

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE
COMPUTAÇÃO**

RAFAELA BENCHUR DE BORBA

**Avaliação da Eficiência dos Sistemas de Ventilação Local
Exaustora em Laboratórios de Ensino de Química: Diagnóstico e
Propostas de Melhoria**

**GOIÂNIA
2025**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Rafaela Benhur de Borba

Título do trabalho: Avaliação da Eficiência dos Sistemas de Ventilação Local Exaustora em Laboratórios de Ensino de Química: Diagnóstico e Propostas de Melhoria

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Fernandes Da Cunha, Professor do Magistério Superior**, em 16/06/2025, às 09:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Appel Colvero, Engenheiro**, em 16/06/2025, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafaela Benhur De Borba, Discente**, em 23/06/2025, às 19:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5442236** e o código CRC **49ECC860**.

Referência: Processo nº 23070.013659/2025-64

SEI nº 5442236

RAFAELA BENHUR DE BORBA

Avaliação da Eficiência dos Sistemas de Ventilação Local Exaustora
em Laboratórios de Ensino de Química: Diagnóstico e Propostas de
Melhoria

Projeto Final de Curso apresentado como
requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia
Elétrica, Mecânica e de Computação, pela
Universidade Federal de Goiás.

Orientador: Daniel Fernandes Cunha.

Coorientador: Diogo Appel Colvero.

GOIÂNIA
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Borba, Rafaela Benhur de

Avaliação da Eficiência dos Sistemas de Ventilação Local Exaustora em Laboratórios de Ensino de Química [manuscrito] : Diagnóstico e Propostas de Melhoria / Rafaela Benhur de Borba. - 2025.
xi, 44 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Fernandes Cunha; co-orientador Dr. Diogo Appel Colvero.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2025.

Bibliografia.

Inclui fotografias, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Ventilação industrial. 2. Sistema de ventilação local exaustora. 3. Poluentes químicos. 4. Capela. 5. Laboratório. I. Cunha, Daniel Fernandes, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao(s) dezesseis dia(s) do mês de Junho do ano de 2025 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Avaliação da Eficiência dos Sistemas de Ventilação Local Exaustora em Laboratórios de Ensino de Química: Diagnóstico e Propostas de Melhoria”, de autoria de RAFAELA BENHUR DE BORBA, do curso de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha – orientador (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: TAE Dr. Diogo Appel Colvero (EMC/UFG) e Prof. Dr. Carlos Alberto de Almeida Vilela (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 8,7 , tendo sido o TCC considerado APROVADO.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Fernandes Da Cunha, Professor do Magistério Superior**, em 16/06/2025, às 10:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alberto De Almeida Vilela, Professor do Magistério Superior**, em 16/06/2025, às 15:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Appel Colvero, Engenheiro**, em 16/06/2025, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5442059** e o código CRC **FB55E675**.

"Tu te tornas eternamente responsável por aquilo que cativas."

— Antoine de Saint-Exupéry, O Pequeno Príncipe

AGRADECIMENTOS

Ao concluir esta etapa importante da minha trajetória acadêmica, não poderia deixar de expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

Primeiramente quero agradecer ao meu pai e à minha mãe, que me deram a oportunidade de focar em meus estudos sem me preocupar com outras obrigações rotineiras.

Agradeço à minha irmã, que me apoiou e esteve ao meu lado durante toda minha trajetória de estudos, iniciada no ensino fundamental, me dando suporte e acreditando no meu potencial.

Agradeço também ao meu namorado que caminhou junto comigo desde o início dessa etapa extremamente importante em nossas vidas, a graduação, me dando forças para continuar e me acolhendo nos momentos de turbulência.

Eu sou extremamente grata ao meu professor/orientador, Daniel Fernandes, e ao meu coorientador, Diogo Appel, que participaram ativamente deste processo ao meu lado e me deram todo apoio necessário.

Quero agradecer também todos os meus amigos, que acompanharam, mesmo que de longe, esse processo árduo, mas valioso. Principalmente, a Stéphanie e a Ana Clara, que tornaram a minha graduação mais leve e divertida e nunca soltaram a minha mão.

Agradeço aos meus sogros e minha cunhada, que acompanharam de pertinho toda essa trajetória e sempre me deram força e motivação.

Enfim, agradeço a todos os meus familiares que tornaram esse momento possível e que torceram por mim desde o início e a todos os meus professores e técnicos que me ajudaram e sempre acreditaram no meu potencial.

E aí vai uma frase de um livro que admiro muito, “O Pequeno Príncipe”, que diz “As pessoas grandes nunca entendem nada sozinhas, e é cansativo, para as crianças, estar sempre explicando tudo.” Lembrando a importância de manter a simplicidade, a sensibilidade (ser grato) e a criatividade da infância.

RESUMO

A instalação de um Sistema de Ventilação Local Exaustora (SVLE) é imprescindível em ambientes em que são encontrados equipamentos com emissão de contaminantes ou produtos que liberam substâncias nocivas à saúde dos trabalhadores que frequentam o local. Por esse motivo, em laboratórios de química é necessária a presença de capelas exaustoras que capturam os poluentes e os eliminam, por meio de uma tubulação e um ventilador, antes de serem dispersos no recinto. Assim, apontando essa necessidade, foi recomendada pelo técnico de laboratórios de graduação de ensino superior, que manuseiam produtos químicos, a análise do SVLE desses locais e a verificação de possíveis falhas. Com o objetivo, então, de elevar a segurança dos pesquisadores, estudantes e professores que atuam no local e reduzir impactos ambientais. Por isso, foram realizadas duas visitas aos laboratórios, com o auxílio do técnico responsável, para coletar informações e medições, além de estudar propostas de soluções relevantes que atendam a um SVLE e utilizar equações para calcular a pressão e a vazão necessárias do sistema para a seleção do exaustor ideal, atingindo o objetivo de forma correta. Assim, para solucionar as falhas presentes no sistema desses locais estudados foram sugeridas duas opções de dimensionamento das três capelas instaladas. Uma dessas soluções seria uma única tubulação sendo conectada às três capelas com redutores de diâmetro nas capelas mais distantes do exaustor, tendo que liga-las ao mesmo tempo para uso de qualquer uma delas. A outra solução seria cada capela tendo sua própria tubulação e as três com mesmo diâmetro do duto, permitindo um ruído menor, pois cada uma será ligada separadamente. Além disso, para resolver outros problemas percebidos foram propostas algumas soluções: para o caso de evitar incêndio e eliminar fios internos nas capelas, foram requeridas botoeiras liga/desliga na parte externa delas; para a questão de falta de vedação na base das capelas, foi requerido silicone em todo o seu perímetro; para evitar que animais, insetos, chuvas e granizos entrem pelas tubulações foram adicionados chapéus chineses e telas no terminal de cada duto; e para a presença de ruído elevado, os exaustores foram instalados na parte de fora dos laboratórios.

Palavras-chave: Ventilação industrial; Sistema de ventilação local exaustora; Poluentes químicos; Capela; Laboratório.

ABSTRACT

The installation of a Local Exhaust Ventilation System (LEV) is essential in environments where equipment is found that emits contaminants or products that release substances that are harmful to the health of workers who frequent the location. For this reason, chemistry laboratories require exhaust hoods that capture pollutants and eliminate them, through piping and a fan, before they are dispersed throughout the room. Therefore, pointing out this need, the technician of higher education undergraduate laboratories that handle chemical products recommended that the LEV of these locations be analyzed and checked for possible failures. The aim, then, was to increase the safety of researchers, students and professors who work there and reduce environmental impacts. Therefore, two visits were made to the laboratories, with the help of the responsible technician, to collect information and measurements, in addition to studying proposals for relevant solutions that meet a LEV and using equations to calculate the pressure and flow rate required by the system to select the ideal exhaust fan, correctly achieving the objective. Thus, to solve the faults present in the system of these studied locations, two options for dimensioning the three installed hoods were suggested. One of these solutions would be a single pipe connected to the three hoods with diameter reducers in the hoods furthest from the exhaust fan, having to be connected at the same time for any of them to be used. The other solution would be for each hood to have its own pipe and for all three to have the same duct diameter, allowing for less noise, since each one would be connected separately. In addition, to solve other perceived problems, some solutions were proposed: in order to avoid fire and eliminate internal wires in the hoods, on/off buttons were required on the outside of them; for the lack of sealing at the base of the hoods, silicone was required around their entire perimeter; to prevent animals, insects, rain and hail from entering the pipes, Chinese hats and screens were added at the end of each duct; and to the presence of high noise, the exhaust fans were installed outside the laboratories.

