m/s na Mesa 2.

A etapa final consistiu na validação do sistema em situação real de operação (ensaio qualitativo). Para isso, abriu-se um arco elétrico utilizando o processo de soldagem MAG, conhecido pela alta geração de particulados densos. Durante a queima do consumível, observou-se o comportamento aerodinâmico da pluma térmico-convectiva. Constatou-se visualmente que a coluna de fumaça ascendente foi tracionada de maneira eficiente pela grade da mesa exaustora, impedindo a sua dispersão para a zona de respiração do operador. Por fim, a inspeção na área externa confirmou a exaustão contínua e volumosa dos gases através das descargas projetadas na chapa de acrílico da janela, atestando o pleno funcionamento do sistema readequado.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E IMPACTOS

Este capítulo apresenta a avaliação dos resultados obtidos após a reestruturação e ativação do sistema de ventilação local exaustora (VLE). A análise busca correlacionar as intervenções mecânicas executadas nas bancadas com a efetiva mitigação dos riscos ocupacionais gerados pela exposição aos fumos metálicos, além de avaliar a viabilidade da solução adotada.

5.1 Desempenho do Sistema de Exaustão

O desempenho geral do sistema de exaustão demonstrou-se satisfatório frente ao problema inicial de ociosidade das bancadas. A principal métrica de avaliação adotada nesta etapa foi qualitativa, baseada na observação direta do comportamento aerodinâmico da pluma de fumos durante as operações práticas de soldagem.

Constatou-se que a força de sucção gerada pelos motores, tanto o centrífugo (Mesa 1) quanto o axial (Mesa 2), em conjunto com a nova rede de dutos em PVC, foi capaz de vencer a inércia térmica dos gases e a resistência (perda de carga) do trajeto. Durante a abertura do arco elétrico, a nuvem de óxidos metálicos superaquecidos —

que antes ascendia livremente por convecção térmica — passou a ser capturada e direcionada pelas grades logo no instante de sua formação.

Esse arrasto contínuo evitou que a coluna de poluentes alcançasse a zona de respiração do soldador, cumprindo o princípio mecânico fundamental da Ventilação Local Exaustora (VLE). O fluxo de ar no interior da tubulação manteve-se constante e as vedações aplicadas nos adaptadores e na chapa de acrílico garantiram que o volume captado fosse efetivamente isolado e expurgado para o ambiente externo, sem apresentar sinais de vazamento ou refluxo para o interior do laboratório.

5.2 Impacto nas Condições Ambientais da Oficina

A reativação do sistema de exaustão promoveu uma mudança substancial na qualidade do ar no interior do laboratório. Antes da intervenção, a ausência de circulação forçada e de descarte externo permitia que os gases ficassem estagnados, criando uma névoa que frequentemente tomava conta das baias de soldagem, reduzindo a clareza visual e o conforto do ambiente.

Com o funcionamento das bancadas integradas à nova rede de dutos, observou-se uma redução drástica na concentração visível de fumos no ar. A captação do poluente diretamente na fonte impediu que o particulado se espalhasse, mantendo a atmosfera limpa nas áreas de circulação da oficina. Além da melhoria visual, notou-se a dissipação rápida dos odores fortes e característicos da soldagem, principalmente aqueles provenientes da queima dos revestimentos de eletrodos (pirólise).

Sob a ótica da saúde ocupacional, a requalificação ambiental refletiu diretamente no bem-estar diário dos usuários. A percepção geral relatada por alunos e professores durante o uso da oficina foi de um ambiente de trabalho mais salubre, com aumento do conforto respiratório e ausência de irritações oculares e nas vias aéreas, sintomas que costumavam ocorrer em dias de aulas práticas intensas. Esse resultado evidencia que o investimento em medidas de segurança coletiva melhora o rendimento técnico e promove uma cultura de prevenção dentro da escola.

5.3 Viabilidade Econômica e Possibilidade de Replicação

A viabilidade econômica deste projeto de adequação é um dos seus principais destaques, especialmente considerando a realidade orçamentária restrita comum a instituições públicas de ensino. A redução drástica dos custos de implementação foi alcançada através de duas frentes estratégicas: o reaproveitamento de ativos ociosos e a seleção de materiais alternativos de baixo custo para a rede de transporte fluido-dinâmico.

A intervenção poupou a instituição de adquirir exaustores industriais novos, uma vez que as carcaças metálicas, as grades de captação e os motores (centrífugo e axial) originais das mesas foram totalmente recuperados pela equipe técnica a custo zero.

No que tange à aquisição de materiais para a construção da rede de dutos, a substituição da chapa galvanizada tradicional por tubulação de Policloreto de Vinila (PVC) mostrou-se altamente viável. Para a estruturação de todo o trajeto de exaustão até a janela, foram utilizados aproximadamente 10 metros lineares de tubo PVC de 4 polegadas, 7 cotovelos e 1 conexão tipo Tê. O custo total do sistema de condução de ar foi de apenas R\$ 359,21.