Keywords: Industrial ventilation; Local exhaust ventilation system; Chemical pollutants; Fume hood; Laboratory.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	VENTILAÇÃO INDUSTRIAL	3
2.2	SISTEMA DE VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA.....	4
2.3	NORMAS TÉCNICAS	4
2.4	DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA	7
3	METODOLOGIA	10
3.1	PRIMEIRA VISITA E COLETA DE DADOS	10
3.2	SEGUNDA VISITA E COLETA DE MEDIÇÕES	10
3.3	DIMENSIONAMENTO DE DUTOS	12
3.4	PERDAS DE CARGA.....	13
3.5	SELEÇÃO DO EXAUSTOR E SUA LOCALIZAÇÃO	16
3.6	VEDAÇÃO DA BASE DAS CAPELAS	16
4	RESULTADOS.....	18
4.1	SOLUÇÃO PARA OS PROBLEMAS 1, 2 E 3	20
4.2	SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA 3.....	35
4.3	SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA 4.....	36
4.4	SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA 5.....	36
4.5	SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA 6.....	37
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de k de acordo com a relação de r e d	14
Tabela 2 – Fator de perda adimensional K para T e Y	15
Tabela 3 – Fator de perda adimensional K para contração de junção.	15
Tabela 4 – Valores de k de acordo com a relação de h e d	16
Tabela 5 – Dimensões de tubulação de cada capela.....	22
Tabela 6 – Dimensões de tubulação de cada capela.....	22
Tabela 7 – Comprimento de trechos retos de cada tubulação.	24
Tabela 8 – Comparação de perdas de carga entre o presente estudo e o caso de Ferrari (2021).	24
Tabela 9 – Resultados de relação de áreas, coeficiente K e perdas de carga das contrações de junções.....	25
Tabela 10 – Perdas de carga em cada cotovelo.	27
Tabela 11 – Comparação de perdas de carga entre o presente estudo e o caso de Ferrari (2021).	27
Tabela 12 – Especificações do exaustor selecionado da Belfano.	29
Tabela 13 – Comprimento de trechos retos de cada tubulação e perdas de carga calculadas.	32
Tabela 14 – Comparação de perdas de carga entre o presente estudo e o caso de Ferrari (2021).	32
Tabela 15 – Quantidade de cotovelos e perda de carga calculada em cada tubulação.....	32
Tabela 16 – Comparação de perdas de carga entre o presente estudo e o caso de Ferrari (2021).	33
Tabela 17 – Valores de vazão e pressão mínimas por capela.	33
Tabela 18 – Especificações do exaustor selecionado da Belfano.	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes essenciais em um Sistema de Ventilação Local Exaustora.	4
Figura 2 - Trena a laser digital da marca Milessey.	11
Figura 3 – Capela da marca Centauro já instalada nos laboratórios.	11
Figura 4 – Diâmetro nominal (DN) especificado no duto.....	12
Figura 5 – Referências de r e d em cotovelo circular de 90°.	14
Figura 6 – Referências de d e h no chapéu chinês.	15
Figura 7 – Altura do duto sem filtragem na mesma direção das janelas do piso 1 do prédio do IQ2.....	18
Figura 8 – Ferrugem apresentada no duto próximo ao arco de ferro devido ao vazamento de reagentes.....	19
Figura 9 – Presença de aberturas na parte inferior da capela.	19
Figura 10 – Fios elétricos expostos.	20
Figura 11 – Dutos de PVC selecionados da marca Belfano.....	23
Figura 12 – Conexões em Y com passagem reta (ramo principal).	25
Figura 13 – Conexão de contração de junção abrupta em PVC.....	26
Figura 14 – Conexão de contração de junção cônica de 30° e chapa galvanizada.	26
Figura 15 – Curva de 90°.	28
Figura 16 – Chapéu chinês da marca Nortuflex.....	28
Figura 17 – Exaustor de modelo TBL-Série 10, Tipo Limit Load.....	29
Figura 18 – Projeto do SVLE do caso 1.....	30
Figura 19 – Projeto do SVLE do caso 2.....	35
Figura 20 – Tela de PVC.....	35
Figura 21 – Mão francesa para apoiar os exaustores instalados na parte externa dos laboratórios.....	36
Figura 22 – Silicone acético preto resistente a alta temperatura para vedação.	37
Figura 23 – Botoeira liga/desliga para caso 1.	38
Figura 24 – Botoeira liga/desliga para caso 2.	39

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	9
Equação 2.....	9
Equação 3.....	12
Equação 4.....	12
Equação 5.....	13
Equação 6.....	13
Equação 7.....	13
Equação 8.....	13
Equação 9.....	14
Equação 10.....	17
Equação 11.....	17
Equação 12.....	17
Equação 13.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM American Society for Testing and Materials

CLT Consolidação das Leis do Trabalho

DN Diâmetro Nominal

EPI Equipamento de Proteção Individual

EPC Equipamento de Proteção Coletiva

IQ2 Instituto de Química, bloco 2

NR Norma Regulamentadora

NBR Norma Brasileira Regulamentadora

PGR Programa de Gerenciamento de Riscos

PPRA Programa de Prevenção de Riscos Ambientais

PVC Policloreto de Vinilo

SVLE Sistema de Ventilação Local Exaustora

1 INTRODUÇÃO

Laboratórios de pesquisa são normalmente frequentados por discentes que, antes de ingressar na faculdade, provavelmente não tem familiaridade com este tipo de ambiente, o que pode colocar em risco essas pessoas, já que não foram preparadas para agir de forma correta e segura (Rodrigues, 2018). Além disso, os laboratórios de estudo e pesquisa são ambientes que necessitam de muita atenção e cuidado, por se tratarem de locais geradores de riscos. Riscos estes, muitas vezes imperceptíveis, devido ao contato com materiais biológicos ou substâncias tóxicas, conforme relatam Azevedo et al. (2016 apud Vicente et al., 2021).

Por esse motivo, de acordo com Hinrichsen (2004 apud Vicente et al., 2021), é fundamental aplicar as práticas de biossegurança, que são compostas por medidas protetivas individuais e coletivas capazes de minimizar a exposição dos indivíduos aos riscos gerados no ambiente. Algumas medidas eficazes são ações de bloqueio, práticas de controle e educação continuada dos profissionais e discentes, conscientizando-os sobre os possíveis riscos presentes no local frequentado.

Existem outros documentos que estabelecem diretrizes para garantir a segurança dos trabalhadores e um ambiente controlado. No Brasil, a norma NR-9 determina que instituições adotem medidas para minimizar a exposição dos trabalhadores a agentes químicos, físicos e biológicos, de acordo com Araújo (2009 apud Fernandes et al., 2021). Outra norma importante é a NR-15, que estabelece os limites de tolerância para agentes químicos e parâmetros que definem ambientes insalubres.

Em se tratando de EPC's, os Sistemas de Ventilação Local Exaustora (SVLE) possuem recomendações de serem instalados em laboratórios de estudo em que são utilizados produtos químicos, pois servem para controlar a exposição ocupacional dos trabalhadores locais a agentes químicos e eliminar possíveis contaminantes do ambiente de trabalho. Entretanto, nem sempre isso acontece, já que, muitas vezes, estes sistemas de ventilação são projetados, instalados ou operados de forma inadequada, não alcançando o objetivo proposto e ocasionando problemas graves à saúde dos frequentadores (Fernandes et al., 2021).

Neste sentido, os laboratórios em que se trabalha com compostos químicos são locais em que há a demanda de SVLE. Isso porque são ambientes que apresentam muitos riscos à saúde dos trabalhadores pelo fato de que há manipulação de diversos produtos tóxicos, corrosivos, inflamáveis e, até mesmo, cancerígenos. A inalação de vapores químicos, por exemplo, resulta em problemas respiratórios, intoxicação, entre outros. Além de que a exposição prolongada a

alguns compostos pode causar efeitos cumulativos, aumentando riscos de câncer e disfunções hepáticas (Leandro, 2021).

Entretanto, a preocupação não está somente nos frequentadores destes ambientes, mas também na parte externa destes locais, tanto no meio ambiente, quanto nos indivíduos que se encontram fora desses laboratórios ou em outros contaminados. Logo, a instalação de um SVLE ineficiente contribui com a dispersão de substâncias químicas no ar, colocando em risco o ecossistema e as pessoas que estão nas proximidades, segundo Verga Filho (2009 apud Fernandes et al., 2021).

Por isso, é imprescindível a presença de capelas de exaustão em laboratórios químicos. Este é um EPC que tem como função conter e remover vapores, partículas, gases tóxicos, fumos, névoas, quando estes são formados através da manipulação de reagentes químicos. Neste sentido, as capelas funcionam como um aspirador, exercendo a sucção de substâncias tóxicas antes que elas se espalhem pelo ambiente fechado (Fernandes et al., 2021). Diante disso, o presente trabalho descreve um estudo de caso de laboratórios de graduação de ensino superior, que manuseiam produtos químicos, de modo a analisar a estrutura do SVLE nas capelas destes ambientes. O objetivo foi analisar toda a estrutura do SVLE usado e verificar possíveis falhas, que podem afetar a segurança dos pesquisadores, estudantes e profissionais que atuam no local, além de aumentar os impactos ambientais.

Este estudo se justifica pela importância do SVLE para a segurança dos usuários do laboratório e da atmosfera, pela identificação de deficiências no atual sistema aplicado nos laboratórios analisados, pela aplicabilidade dos resultados em outros ambientes com desafios semelhantes (garantindo boas práticas de ventilação e segurança ocupacional) e pela conformidade com normas regulamentadoras. Assim, o presente estudo tem como objetivo contribuir para aperfeiçoar a segurança do laboratório, por meio de estudos técnicos sobre os sistemas de ventilação e a adequação destes às necessidades dos pesquisadores e às normas regulamentadoras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VENTILAÇÃO INDUSTRIAL

Ventilação industrial, de acordo com Archibald Joseph Macintyre (1990), que é o autor do livro “Ventilação Industrial e Controle de Poluição”, é a prática realizada por meios mecânicos para controlar a temperatura, a umidade, a distribuição do ar e eliminar contaminantes, como gases, vapores, fumos, poeiras, microrganismos, névoas e odores, que se alastram no interior de um ambiente fechado. Existem também poluentes que se encontram no ar quando excede o seu teor e concentração no local avaliado, podendo oferecer riscos à saúde dos frequentadores (Macintyre, 1990).

Ainda segundo Macintyre (1990), a ventilação industrial visa, além de eliminar ou minimizar a concentração de contaminantes no interior do local de trabalho, impedir que esses poluentes afetem outros ambientes, por meio de uma filtragem da fumaça, poeira, gases, vapores e partículas, deixando-os mais puros antes que sejam dispersados pela atmosfera. Tal filtragem deve ser feita fora do local de trabalho e enclausurada com combustão.

Os sistemas de ventilação industrial são classificados em Geral e Local Exaustora, conforme descritos a seguir (Macintyre, 1990):

- Sistema de Ventilação Geral: pode ser natural, quando o deslocamento do ar acontece por meio de janelas ou portas, sem o uso de recursos mecânicos; ou geral diluidora, quando é utilizado equipamentos mecânicos (ventiladores) para realizar a ventilação do local. Os objetivos da ventilação geral são: garantir o conforto, restabelecendo as condições ambientais do ar que foram modificadas pelo homem, refrigerando ou aquecendo o ar quando necessário e controlando a umidade do local; manter a saúde e segurança do frequentador do local, minimizando a concentração de particulados nocivos e controlando a concentração de gases, vapores e poeiras inflamáveis ou explosivos até os limites de segurança; e conservar em bom estado os materiais e os equipamentos.
- Sistema de Ventilação Local Exaustora: possui um captor de ar junto à uma fonte poluidora, que transfere o ar do local para a atmosfera ou para um sistema secundário para tratá-lo e removê-lo a um destino sem riscos de poluição ambiental, por meio de um sistema exaustor.

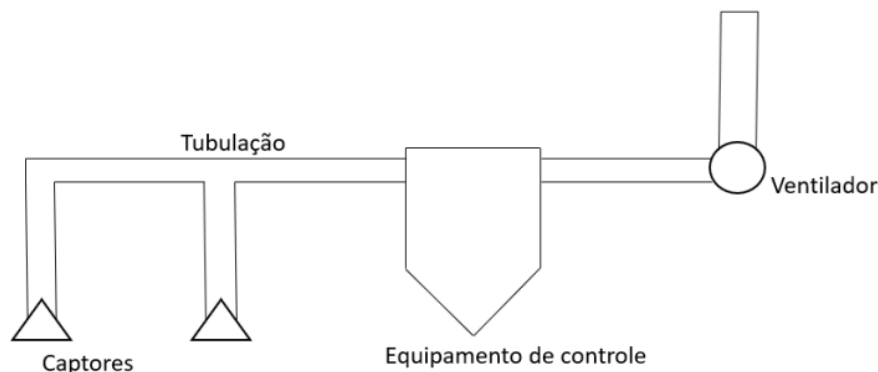
2.2 SISTEMA DE VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA

Segundo Macintyre (1990), SVLE atua para evitar que contaminantes se espalhem no ar e afetem a saúde dos frequentadores do local avaliado, captando os poluentes o mais próximo possível da fonte poluidora.