A adequação da infraestrutura de proteção elétrica, que englobou a aquisição de disjuntores termomagnéticos, caixas de montagem, cabos multivias (PP) e tomadas industriais, demandou um investimento de R\$ 218,17. A Tabela 2 consolida os investimentos diretos realizados para a reativação do laboratório.

Tabela 1 – Custos dos materiais para readequação

Categoria	Descrição dos itens	Valor Total (R\$)
Rede de Dutos (PVC)	10m de Tubo 4", 7 Cotovelos e 1 Tê	359,21
Sistema Elétrico	Disjuntores, cabos pp, caixas e tomadas	218,17
Custo Total do Projeto		577,38

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

A simplicidade construtiva — que dispensou serviços onerosos de alvenaria e caldeiraria pesada — aliada ao baixo custo final dos materiais, atesta a alta capacidade de replicação deste projeto. O modelo implementado na Etec Paulino Botelho pode ser facilmente adotado por outras unidades escolares e oficinas de pequeno porte que necessitem adequar seus postos de soldagem às normas de higiene ocupacional sem dispor de grandes verbas para reformas estruturais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

O presente projeto atingiu seu objetivo principal ao reativar e integrar o sistema de exaustão localizada na oficina de soldagem da Etec Paulino Botelho. A intervenção prática demonstrou a viabilidade de recuperar ativos e infraestruturas ociosas por meio de soluções de engenharia acessíveis, contornando limitações orçamentárias e dispensando a necessidade de intervenções civis estruturais no edifício escolar.

A montagem mecânica da rede de dutos e a adaptação do ponto de descarga garantiram o direcionamento e a remoção contínua dos fumos metálicos gerados. Conforme observado nos testes práticos, o sistema provou-se capaz de capturar a pluma de contaminantes na fonte, impedindo sua ascensão à zona respiratória dos operadores.

Como resultado direto, obteve-se uma melhoria substancial na qualidade do ar e na salubridade do laboratório, reduzindo a exposição de alunos e professores aos particulados nocivos e mitigando riscos ocupacionais. O trabalho não apenas devolveu a funcionalidade plena às bancadas, como também reforçou a aplicação prática dos conceitos de higiene ocupacional, servindo de modelo de segurança coletiva para a formação técnica dos estudantes.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A base mecânica e fluida estabelecida por este projeto abre espaço para aprimoramentos tecnológicos e acadêmicos subsequentes. Para a continuidade das melhorias na oficina, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- **Instalação de sistemas de filtragem:** Acoplar caixas de retenção particulada na linha de exaustão, antecedendo a descarga externa, com o intuito de filtrar os óxidos metálicos e reduzir o impacto ambiental das emissões atmosféricas.
- **Instrumentação para medição de vazão:** Realizar o levantamento das curvas de desempenho aerodinâmico do sistema utilizando instrumentação laboratorial de precisão (como tubos de Pitot e manômetros de coluna de líquido), permitindo o cálculo exato da perda de carga total e da pressão estática.
- **Sensores de monitoramento:** Integrar módulos eletrônicos de monitoramento da qualidade do ar capazes de aferir a concentração de micropartículas e gases na oficina em tempo real.
- **Automatização do acionamento do sistema:** Desenvolver um circuito de controle (via sensores de corrente ou fotocélulas) que acione os motores dos exaustores automaticamente no exato momento da abertura do arco elétrico nas máquinas de soldagem.

REFERÊNCIAS

ACGIH - AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS. **Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents**. Cincinnati: ACGIH, [1977].

ANJO, Jorge Marques dos. **Aula 25: processos de soldagem**. Goiânia: Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2014. Disponível em: <https://www.slideserve.com/burke/aula-25-processos-de-soldagem-oxig-s>. Acesso em: 25 jun. 2026.

AZEVEDO NETTO, José Martiniano de; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, Miguel. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2015. Disponível em:

<https://pt.scribd.com/document/594905288/Manual-de-Hidraulica-by-Jose-Martiniano-de-Azevedo-Netto-Z-lib-org-1>. Acesso em: 25 jun. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho. **Norma Regulamentadora nº 15 (NR-15) - Atividades e operações insalubres**. Brasília: Ministério do Trabalho, 1978.

COLACIOPPO, Sergio. **Avaliação da exposição profissional a fumos metálicos em operações de solda**. 1984. Tese (Doutorado em Saúde Pública) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

DELARCO SOLDAS. **Arames de solda Mig**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://delarcosoldas.com.br/arames-de-solda-mig/>. Acesso em: 25 jun. 2026.

EMELIE. **Processo Tig de soldagem**. [S. l.]: RETOEDU, 2024. Disponível em: <https://dsw.aau.edu.et/stu/processo-tig-de-soldagem.html>. Acesso em: 25 jun. 2026.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

APÊNDICE A – Memorial de Cálculo do Sistema de Ventilação Local Exaustora

Este apêndice reúne o detalhamento matemático e os parâmetros técnicos utilizados para o dimensionamento fluidodinâmico das mesas exaustoras desenvolvidas para a oficina de soldagem da ETEC Paulino Botelho.

A seguir apresentamos uma tabela geral para coeficientes de perda de carga localizada (K), que será de suma importância nos cálculos seguintes:

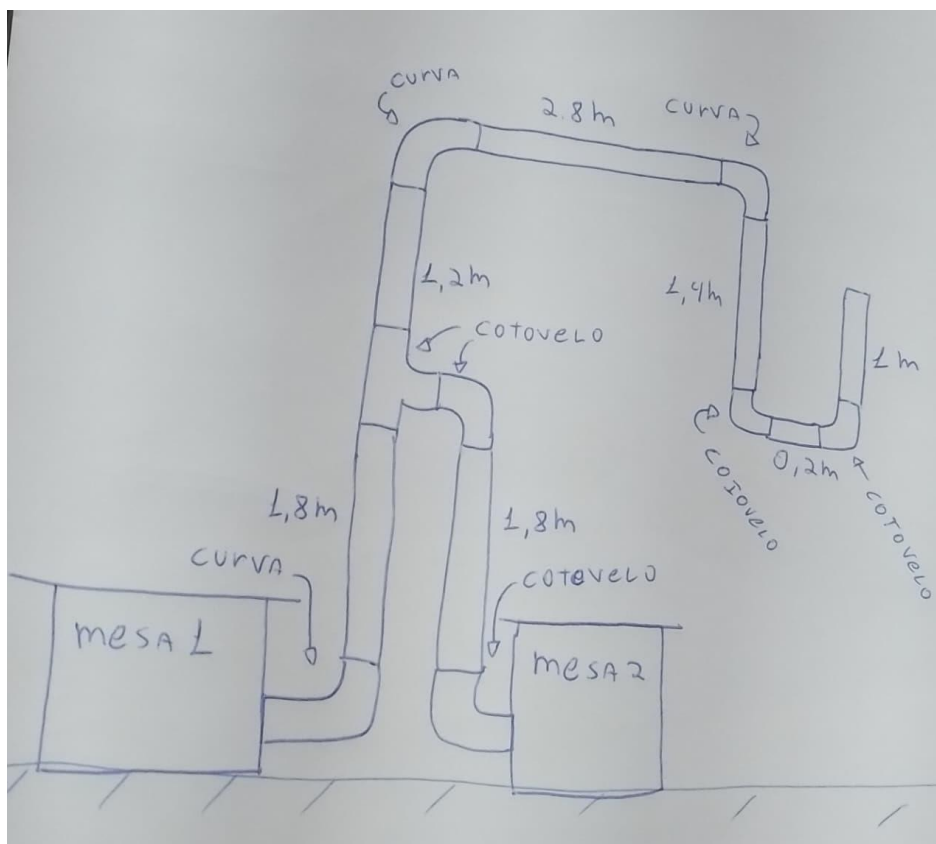
Tabela 2 – Coeficiente de perda de carga (K)

Peça	K	Peça	K
Ampliação gradual	0,30*	Medidor Venturi	2,50**
Comporta aberta	1,00	Pequena derivação	0,03
Controlador de vazão	2,50	Redução gradual	0,15*
Cotovelo ou joelho de 45°	0,40	Saída de canalização	1,00
Cotovelo ou joelho de 90°	0,90	Tê de passagem direta	0,60
Crivo	0,75	Tê de saída bilateral	1,80
Curva de 22,5°	0,10	Tê de saída de lado	1,30
Curva de 45°	0,20	Válvula borboleta aberta	0,30
Curva de 90°	0,40	Válvula de ângulo aberta	5,00
Entrada de Borda	1,00	Válvula de gaveta aberta	0,20
Entrada Normal	0,50	Válvula de pé	1,75
Junção	0,40	Válvula de retenção	2,50
		Válvula globo aberta	10,00

Fonte: Adaptado de Azevedo Netto; Alvarez, 1988.

E para melhor compreensão dos componentes de cada duto, o esquema simplificado e fora de escala dos dutos:

Figura 19 – Esquema simplificado dos dutos



Fonte: Do autor.

Para a execução dos cálculos de dimensionamento, adotou-se o diâmetro hidráulico (**Dh**) nominal de 100mm (0,1m) e seu comprimento total (em linha reta) de 8,4 metros, correspondente às tubulações rígidas de PVC de 4 polegadas instaladas na rede de exaustão. A massa específica do ar (**p**) foi considerada constante e fixada em 1,20kg/m³, valor de referência ao nível do mar sob temperatura controlada de 20C°. A área da seção transversal do duto circular (**A**), calculada geometricamente, resultou em 0,007854m². A velocidade obtida na saída da mesa 1 foi de 6.8m/s e da mesa 2 foi de 1,2m/s.