Esse sistema é composto por quatro partes que trabalham juntas (Figura 1), sendo elas, de acordo com Macintyre (1990):

- Captores: são os dispositivos posicionados próximos da fonte poluidora e captura o ar contaminado;
- Ventilador: responsável por produzir uma depressão (ou seja, uma pressão menor do que a atmosférica) que desloca o ar do captor à entrada do ventilador e até alcançar a pressão positiva. Assim, o ar sai do ventilador e atinge a atmosfera diretamente ou passa pelos filtros para tratamento antes de ser eliminado;
- Tubulação: é a rede de dutos que conduz o ar contaminado do captor ao ventilador e deste até o exterior da atmosfera ou até o sistema de tratamento;
- Equipamento de controle: são os dispositivos que coletam e retêm as partículas ou gases, evitando que estes sejam eliminados e despejados na atmosfera sem um tratamento anteriormente. Eles podem ser posicionados antes ou depois do ventilador.

Figura 1 - Componentes essenciais em um Sistema de Ventilação Local Exaustora.



Fonte: Giugni, 2022.

2.3 NORMAS TÉCNICAS

Os laboratórios, principalmente em instituições de ensino e pesquisa, são locais que podem oferecer riscos distintos, afetando a segurança e a saúde de seus usuários. Por isso, estes

locais devem seguir todas as normas técnicas e regulamentadoras necessárias, regidas pela Consolidação das Leis do Trabalho (CLT), para garantir a segurança dos trabalhadores, evitando a ocorrência de acidentes e de doenças ocupacionais (Geleski, 2015).

De acordo com a NR-1, todas as instituições ou empresas devem obrigatoriamente seguir todas as NR's quando se trata de prevenir acidentes e doenças ocupacionais, sendo considerada a norma-base para as demais NR's (Geleski, 2015).

Recentemente, houve a inclusão obrigatória do Gerenciamento de Riscos Ocupacionais - GRO com formalização por meio do Programa de Gerenciamento de Riscos - PGR, exigindo que as organizações identifiquem e avaliem os perigos presentes e os possíveis riscos, e implementem medidas adequadas que possa eliminar ou controlar tais riscos ocupacionais (Nederman, 2025).

Assim, a NR-1 deve ser aplicada aos laboratórios de ensino e pesquisa, analisando se possuem métodos que eliminam ou reduzem a inalação e o contato com substâncias tóxicas, inflamáveis ou cancerígenas (riscos químicos e biológicos). Esse objetivo pode ser alcançado utilizando SVLE, que são considerados medidas de proteção coletiva e devem ser previstos, monitorados e validados como parte do PGR.

Assim, serão apresentadas as normas relacionadas ao uso e à manutenção de um SVLE, de acordo com Geleski (2015), que são sistemas que garantem a segurança dos trabalhadores expostos a agentes químicos:

2.3.1. NR-9 – Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA).

A NR-9 exige que seja antecipado, reconhecido, avaliado e controlado os riscos ambientais (físicos, químicos, biológicos, de acidentes e ergonômicos) que possam comprometer a saúde e a integridade física dos trabalhadores nos locais de trabalho (Geleski, 2015).

Segundo Geleski (2015), o uso do SVLE em laboratórios químicos é uma das principais medidas de proteção coletiva recomendada pela NR-9, atuando para evitar a exposição dos frequentadores à agentes químicos por meio da captura e exaustão de vapores e contaminantes.

Além disso, a norma mencionada destaca a importância de manter os SVLE's bem projetados, instalados e com a manutenção frequente, garantindo a segurança em ambientes de trabalho, de acordo com NR-9.

2.3.2. NR-12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos.

De acordo com a NR-12, é obrigatório que o empregador adote medidas de proteção (coletivas, de organização do trabalho e individuais, necessariamente nessa ordem de prioridade) dos trabalhadores em máquinas e equipamentos, resguardando a saúde e a integridade física destes. Além disso, os frequentadores do local também devem participar de treinamentos para o uso e manuseio de equipamentos e instrumentos de trabalho, cumprir as orientações de segurança do trabalho no período de atividade e comunicar ao supervisor quando perceber que uma proteção foi removida, danificada ou perdeu sua função (Herlemann, 2019).

Destaca-se ainda que, conforme definido na norma NR-12, o projeto, a instalação e a verificação do funcionamento de sistemas de segurança devem ser realizadas por um profissional legalmente habilitado. Já em relação a emissão ou liberação de substâncias como agentes químicos, físicos e biológicos, devem ser adotadas medidas de controle adicionais para eliminação ou redução desses poluentes do local de trabalho (Herlemann, 2019).

2.3.3. NR-15 – Atividades e operações Insalubres.

A NR-15 estabelece os limites de tolerância e critérios que caracterizam as atividades que expõem os trabalhadores a agentes nocivos à saúde, gerando condições insalubres de trabalho. Ela também orienta quanto a necessidade de medidas de controle para uma exposição segura a tais riscos (Geleski, 2015).

No caso de laboratórios de química, a exposição dos frequentadores à vapores, gases e substâncias tóxicas e cancerígenas pode ultrapassar os limites estabelecidos pela norma, considerando essa condição no local como insalubre. Assim, a norma enfatiza a relevância da instalação e manutenção adequada de um SVLE em laboratórios e do monitoramento da exposição a esses agentes químicos, garantindo a segurança e a saúde dos frequentadores no local de trabalho (Geleski, 2015).

2.3.4. NBR 17154:2024 – Capelas de Exaustão de Gases e Vapores – Método de Ensaio.

A NBR 17154 (2024) de capelas de exaustão de gases e vapores estabelece alguns requisitos de desempenho e de segurança para projeto, instalação, operação e manutenção de sistemas de exaustão de poluentes em laboratórios de manuseio de produtos químicos, segundo a NBR 17154 (2024).

A norma identifica algumas exigências ao projetar e instalar sistemas de ventilação que devem ser cumpridas corretamente. A seguir, os requisitos conforme a NBR 17154 (2024):

- Velocidade de face das capelas: a velocidade média na abertura frontal da capela deve ser de 0,4 a 0,6 m/s, garantindo a adequada contenção dos vapores e gases;
- Requisitos de projeto do duto: o dimensionamento dos dutos deve levar em consideração a velocidade mínima de transporte dos poluentes, evitando, assim, o acúmulo de resíduos químicos nos dutos. Além disso, os materiais usados nos dutos devem ser resistentes a substâncias químicas, como o aço inox e o PVC industrial;
- Sistema de exaustão: a seleção do ventilador deve considerar a vazão e a pressão necessárias ao sistema em questão, incluindo perdas de carga em curvas, retas, junções e luvas de redução;
- Manutenção preventiva e corretiva: é obrigatório a realização de inspeções periódicas, limpeza dos dutos e aferição dos sensores;

Logo, a NBR 17154 (2024) é de extrema relevância para avaliar e readequar sistemas de ventilação, auxiliando na identificação de não conformidades em projetos mal instalados, ventilação ineficaz e riscos à saúde dos frequentadores devido à contaminação por substâncias tóxicas.

2.3.5. NBR 5648 – Tubos e Conexões de PVC-U com Junta Soldável para Sistemas Prediais de Água Fria – Requisitos.

A NBR 5648 estabelece requisitos para seleção de tubos e conexões com junta soldável, destinados a condução de água fria em instalações prediais. Ela define ainda dimensões nominais e espessura mínima da parede das tubulações.

Entretanto, para o presente relatório, essa norma foi utilizada somente para encontrar o valor da rugosidade média de tubos de PVC.

2.4 DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA

Um bom dimensionamento de um SVLE deve seguir as normas técnicas e alguns princípios da engenharia, garantindo, assim, uma eficiente captação de contaminantes, de acordo com Macintyre (1990). Logo, é importante se atentar aos seguintes pontos que compõem um SVLE Macintyre (1990):

- Captores (coifas): são responsáveis por capturar os contaminantes antes de serem dispersos pelo local. Por esse motivo, eles devem ser estrategicamente projetados

e posicionados na região de origem dos poluentes e de forma a gerar uma adequada velocidade de captura, sem a geração de turbulências.

- Velocidade de Captura (V_a): é a mínima velocidade que o ar deve atingir para direcionar os contaminantes à entrada da coifa. Essa velocidade é determinada de acordo com o tipo de poluente gerado no local, como gases, vapores ou partícula e com a distância da fonte (x).
- Dutos: suas dimensões devem ser calculadas de forma criteriosa para conseguir manter a velocidade de captura dos poluentes e para minimizar as perdas de carga.
- Ventiladores: deve ser levada em consideração a vazão do ar (Q) e a pressão estática total do sistema (sendo a soma das perdas de carga nos captores, nos dutos e, quando necessário, nos filtros) para a seleção do ventilador ideal ao sistema estudado.
- Filtros e tratamento do ar: em alguns casos, é necessário adicionar filtros, lavadores ou ciclones ao sistema, funcionando como uma espécie de purificação do ar antes da sua liberação no ambiente externo, evitando a contaminação de pessoas externas e da atmosfera.
- Descarga do ar (chaminé): também se faz necessário projetar chaminés ou outras formas de descarga do ar para evitar que os poluentes capturados entrem novamente ao local de origem e para cumprir normas ambientais. A altura da chaminé deve ser definida garantindo uma dispersão atmosférica segura.
- Cálculos de perdas de carga: para esses cálculos são usadas equações para encontrar as perdas por atrito, por mudanças de direção e por conexões. Esses cálculos de perdas são necessários para determinar a pressão total que o ventilador deve vencer, ou seja, é imprescindível para a escolha do ventilador adequado ao sistema.

Além disso, de acordo com Mesquita, Guimarães e Nefussi (1943), é essencial seguir algumas etapas de cálculo para alcançar o objetivo final, de definir o SVLE mais adequado para o local. A seguir serão descritos o passo-a-passo de dimensionamento de um SVLE, segundo Mesquita, Guimarães e Nefussi (1943):

- 1) Determinação da velocidade de captura: essa velocidade é tabelada, no livro de Macintyre (1990), de acordo com a condição de formação do contaminante e com o tipo de operação que existe no local avaliado, podendo variar entre 0,25 m/s e 1,0 m/s.

- 2) Cálculo de vazão de ar: é baseada na velocidade de captura necessária e na área aberta do captor/coifa. Logo, utiliza-se a Equação 1, em que V_a é a velocidade de captura, Q é a vazão do ar e A é a área aberta do captor.
- 3) Dimensionamento dos dutos: os dutos devem manter a velocidade de transporte adequada para evitar deposição de partículas nos dutos. Assim, o cálculo que deve ser feito para encontrar o diâmetro necessário para os dutos é a Equação 2, em que V_t é a velocidade de transporte do ar nos dutos e A_d é a área do duto necessária. Além disso, o aumento de perda de carga pode ocorrer devido ao comprimento, número de curvas (singularidades) e conexões.
- 4) Cálculo da perda de carga total:
 - a. Perda em trechos retos: determinar a resistência ao fluxo de ar nesses trechos de dutos;
 - b. Perdas por entradas abruptas;
 - c. Perdas por singularidades: curvas (impacto de mudanças de direção do fluxo de ar), expansões e contrações (efeitos das variações de diâmetro dos dutos), junções (influência de conexões entre segmentos de dutos diferentes) e chapéus chineses (para evitar que animais, insetos, chuvas e granizos entrem nos dutos);
 - d. A pressão total (ΔP) é a soma de todas as perdas que o ventilador precisa conseguir vencer.
- 5) Escolha do ventilador: essa seleção deve levar em consideração a curva característica do ventilador, que relaciona vazão e pressão. Além disso, é importante escolher um ponto de operação seguro e eficiente (zona estável da curva).
- 6) Tratamento e descarga: caso necessário, deve-se selecionar um filtro de ar antes da saída do contaminante e essa saída também deve ser bem projetada, com uma altura e orientações adequadas para evitar reentrada dos contaminantes ao ambiente de trabalho.

$$Q = V_a * A$$

Equação 1

$$A_d = Q/V_t$$

Equação 2

3 METODOLOGIA

3.1 PRIMEIRA VISITA E COLETA DE DADOS

Inicialmente, foram feitas duas visitas em laboratórios de graduação de ensino superior, que manuseiam produtos inorgânicos. Na primeira foi avaliada toda a estrutura do SVLE nas três capelas de exaustão apresentadas em um mesmo laboratório. Além da análise visual, também foram realizadas entrevistas aos técnicos do laboratório e professores da instituição sobre o que os incomodava, riscos que já enfrentaram, possíveis problemas que já observaram que podem ter influência de um SVLE mal estruturado, entre outras questões levantadas durante as análises e conversas. O objetivo dessas perguntas foi entender melhor o problema abordado como um todo, encontrando possíveis pequenas falhas que levam a ele, e as consequências da não resolução desses defeitos, mensurando a necessidade de resolvê-los.

3.2 SEGUNDA VISITA E COLETA DE MEDIÇÕES

Na segunda visita, já com algumas soluções em mente e com as medidas necessárias anotadas, foram coletadas medições, utilizando uma trena a laser digital da marca Milessey, com resolução de 0,001 m (Figura 2). São elas:

- Dimensões das capelas, da marca Centauro (Figura 3), já instaladas (comprimento, profundidade e altura total e altura e comprimento da abertura frontal);
- Distância de cada capela até a parede onde passam as tubulações até a região externa;
- Comprimento disponível na parede para os dutos;
- Altura do ponto de passagem da tubulação até o telhado;
- Distância horizontal da parede até o fim do telhado.

Figura 2 - Trena a laser digital da marca Milessey.



Fonte: próprio autor.

Figura 3 – Capela da marca Centauro já instalada nos laboratórios.



Fonte: próprio autor.

Assim, com a área da abertura frontal da capela (A_{face}), calculada por meio das dimensões encontradas e da Equação 3 ($b_{abertura}$ sendo o comprimento e $h_{abertura}$ sendo a altura), e com a velocidade mínima do ar na abertura frontal (V_{face}) recomendada pela norma NBR 17154 (ABNT, 2013), foi descoberta a vazão de ar ideal do exaustor por meio da Equação 4.

$$A_{face} = b_{abertura} * h_{abertura}$$

Equação 3

$$V_{face} = \frac{Q}{A_{face}}$$

Equação 4

3.3 DIMENSIONAMENTO DE DUTOS

Após essa primeira análise, foram calculadas as dimensões ideais para os dutos, considerando a faixa de velocidade de transporte do ar (V_t) nos dutos determinada pela NBR 17154 (ABNT, 2013) para sistemas de exaustão química, por meio da Equação 2 e, considerando ainda o diâmetro do duto (Figura 4) de saída das capelas já instaladas nos laboratórios.

Figura 4 – Diâmetro nominal (DN) especificado no duto.



Fonte: próprio autor.

Outro ponto importante foi verificar qual comprimento de tubulação deveria ser usado para atender à todas as especificações exigidas para construir um ambiente confortável e seguro. Assim, foram consideradas as medições já realizadas anteriormente. Além disso, foi definida a quantidade de cotovelos, junções e chapéus necessários, objetivando dutos saindo das capelas e sendo direcionados para cima do telhado, evitando, assim, uma possível contaminação em laboratórios e salas dos outros andares devido à ventos direcionados ao prédio em questão.

3.4 PERDAS DE CARGA

O próximo passo foi encontrar a perda de carga do sistema para selecionar o ventilador ideal, que atenda à vazão de ar após passar por perdas durante seu trajeto até o fim da tubulação. Para isso, precisou-se calcular as perdas de carga possíveis separadamente. Iniciando com a perda por entrada abrupta de ar (ΔP_e em pascal), usando a Equação 5, e os valores de coeficiente de entrada (K_e) e de densidade do ar (ρ em kg/m^3) tabelados.

$$\Delta P_e = K_e * \frac{\rho * V_t^2}{2} \quad \text{Equação 5}$$

Em seguida calculou-se a perda em trechos retos (ΔP_r), causada pelo atrito entre o ar em movimento e as paredes do duto, usando a Equação 6, em que f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach, L é o comprimento do trecho reto em metros e D é o diâmetro do tubo em metros.

$$\Delta P_r = f * \frac{L}{D} * \rho * \frac{V_t^2}{2} \quad \text{Equação 6}$$

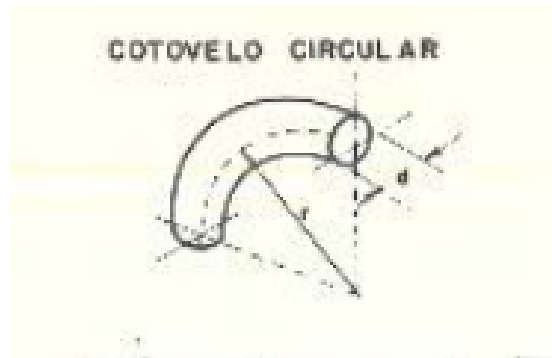
O fator de atrito depende do número de Reynolds (R_e). Este determina o regime do escoamento (laminar, transição e turbulento) pela Equação 7, em que μ é a viscosidade dinâmica do ar em $Pa * s$. O fator de atrito depende também da rugosidade relativa do duto ($\frac{\varepsilon}{D}$), em que ε é a rugosidade da parede interna do tubo. Assim, a equação que determina esse fator é a Equação 8 descrita abaixo.

$$R_e = \frac{\rho * V_t * D}{\mu} \quad \text{Equação 7}$$

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}} \right) \right]^2} \quad \text{Equação 8}$$

Por último, calculou-se a perda de carga em cotovelos e em outras singularidades (junções, contrações e chapéus). Primeiramente, foi necessário medir o raio de curvatura (r) dos cotovelos circulares de 90° para encontrar a relação $\frac{r}{D}$ (identificadas no cotovelo da Figura 5) e descobrir o coeficiente k , utilizando a Tabela 1 para, assim, calcular as perdas de carga. Já para cotovelos de 45° , o coeficiente k é um valor único aproximado de acordo com ASHRAE (2019).

Figura 5 – Referências de r e d em cotovelo circular de 90°.



Fonte: Mesquita, Guimarães e Nefussi, 1977.

Tabela 1 – Valores de k de acordo com a relação de r e d.

Relação r/d	Coefficiente k
2,75	0,25
2,50	0,22
2,25	0,26
2,00	0,27
1,75	0,32
1,50	0,39
1,25	0,55

Fonte: próprio autor.

Em segundo plano, foi encontrado o valor de perda de carga causada pela junção em Y ou em T dos ramais da tubulação de cada capela e pela singularidade de redução de diâmetro ou de contração de junção, usando a Equação 9 (fórmula de Darcy-Weisbach adaptada para o fim desejado) e os valores recomendados de fator de perda adimensional K . A Equação 9 para o cálculo da perda (ΔP) em junções Y e T considera a velocidade (V) sendo a velocidade de transporte do ar nas tubulações e o K é o coeficiente já estabelecido em ramal lateral (fluxo secundário) e em ramal reto (fluxo primário), apresentado na Tabela 2, de acordo com ASHRAE (2019). Já para a perda de carga em contração de junção, a velocidade considerada é a velocidade no duto menor após a redução de diâmetro e o K é o coeficiente que depende do tipo de redução e da razão entre a área maior e a área menor, ou seja, após a redução (Tabela 3).

$$\Delta P = K * \frac{\rho * V^2}{2}$$

Equação 9

Tabela 2 – Fator de perda adimensional K para T e Y.

Tipo de Junção	Ângulo	Ramo analisado	K recomendado
Y com entrada lateral	45°	Entrada lateral (secundária)	0,3 a 0,5
Y com entrada lateral	30°	Entrada lateral (secundária)	0,2 a 0,4
Y com entrada lateral	60°	Entrada lateral (secundária)	0,5 a 0,6
Y ou T	90°	Entrada lateral (secundária)	1,0 a 2,0
Y com passagem reta	-	Ramo reto (principal)	0,1 a 0,2

Fonte: próprio autor.

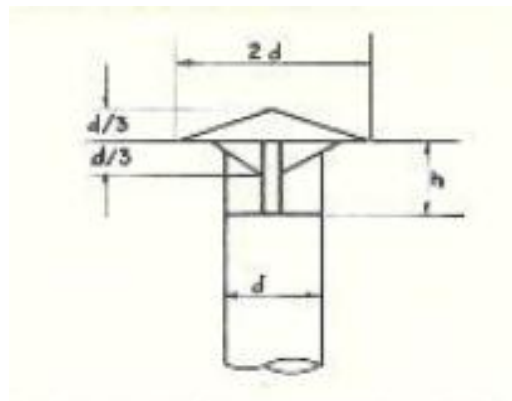
Tabela 3 – Fator de perda adimensional K para contração de junção.