Para o cálculo da vazão, que expressa o comportamento volumétrico do fluxo nos dutos referente a mesa 1:

$$Q = V * A$$

$$Q = 6.8 * 0,00785$$

$$Q = 0,05338m^3/s$$

$$0,05338m^3/s * 3600s = 192,16m^3/h$$

A vazão obtida foi de 192,16m³/h (metro cúbico/hora).

A pressão dinâmica (***Pd***), associada diretamente à energia cinética conferida ao ar pelo trabalho cinemático do exaustor, foi quantificada através da equação:

$$Pd = (p * V^2) / 2$$

$$Pd = (1,2 * 6.8^2) / 2$$

$$Pd = 27,74Pa$$

A resistência por fricção interna gerada ao longo das paredes dos trechos retilíneos de PVC caracteriza a perda de carga distribuída (***Pcd***), onde o fator de atrito (***f***) foi considerado como 0,02. O cálculo quantifica a perda energética linear sofrida pelo ar durante o trajeto até a exaustão.

$$Pcd = f * (L / Dh) * Pd$$

$$Pcd = 0,02 * (8,4 / 0,1) * 27,74$$

$$Pcd = 84 * 0,5548$$

$$Pcd = 46,60Pa$$

As perturbações no escoamento originadas por mudanças de direção ou obstruções físicas (como curvas de 90° e restrições de bocal) constituem as perdas de carga localizadas (***Pcl***). O cálculo baseia-se na aplicação de coeficientes adimensionais tabelados (***K***) específicos para cada acessório geométrico, onde para a mesa 1 foi utilizado, três curvas longas 90° (0,40K cada) e dois cotovelos 90° (0,90K cada).

Para as curvas longas, temos:

$$Pcl = K * Pd$$

$$Pcl = 0,40 * 27,74$$

$$Pcl = 11,09Pa$$

Para os cotovelos, temos:

$$P_{cl} = 0,90 * 27,74$$

$$P_{cl} = 24,96Pa$$

Somando todos os componentes, temos:

$$P_{cl} = 3 * (11,09) + 2 * (24,96)$$

$$P_{cl} = 83,20Pa$$

Por fim somamos as perdas de carga localizadas com as perdas nas secções retas dos dutos:

$$P_{total} = P_{cd} + P_{cl}$$

$$P_{total} = 46,60 + 83,20$$

$$P_{total} = 129,80Pa$$

A perda de carga total para a mesa 1 é de 129,80Pa. Isto significa que para manter a velocidade de 6,8m/s na saída, o exaustor está gerando uma força resultante a pressão dinâmica mais a perda de carga total (157,54Pa).

Para o cálculo da vazão referente a mesa 2:

$$Q = V * A$$

$$Q = 1,2 * 0,00785$$

$$Q = 0,00942m^3/s$$

$$0,00942m^3/s * 3600s = 33,91m^3/h$$

A pressão dinâmica (***Pd***), quantificada através da equação:

$$Pd = (p * V^2) / 2$$

$$Pd = (1,2 * 1,2^2) / 2$$

$$Pd = 0,864Pa$$

A resistência por fricção interna gerada ao longo do trajeto até a exaustão.

$$Pcd = f * (L / Dh) * Pd$$

$$Pcd = 0,02 * (8,4 / 0,1) * 0,864$$

$$Pcd = 84 * 0,017$$

$$Pcd = 1,45Pa$$

As perturbações no escoamento baseiam-se na aplicação de coeficientes adimensionais tabelados, onde para a mesa 1 foi utilizado, duas curvas longas 90° (0,40K cada) e cinco cotovelos 90° (0,90K cada).

Para as curvas longas, temos:

$$Pcl = K * Pd$$

$$Pcl = 0,40 * 0,864$$

$$Pcl = 0,34Pa$$

Para os cotovelos, temos:

$$Pcl = 0,90 * 0,864$$

$$Pcl = 0,77Pa$$

Somando todos os componentes, temos:

$$Pcl = 2 * (0,34) + 5 * (0,77)$$

$$Pcl = 4,53Pa$$

Por fim somamos as perdas de carga localizadas com as perdas nas secções retas dos dutos:

$$**P_{total} = P_{cd} + P_{cl}**$$

$$**P_{total} = 1,45 + 4,53**$$

$$**P_{total} = 5,98Pa**$$

A perda de carga total para a mesa 2 é de 5,98Pa. Seu valor extremamente reduzido, se deve pela baixa velocidade de escoamento, e pela deficiência em sistemas axiais em gerar altas pressões dinâmicas.