Tipo de Redução	Relação de áreas A_1/A_2	K recomendado
Redução Abrupta	1,5 – 3,0	0,3 a 0,8
Redução Cônica 30°	-	0,1 a 0,2
Redução Cônica 15°	-	0,05 a 0,1

Fonte: próprio autor.

Outra singularidade que deve ser considerada para cálculo de perda de carga é o chapéu chinês, que deve ser posicionado no terminal dos dutos. por meio da Tabela 4, utilizando a relação $\frac{h}{d}$, sendo h a altura da haste do chapéu e d o diâmetro da base da singularidade, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Referências de d e h no chapéu chinês.



Fonte: Mesquita, Guimarães e Nefussi, 1977.

Tabela 4 – Valores de k de acordo com a relação de h e d.

Relação h/d	Coefficiente k
1,00	0,10
0,75	0,18
0,70	0,22
0,65	0,30
0,60	0,41
0,55	0,56
0,50	0,73
0,45	1,00

Fonte: próprio autor.

Por fim, após encontrar todas as perdas de carga existentes no sistema, foram somadas para chegar ao resultado final de perda de carga total (ΔP_t).

3.5 SELEÇÃO DO EXAUSTOR E SUA LOCALIZAÇÃO

Com o resultado de perda de carga total, foram realizadas buscas pela internet para encontrar o exaustor ideal para cada capela e um exaustor único sendo compartilhado pelas três capelas.

Em seguida, foi analisado qual seria o local ideal para a instalação dos exaustores já que o laboratório de estudos exige que seja um ambiente com ruído baixo, para permitir a comunicação dos discentes com seus docentes e vice-versa e para possibilitar um tempo maior de permanência no local avaliado de forma confortável e segura.

3.6 VEDAÇÃO DA BASE DAS CAPELAS

Além dessas informações para o dimensionamento de um SVLE em capelas de laboratórios de química, também foi necessário dimensionar a quantidade (em gramas) de silicone usado para vedar a base das três capelas. Esse dimensionamento se deu por meio do cálculo do perímetro da base das capelas (p_{base}), utilizando as medições das capelas analisadas.

Outro ponto considerado foi as instruções técnicas do manual do fabricante (que será explicitado no tópico de resultados) para cálculo da área do cordão (A_c) do tipo triangular (usando a equação de triângulo isósceles, Equação 10, em que $b_{cordão}$ é a base do triângulo/largura da junta em metros e $h_{cordão}$ é a altura/profundidade de aplicação), mais usado

para vedação em bancadas de teste, de acordo com ASTM C1193. Isso porque facilita um acabamento limpo evitando sobras exageradas, adere melhor entre superfícies de 9°, evita bolhas e falhas por excesso de material e possui fácil aplicação com o dedo molhado ou com espátulas chanfradas.

$$A_c = \frac{b_{\text{cordão}} * h_{\text{cordão}}}{2} \quad \text{Equação 10}$$

Para o volume total necessário (V_{total}), utilizou o volume por metro quadrado (V_{m^2}) também recomendado pelo manual do fabricante e o perímetro calculado que será vedado (Equação 11). Por fim, calculou a massa total (M_P), em gramas, que seria utilizada, considerando o volume total encontrado e a densidade média ($d_{silicone}$) do silicone informada pelo manual do fabricante (Equação 12).

$$V_{total} = V_{m^2} * p_{base} \quad \text{Equação 11}$$

$$M_P = V_{total} * d_{silicone} \quad \text{Equação 12}$$

4 RESULTADOS

Na primeira visita a um laboratório do IQ2 foram observadas falhas visíveis do sistema, abaixo estão listados alguns desses problemas:

Problema 1 - Altura do terminal da tubulação ineficiente (Figura 7): possibilitando que o ar contaminado entre nos laboratórios do piso 1 do prédio por meio de janelas abertas.

Figura 7 – Altura do duto sem filtragem na mesma direção das janelas do piso 1 do prédio do IQ2.



Fonte: próprio autor.

Problema 2 - A velocidade de transporte não é o suficiente para o ar contaminado sair ao final da tubulação, pois quando as capelas são desligadas há vazamento (podendo ser identificada por meio da ferrugem apresentada na Figura 8) devido aos reagentes condensarem durante seu trajeto nos dutos.

Figura 8 – Ferrugem apresentada no duto próximo ao arco de ferro devido ao vazamento de reagentes.



Fonte: próprio autor.

Problema 3 - Terminações retas e expostas ao ambiente externo: as aberturas dos dutos não são devidamente cobertas, não impedindo a entrada de chuva e de animais/insetos externos aos laboratórios (Figura 7).

Problema 4 - Presença de elevado nível de pressão sonora (ruído, mais popularmente conhecido, acima de 50dB é desconfortável para laboratórios de ensino e pesquisa, de acordo com a NBR 10152, 2017): devido ao transporte de ar nas tubulações e aos motores de cada capela posicionados dentro dos laboratórios dificultando aos professores lecionar.

Problema 5 - Falta de vedação na capela (Figura 9): causando derramamento de componentes químicos para fora da capela.

Figura 9 – Presença de aberturas na parte inferior da capela.



Fonte: próprio autor.

Problema 6 - Presença de fios elétricos expostos dentro da capela (Figura 10) e a ausência de um botão ou um sensor de desligamento de emergência: houve relato de incêndio na capela e quase explosão devido ao contato com ácidos do laboratório. Após esse acontecido, foi possível desligar o motor apenas retirando o cabo da tomada que está posicionada atrás da capela, já que o botão presente para desligar o exaustor está conectado ao fio, onde houve o aparecimento de fumaça.

Figura 10 – Fios elétricos expostos.



Fonte: próprio autor.

Por conta dessas falhas encontradas, foram propostas algumas soluções para cada uma delas que serão apresentadas a seguir.

4.1 SOLUÇÃO PARA OS PROBLEMAS 1, 2 E 3

Para os problemas 1, 2 e 3 apresentados anteriormente e identificados nas Figuras 7 e 8, foi indicada a realização de um novo dimensionamento de dutos e, conseqüentemente, dos exaustores utilizados.

Assim, para esse dimensionamento, foram propostas duas soluções, que serão abordadas em tópicos. Uma delas considerando as três capelas compartilhando uma mesma tubulação e um mesmo exaustor, isso foi idealizado pensando em reduzir a quantidade de motores necessários e em obrigatoriamente ter que ligar todas as capelas ao mesmo tempo, evitando que os contaminantes entrem em uma capela e voltem por outra. E a outra solução foi pensando em

uma tubulação e um exaustor para cada uma das três capelas separadamente, dando opção para ligar uma capela por vez e podendo usar tubulações de mesmo diâmetro. Para melhor entendimento, serão abordadas cada um dos dimensionamentos de forma detalhada.

Primeiramente, para os dois casos, considerou $V_{face} = 0,5 \text{ m/s}$, $h_{abertura} = 1,1 \text{ m}$ e $b_{abertura} = 0,8 \text{ m}$, logo $A_{face} = 0,9 \text{ m}^2$. Assim, usando a Equação 4, chegou-se a uma vazão individual (por capela) de $Q = 0,4 \text{ m}^3/\text{s} = 1570 \text{ m}^3/\text{h}$ e, somando a vazão total (Q_T) das três capelas, $Q_T = 1,3 \text{ m}^3/\text{s} = 4710 \text{ m}^3/\text{h}$.

Após essa análise, ainda foi levado em consideração para as duas soluções alguns pontos, são eles:

- Um comprimento de duto de $0,3 \text{ m}$ saindo de cada capela;
- As distâncias do centro das capelas 1 (mais próxima da parede), 2 e 3 (mais distante da parede) até a parede de $0,8 \text{ m}$, $3,8 \text{ m}$ e $5,4 \text{ m}$, respectivamente;
- O comprimento da parede para inserção das tubulações de $1,1 \text{ m}$;
- O comprimento da parede até a direção do telhado de $3,8 \text{ m}$;
- A altura do ponto de passagem dos tubos até o telhado de $5,3 \text{ m}$;
- As dimensões das capelas para cálculo de perda de carga por entrada abrupta, de altura de $h_{capela} = 1,3 \text{ m}$, comprimento de $b_{capela} = 1,5 \text{ m}$ e profundidade de $L_{capela} = 0,6 \text{ m}$.

Outro ponto que foi levado em conta para os dois casos, foi a necessidade de a tubulação exceder no mínimo 2m de altura do telhado para que, em situações normais, os gases e vapores emitidos sejam diluídos no ar antes de alcançar qualquer outra sala, segundo Oliveira (2018). Por esse motivo, não houve necessidade de instalação de um filtro ou lavador de gases, vapores e partículas nocivas à saúde.

4.1.1 Caso 1

Para a primeira solução, inicialmente, usando a Equação 2, a vazão calculada e a velocidade limite de transporte do ar nos dutos de 15 m/s , recomendada pela NBR 17154 (2013) para manuseio de vapores, gases e poeiras leves (sílica leve, farinha), foi dimensionada a tubulação ideal saindo de cada uma das três capelas, em todo o trajeto até a eliminação do ar no ambiente externo.

Assim, analisando a Equação 2 percebe-se que a vazão e a área são diretamente proporcionais, ou seja, considerando a capela 3 com a vazão menor, o diâmetro do duto que sai dela deve ser o menor quando comparado com os diâmetros das outras duas capelas. Isso porque

a vazão da segunda capela é o somatório de vazão das duas capelas e a da primeira é o somatório das três capelas, sendo a que deverá ter o maior diâmetro de tubulação saindo por ela. Pensando nisso, recomendou-se realizar um ajuste do diâmetro de saída das capelas 1 e 2, já que precisarão de uma tubulação de diâmetro maior do que o da capela 3. A Tabela 5 apresenta os resultados de diâmetro de cada tubulação de acordo com suas vazões.

Tabela 5 – Dimensões de tubulação de cada capela.

Capelas	Vazão de ar (m^3/s)	Diâmetro de tubulação calculado (mm)	Diâmetro Comercial de tubulação (mm)	Área de tubulação (m^2)
3	0,4	192	200	0,03
2	0,9	272	300	0,07
1	1,3	333	350	0,09

Fonte: próprio autor.

Nos estudos de Ferrari (2021) de SVLE para estação de soldagem foram encontradas vazões de 0,4 , 0,7 e 0,9 m^3/s para diâmetros de 220, 280 e 320 mm, respectivamente. Entretanto, podemos perceber que nos dois últimos casos houve uma grande diferença entre esse estudo relatado e o das capelas abordado no presente relatório. Isso, aconteceu pelo fato de Ferrari ter usado uma velocidade de transporte diferente da utilizada para os cálculos mencionados, de 12 m/s. Assim, usando a mesma velocidade do presente estudo (15 m/s) e recalculando o caso de Ferrari, é possível perceber que as vazões calculadas para cada uma das três capelas instaladas nos laboratórios de química, se aproximam dos valores mencionados pelo autor da obra (veja a comparação na Tabela 6).

Tabela 6 – Dimensões de tubulação de cada capela.

Capelas	Vazão de ar (m^3/s)	Diâmetro de tubulação calculado (mm)	Vazão de ar (m^3/s) (Ferrari, 2021)	Diâmetro de tubulação (mm) (Ferrari, 2021)	Diferença de Vazões (%)
3	0,4	192	0,6	220	23,5
2	0,9	272	0,9	280	5,6
1	1,3	333	1,2	320	8,4

Fonte: próprio autor.

Logo, foram selecionados tubos de PVC da marca Belfano (2025) de diâmetros nominais externos de 200 mm, 300 mm e 350 mm (Figura 11). Essa marca foi selecionada por possuir dutos com os diâmetros necessários mencionados anteriormente.

Figura 11 – Dutos de PVC selecionados da marca Belfano.



Fonte: Belfano (2025).

Após o dimensionamento da tubulação, iniciou-se os cálculos de perdas de carga por entrada abrupta de ar em cada capela, usando a Equação 5, em que $\rho_{ar} = 1,3 \text{ kg/m}^3$ e $K_e = 0,5$ (recomendada por ASHRAE, 2019, de entradas abruptas em capelas), atingindo um resultado de $\Delta P_e = 73,1 \text{ Pa}$ por capela. Ou seja, $\Delta P_{e_{total}} = 219,4 \text{ Pa}$, considerando as três capelas.

Em segundo plano, foi calculada a perda de carga em trechos retos do duto, considerando o comprimento de trechos retos de cada tubulação com diâmetro diferente. Esse cálculo foi feito baseado nos valores mencionados anteriormente de distância entre capelas, entre parede e capela e entre parede e telhado.

Para o tubo de 200 mm de diâmetro, considerou 0,3 m saindo da capela 3 e 1,6 m da tubulação que parte do centro da capela 3 até a metade da capela 2. Para o tubo de 300 mm, também foi considerado 0,3 m saindo da capela 2 e 3,0 m da tubulação que inicia no centro da capela 2 até atingir a metade da capela 1. E para o tubo de 350 mm, foi somado 0,3 m saindo da capela 1, o duto que sai da metade da capela 1 até alcançar a parede (0,8 m), o duto da parede até a direção do telhado (3,8 m), o comprimento vertical do ponto de passagem da tubulação da parede até o telhado (5,3 m) e a altura mínima de segurança que a tubulação deve exceder o telhado (2 m).

Assim, foram utilizadas as Equações 6, 7 e 8 (considerando a viscosidade do ar de $\mu = 17,2 * 10^{-6} \text{ Pa} * \text{s}$ e a rugosidade da parede interna dos tubos de $1,5 * 10^{-6} \text{ mm}$ padronizada pela norma NBR 5648) para encontrar a perda de carga em cada uma dessas tubulações e, somando-as, determinou-se a perda de carga em todos os trechos retos do duto de $\Delta P_{r_{total}} = 114,3 \text{ Pa}$ (resultados mostrados na Tabela 7).

Tabela 7 – Comprimento de trechos retos de cada tubulação.

Diâmetro do tubo (mm)	Comprimento da tubulação (m)	Número de Reynolds (Re)	Fator de atrito (f)	Perda de carga (Pa)
200	1,9	226744,2	0,015	21,6
300	3,3	340116,3	0,014	22,8
350	12,2	396802,3	0,014	69,8

Fonte: próprio autor.

Assim, utilizando o mesmo estudo de Ferrari (2021), é perceptível que os resultados encontrados acima de perda de carga estão coerentes. Isso porque, considerando o duto S2 do artigo mencionado (com a rugosidade mais aproximada do presente estudo) e realizando ajustes que se encaixam aos comprimentos de tubulação do sistema do presente relatório, os valores encontrados de perda de carga, mostrados na Tabela 8, obtiveram diferenças discretas.

Tabela 8 – Comparação de perdas de carga entre o presente estudo e o caso de Ferrari (2021).

Diâmetro do tubo (mm)	Comprimento da tubulação (m)	Perda de carga (Pa)	Perda de carga (Pa) (Ferrari, 2021)	Diferença de Perda de Carga (%)
200	1,9	21,6	17,9	20,7
300	3,3	22,8	23,2	1,6
350	12,2	69,8	85,6	18,4

Fonte: próprio autor.

O terceiro passo foi calcular a perda de carga em singularidades. Iniciou-se pelas junções em Y, que foram selecionadas analisando em quais situações o coeficiente K é menor, na Tabela 2, para que, conseqüentemente, a perda de carga seja reduzida. Assim, foi escolhida a junção em Y com passagem reta. Além disso, de acordo com o sistema de três capelas compartilhando uma mesma tubulação, necessitou de 2 junções de configuração Y (uma na capela 2 e outra na 1) e considerou o maior coeficiente de perda de carga ($K = 0,2$) para analisar um possível pior caso. Logo, usando a Equação 9 e considerando as duas junções, foi encontrado o valor de perda de carga de $\Delta P_{Y_{total}} = 58,5 Pa$. Assim, foram selecionadas junções em Y com passagem reta da marca Belfano (2025) e modelo CS-J Junção ou TE 45°, com 300 mm e 350 mm de diâmetro, respectivamente (Figura 12).

Figura 12 – Conexões em Y com passagem reta (ramo principal).



Fonte: Belfano (2025).

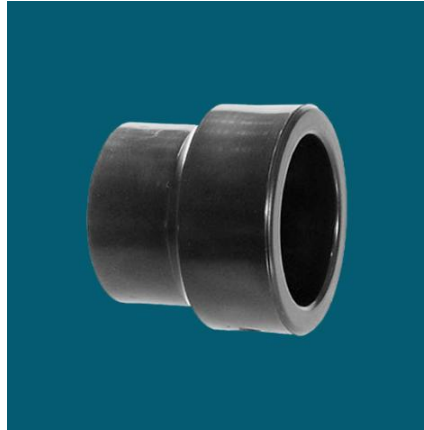
Em seguida, ainda dentro das singularidades existentes no sistema, foi calculada a perda ocorrida nas contrações de junções. Assim, usando como referência a Tabela 2 e considerando uma junção (J1) entre as capelas 1 e 2 e outra (J2) entre as capelas 2 e 3, a primeira relação de áreas A_{350}/A_{300} da tubulação alcançou um resultado menor que 1,5, devendo usar uma contração de junção com redução cônica 30°; já a segunda relação (A_{300}/A_{200}) resultou em um valor entre 1,5 e 3,0, que, por meio de uma interpolação de acordo com os valores da Tabela 2, chegou ao resultado mostrado na Tabela 9. Além dessas junções, para se adaptar ao exaustor encontrado no mercado com entrada e saída de 300 mm de diâmetro e como o exaustor será instalado entre duas tubulações de 350 mm, precisou adicionar mais uma junção (J3) com a mesma relação de áreas da junção entre capela 1 e 2 (A_{350}/A_{300}) e outra (J4) com relação de áreas de A_{300}/A_{350} , obtendo um valor menor do que 1,5 e podendo usar uma redução do tipo cônica 30°. Logo, com esses valores encontrou o coeficiente K ideal e as perdas de carga, por meio da Equação 9, para cada uma das junções (Tabela 9). Encontrando, assim, um resultado da soma das perdas de $\Delta P_{CJ_{total}} = 168,2 Pa$ e usando contrações de junções abruptas da marca Belfano (2025) e modelo CS-15 de 300 x 200 (Figura 13) e contrações cônicas de 30° da marca Nova Exaustores (2025) de 350 x 300 e de 300 x 350 (Figura 14).

Tabela 9 – Resultados de relação de áreas, coeficiente K e perdas de carga das contrações de junções.

Quantidade de junções	Relação de áreas	Relação de áreas	Tipo de redução	Coeficiente K	Perda de carga (Pa)
2	A_{350}/A_{300}	1,4	Cônica 30°	0,2	29,2
1	A_{300}/A_{200}	2,2	Abrupta	0,6	80,4
1	A_{300}/A_{350}	0,7	Cônica 30°	0,2	29,2

Fonte: próprio autor.

Figura 13 – Conexão de contração de junção abrupta em PVC.



Fonte: Belfano, 2025.

Figura 14 – Conexão de contração de junção cônica de 30° e chapa galvanizada.



Fonte: Nova Exaustores, 2025.

Outra singularidade que deve ser levada em conta para cálculo de perda de carga é a de cotovelos para desvio de direção da tubulação. No sistema em questão, foi necessário adicionar três cotovelos de 90°, uma na tubulação de diâmetro de 200 mm da capela 3, outras duas no duto de diâmetro de 350 mm que sai da capela 1 (um na saída do exaustor para direcionar o tubo horizontalmente para a esquerda e um para direcioná-lo na vertical para cima), e dois cotovelos de 45° nas duas junções Y para conectá-las nas capelas 1 e 2. Para o cálculo de perda de carga nos cotovelos de 90°, utilizou-se a Figura 5 como referência e, percebendo que para uma maior relação de raio do cotovelo e diâmetro do tubo (r/D) menor seria o coeficiente K , optou-se por considerar $K = 0,22$. Assim, usando a relação $\frac{r}{D} = 2,50$ (o raio dos cotovelos da capela 1 foi de $r_1 = 0,9 m$ e o da capela 3 foi de $r_2 = 0,5 m$) e a Equação 9, alcançou valores de perda de carga mostrados na Tabela 10. Já para encontrar as perdas em cotovelos de 45°, foi utilizada a mesma Equação 9, porém com coeficiente K padronizado pelo ASHRAE (2019) de 2,0 (veja os resultados na Tabela 10). Assim, o resultado final somando todas as perdas foi de $\Delta P_{C_{total}} = 155,0 Pa$.

Tabela 10 – Perdas de carga em cada cotovelo.

Local de inserção dos cotovelos no duto	Perda de Carga (Pa)	
	Cotovelo 90°	Cotovelo 45°
Duto Capela 1	32,2	29,2
Duto Capela 2	-	29,2
Duto Capela 3	64,4	-

Fonte: próprio autor.

Logo, considerando os resultados para 3 cotovelos de 90° no sistema dimensionado e comparando-os com os valores calculados nos estudos de Ferrari (2021), podem ser identificados valores aproximados dos dois casos. Já que no estudo de Ferrari (2021), foram utilizados quatro cotovelos de 90° e encontrado uma perda de carga de 110,8 Pa , enquanto que somando as perdas dos três cotovelos usados no SVLE das três capelas dos laboratórios de química foi encontrado um valor de 96,5 Pa .

Além disso, para o único cotovelo de 45° usado no estudo de Ferrari (2021) foi calculada uma perda de 37,4 Pa , enquanto que, para o caso das capelas, foi encontrada uma perda de 29,2 Pa em um único cotovelo de 45°. A Tabela 11 mostra a aproximação nos resultados dos dois estudos.

Tabela 11 – Comparação de perdas de carga entre o presente estudo e o caso de Ferrari (2021).

Quantidade de Cotovelos	Perda de Carga (Pa)		Perda de Carga (Pa) (Ferrari, 2021)		Diferença de Perda de Carga (%)	
	Cotovelo 90°	Cotovelo 45°	Cotovelo 90°	Cotovelo 45°	Cotovelo 90°	Cotovelo 45°
	1	32,2	29,2	27,7	37,4	16,2

Fonte: próprio autor.

Para os três cotovelos de 90° com especificações de raios de curvatura será necessário realizar pedido sob encomenda com a empresa Tec Dutos (2025), que faz esse tipo de pedido. Já para os cotovelos de 45° foram selecionados dois (um de 350 mm e outro de 300 mm para as capelas 1 e 2, respectivamente) de bitola do tipo CS-09 curva 45° soldável da marca Belfano (2025), veja a Figura 15.

Figura 15 – Curva de 90°.



Fonte: Belfano, 2025.

Por fim, considerando as singularidades, foi calculada a perda que ocorre no chapéu chinês, que foi instalado no terminal da tubulação de 350 mm para impedir a passagem de chuva, granizos, entre outros. Para esse cálculo, considerou o dimensionamento de chapéu ilustrado na Figura 6 (em que a altura é $2 * \frac{D}{3} = 0,23m$ e o comprimento é $2 * D = 0,70m$) e encontrou a relação da altura e do diâmetro do duto ($\frac{h}{D} = 0,67$). Assim, usando os valores de K da Figura 6 e fazendo uma interpolação, foi encontrado o $K = 0,26$ e a perda de carga, utilizando a Equação 9, é $\Delta P_{CC} = 39,2 Pa$. Logo, o chapéu selecionado foi a do tipo chapéu aba galvanizado da marca Nortuflex (2025) com diâmetro de 350 mm (Figura 16).

Figura 16 – Chapéu chinês da marca Nortuflex.



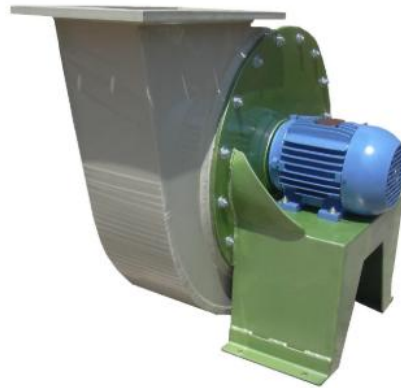
Diâmetros disponíveis: desde 80 a 400

Fonte: Nortuflex, 2025.

Concluindo, então, que o exaustor selecionado precisa suportar a vazão da soma das três capelas equivalente a $Q = 1,3 m^3/s = 4710 m^3/h$ e a pressão do sistema considerando o

somatório das perdas de carga equivalente a $\Delta P = 754,6 Pa = 77,0 mmca$, garantindo uma faixa de segurança acima desses valores. Logo, o exaustor escolhido foi o centrífugo em propileno de modelo TBL-Série 10, Tipo Limit Load e marca Belfano (Figura 17), com todas as especificações do produto explicitadas pela proposta do fornecedor mostradas na Tabela 12.

Figura 17 – Exaustor de modelo TBL-Série 10, Tipo Limit Load.



Fonte: Belfano, 2025.

Tabela 12 – Especificações do exaustor selecionado da Belfano.

Modelo	10-300
Tipo	Limit Load
Carcaça	Polipropileno
Rotor	PP
Acionamento	Direto no eixo motor
Vazão (m^3/h)	3300-5500
Pressão ($mmca$)	90-63
Entrada/Saída	Ø300mm/Transição para saída Ø300
Potência motor (CV)	4,0
Características motor	WEG, W22, IR3, Standard isolamento F, IP55, trifásico, 220V ou 380V, pintura no padrão do fabricante.
Rotação (rpm)	1750
Cavalete	Aço carbono – Pintura padrão Belfano
Altura piso até a caixa de saída da voluta	580 mm
Comprimento da extremidade do motor até a face do flange de entrada da voluta	665 mm
Largura da caixa da voluta	680 mm

Fonte: Belfano, 2025.

Logo, os resultados de vazão e pressão totais atingiram valores semelhantes para sistemas com exaustores compartilhados encontrados no estudo de Almeida et al. (2018). Os autores

utilizar tubos com esse mesmo diâmetro, já que, utilizando a Equação 2, percebeu-se que a velocidade de transporte seria $V_t = 13,9 \text{ m/s}$, permanecendo dentro da faixa de $10 - 15 \text{ m/s}$ recomendada pela NBR 17154 (2013) e alcançando um valor próximo ao encontrado nos estudos de Ferrari (2021) de $11,4 \text{ m/s}$ em tubulações de 220 mm de diâmetro. Logo, foram selecionados dutos da mesma marca do primeiro caso (Belfano, 2025), como identificado na Figura 11.

Após o dimensionamento da tubulação, iniciou-se os cálculos de perdas de carga por entrada abrupta de ar em cada capela, usando a Equação 5, em que $\rho_{ar} = 1,3 \text{ kg/m}^3$ e $K_e = 0,5$ para entradas abruptas de ar, de acordo com ASHRAE (2019), atingindo um resultado de $\Delta P_e = 62,6 \text{ Pa}$ por capela.

Em segundo plano, foi calculada a perda de carga em trechos retos do duto, considerando o comprimento de trechos retos de cada tubulação individualmente. Esse cálculo foi feito baseado nos valores mencionados anteriormente de distância de cada capela até a parede (capela 1 = $0,8 \text{ m}$, capela 2 = $3,8 \text{ m}$ e capela 3 = $5,4 \text{ m}$) e entre parede e telhado (comprimento = $3,8 \text{ m}$ e altura = $5,3 \text{ m} + 2 \text{ m} = 7,3 \text{ m}$), considerando também $0,3 \text{ m}$ saindo de cada uma das três capelas e que a capela 2 precisará que seu duto se desloque pelo menos $0,25 \text{ m}$ para frente para sair da direção da capela 1 e o duto da capela 3 precisará se deslocar $0,5 \text{ m}$ para frente também para sair da direção das capelas 1 e 2, assim, o comprimento total ocupado pelos dutos na parede será de $0,2 * 3 + 0,25 * 2 = 1,1 \text{ m}$, não ultrapassando o comprimento disponível de parede já mencionado anteriormente de $1,1 \text{ m}$. Assim, o comprimento de duto de cada capela é mostrado na Tabela 13.

Em seguida, foram utilizadas as Equações 6, 7 e 8 (considerando a viscosidade do ar de $\mu = 17,2 * 10^{-6} \text{ Pa} * \text{s}$ e a rugosidade da parede interna dos tubos de $1,5 * 10^{-6} \text{ mm}$ padronizada pela norma NBR 5648) para encontrar a perda de carga em cada uma dessas tubulações (veja os resultados na Tabela 13).

Tabela 13 – Comprimento de trechos retos de cada tubulação e perdas de carga calculadas.

Capela	Diâmetro do tubo (<i>mm</i>)	Comprimento da tubulação (<i>m</i>)	Número de Reynolds (<i>Re</i>)	Fator de atrito (<i>f</i>)	Perda de carga (<i>Pa</i>)
1	200	12,2	209788,4	0,015	118,0
2	200	15,5	209788,4	0,015	149,6
3	200	17,3	209788,4	0,015	167,9

Fonte: próprio autor.

Assim, utilizando o mesmo estudo de Ferrari (2021), é perceptível que os resultados encontrados acima de perda de carga também estão coerentes. Já que, considerando o duto S1 do artigo mencionado (com o número de Reynolds e a rugosidade mais aproximadas do presente estudo) e realizando ajustes que se encaixam aos comprimentos de tubulação do sistema do presente relatório, os valores encontrados de perda de carga obtiveram uma diferença discreta, como pode ser observado na Tabela 14.

Tabela 14 – Comparação de perdas de carga entre o presente estudo e o caso de Ferrari (2021).

Diâmetro do tubo (<i>mm</i>)	Comprimento da tubulação (<i>m</i>)	Perda de carga (<i>Pa</i>)	Perda de carga (<i>Pa</i>) (Ferrari, 2021)	Diferença de Perda de Carga (%)
200	12,2	118,0	123,5	4,5
200	15,5	149,6	160,5	6,8
200	17,3	167,9	180,1	6,8

Fonte: próprio autor.

O terceiro passo foi calcular a perda de carga em singularidades. Iniciou-se pelos cotovelos para desvio de direção da tubulação. No sistema em questão, foi necessário adicionar alguns cotovelos de 90° em cada capela (Tabela 15). Para o cálculo de perda de carga nos cotovelos de 90°, utilizou-se a Figura 5 como referência e, percebendo que para uma maior relação de raio do cotovelo e diâmetro do tubo (r/D) menor seria o coeficiente K , optou-se por considerar $K = 0,22$. Assim, usando a relação $\frac{r}{D} = 2,50$ (o raio do cotovelo das três capelas foi de $r = 0,50$) e a Equação 9, alcançou valores de perda de carga mostrados na Tabela 15 abaixo.

Tabela 15 – Quantidade de cotovelos e perda de carga calculada em cada tubulação.

Tubulação	Quantidade de cotovelo	Perda de carga (<i>Pa</i>)
1	3	82,6
2	4	110,2
3	4	110,2

Fonte: próprio autor.

Assim, considerando os resultados para cotovelos de 90° no sistema dimensionado e comparando-os com os valores calculados nos estudos de Ferrari (2021), podem ser identificados valores aproximados nas três tubulações. Já que no estudo de Ferrari (2021), foram utilizados quatro cotovelos de 90° e encontrado uma perda de carga de 110,8 Pa e para 3 cotovelos seria um valor de 83,1 Pa (Veja essa comparação na Tabela 16).

Tabela 16 – Comparação de perdas de carga entre o presente estudo e o caso de Ferrari (2021).

Tubulação	Quantidade de cotovelo	Perda de carga (Pa)	Perda de carga (Pa) (Ferrari, 2021)	Diferença de Perda de Carga (%)
1	3	82,6	83,1	0,574
2	4	110,2	110,8	0,568
3	4	110,2	110,8	0,568

Fonte: próprio autor.

Logo, para esse caso também foi necessário realizar pedido sob encomenda de cotovelos de 90° com 0,50m de raio de curvatura da mesma empresa Tec Dutos (2025).

Em seguida, considerando as singularidades, foi calculada a perda que ocorre no chapéu chinês, que foi instalado nos terminais das tubulações de 200 mm para impedir a passagem de chuva, granizos, entre outros. Para esse cálculo, considerou o dimensionamento de chapéu ilustrado na Figura 6 (em que a altura é $2 * \frac{D}{3} = 0,13 m$ e o comprimento é $2 * D = 0,40 m$) e encontrou a relação da altura e do diâmetro do duto ($\frac{h}{D} = 0,67$). Assim, usando os valores de K da Figura 6 e fazendo uma interpolação, encontrados que $K = 0,27$ e a perda de carga em cada tubulação, utilizando a Equação 9, é $\Delta P_{CC} = 33,6 Pa$. Logo, o chapéu selecionado foi o do tipo chapéu aba galvanizado da marca Nortuflex (2025) com diâmetro de 200 mm (Figura 16).

Então, os exaustores selecionados para cada capela separadamente precisam suportar uma vazão mínima e uma pressão mínima do sistema considerando o somatório das perdas de carga calculadas anteriormente, garantindo uma faixa de segurança acima desses valores (veja os resultados na Tabela 12).

Tabela 17 – Valores de vazão e pressão mínimas por capela.

Capela	Vazão mínima (m^3/h)	Vazão mínima (m^3/s)	Pressão mínima (Pa)	Pressão mínima (mmca)
1	1570	0,4	346,7	35,4
2	1570	0,4	355,9	36,3

3	1570	0,4	324,3	33,0
---	------	-----	-------	------

Fonte: próprio autor.

Logo, o exaustor escolhido para cada uma das capelas foi o centrífugo em propileno de modelo TBL-Série 10, Tipo Limit Load e marca Belfano (2025), como mostrado na Figura 17, com todas as especificações do produto explicitadas no catálogo do fornecedor mostradas na Tabela 13.

Tabela 18 – Especificações do exaustor selecionado da Belfano.

Modelo	10-200
Tipo	Limit Load
Carcaça	Polipropileno
Rotor	PP
Acionamento	Direto no eixo motor
Vazão (m^3/h)	950-1600
Pressão ($mmca$)	38-28
Entrada/Saída	Ø200mm/Transição para saída Ø200
Potência motor (CV)	0,5
Características motor	WEG, W22, IR3, Standard isolamento F, IP55, trifásico, 220V ou 380V, pintura no padrão do fabricante.
Rotação (rpm)	1750
Cavalete	Aço carbono – Pintura padrão Belfano
Altura piso até a caixa de saída da voluta	430 mm
Comprimento da extremidade do motor até a face do flange de entrada da voluta	465 mm
Largura da caixa da voluta	480 mm

Fonte: Belfano, 2025.

Após ter a altura do exaustor percebeu-se que o comprimento da tubulação até o telhado seria menor. Entretanto, como a diferença seria mínima e reduziria a pressão total (com o exaustor selecionado ainda atendendo ao nível de pressão), não seria conveniente considerar essa perda e alterar os cálculos já realizados.

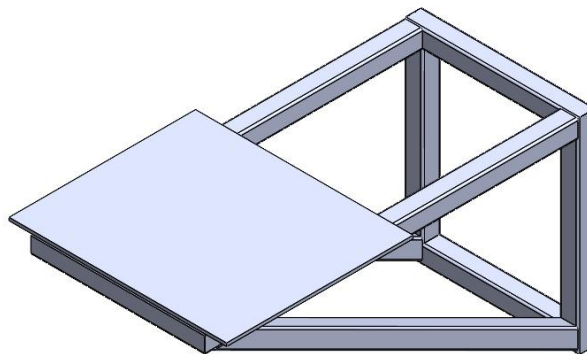
Após a seleção de todos os componentes do Sistema de Ventilação Local Exaustora para os laboratórios de graduação analisados, foi projetado o modelo do caso 2, utilizando o software SolidWorks para facilitar a visualização de todo o processo mencionado (Figura 19).

4.3 SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA 4

Para solucionar o problema 4 abordado anteriormente (Presença de ruídos elevados, acima de 50 *dB*, devido ao transporte de ar nas tubulações e aos motores posicionados dentro dos laboratórios), optou-se por instalar os motores no lado externo dos laboratórios.

Para isso, foi recomendado dimensionar um suporte de aço ASTM A36 (que é comumente usada nas engenharias civil e mecânica para estruturas de suporte e carga, já que possui uma boa soldabilidade e usinabilidade e boa resistência à tração e flexão, de acordo com NBR 8800, 2008) capaz de suportar o peso do exaustor apoiado sobre ele. Abaixo está apresentado o suporte projetado apenas para ilustrar a ideia proposta (Figura 19).

Figura 21 – Mão francesa para apoiar os exaustores instalados na parte externa dos laboratórios.



Fonte: próprio autor.

Os dimensionamentos foram feitos baseados nas dimensões dos exaustores explicitadas pelo fabricante e não houve simulações e estudos para analisar se a estrutura suportará o peso, ou seja, não foi utilizado nenhum estudo como base para os cálculos já que esse não era o foco do projeto. Por isso, nesse tópico foi apenas sugerida um suporte para apoiar os exaustores nos dois casos.

4.4 SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA 5

Para o problema 5 de falta de vedação nas capelas (Figura 9), há duas opções: colocar silicone ou borracha nas bordas das três capelas. Porém, para fixar as capelas em seus devidos lugares e evitar desvios desnecessários de posição, foi recomendado inserir silicone. Para isso,

calculou-se a quantidade de silicone necessária de acordo com o perímetro da base (p_{base}) das três capelas somadas (Equação 13) e foi selecionado o silicone da marca TEKBOND (Figura 20), que suporta altas temperaturas, é resistente a intempéries, vibrações e líquidos e é anticorrosivo, devido à necessidade das capelas.

$$p_{base} = 3 * [(b_{capela} - b_{abertura}) + b_{capela} + (2 * L_{capela})] = 9,27m \quad \text{Equação 13}$$

Figura 22 – Silicone acético preto resistente a alta temperatura para vedação.



Fonte: TEKBOND, 2011.

Assim, com recomendação, pela ficha técnica do fabricante TEKBOND (2011) de espessura de cordão de silicone de 1,5 – 3,0 mm, foi usado o maior valor ($b_{cordão} = 3,0 \text{ mm}$ e $h_{cordão} = 3,0 \text{ mm}$) para obter uma maior tolerância, chegando a um resultado de área do cordão, utilizando a Equação 10, de $A_c = 4,5 \text{ mm}^2$. Em seguida, utilizando a Equação 11, o perímetro já calculado e o volume por metro quadrado de $V_{m^2} = 0,0000125 \text{ m}^3$ (de acordo com ASTM C1193, 2020), chegou ao resultado de volume total de $V_{total} = 0,000116 \text{ m}^3$. Logo, o resultado final de massa de silicone em gramas, utilizando a Equação 12, foi de $M_s = 0,13326 \text{ kg} = 134 \text{ g}$, que precisou utilizar para a vedação completa da base das três capelas.

4.5 SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA 6

Por fim, com o objetivo de solucionar o problema 6 (a presença de fios elétricos na parte interna das capelas), foi indicado posicionar o fio do exaustor no lado externo e conectá-lo a uma botoeira liga/desliga. O mesmo pode ser feito com o fio da lâmpada, porém não foram encontradas informações sobre voltagem e amperagem desta, por isso não foi possível selecionar a botoeira ideal.

Para o primeiro caso, a botoeira deve ser trifásica com tensão de operação de 220/380 V, como o motor escolhido exige, deve suportar uma potência de pelo menos 4,0 CV e, para motores com essa potência, a corrente deve ser no mínimo de 15 A, para garantir margem de segurança. Já que atuando a 220 V a corrente varia entre 6 – 7 A e atuando a 380 V a corrente varia entre 10 – 12 A. Além disso, a botoeira deve ter partida direta (sem contator), que comuta diretamente a carga e é recomendada para motores de até 5 CV. Assim, foi selecionado a botoeira trifásica plástica liga/desliga que suporta até 30 A à 220 – 380 V, com uma potência de 5 CV em 220 V e grau de proteção IP54, do tipo TBSP-330 e marca Metaltex (2025), encontrada em KMA Brasil, Automação e Proteção (Figura 21).

Figura 23 – Botoeira liga/desliga para caso 1.



Fonte: Metaltex, 2025.

Já para o segundo caso, as botoeiras devem ser trifásicas com tensão de operação de 220/380 V, como os motores selecionados exigem, devem suportar uma potência de pelo menos 0,5 CV e, para motores com essa potência, a corrente deve ser no mínimo de 5 A, para garantir margem de segurança. Já que atuando a 220 V a corrente varia entre 1,5 – 2,5 A e atuando a 380 V a corrente varia entre 0,9 – 1,5 A. Além disso, a botoeira deve ter partida direta (sem contator), que comuta diretamente a carga e é recomendada para motores de até 5 CV. Assim, foi selecionada a botoeira trifásica eletromagnética liga/desliga que suporta até 10 A à 220 – 380 V, com uma potência de 3 CV em 220 V e grau de proteção IP54, do tipo KAO-10KH e marca Sibratec (2025), encontrada em 47 Elétrica (Figura 22).

Figura 24 – Botoeira liga/desliga para caso 2.



Fonte: Sibratec, 2025.

5 CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados apresentados de perda de pressão total, de vazão e de quantidade de singularidades necessárias em cada um dos casos, é possível tirar algumas conclusões sobre a melhor solução para os problemas apresentados nos laboratórios do IQ2 e sobre as desvantagens de cada um deles.

Primeiramente, é perceptível que o caso 1 utilizará maiores quantidades de singularidades em seu sistema, aumentando possíveis falhas que podem ocorrer nas junções, além de elevar a mínima pressão necessária do motor selecionado.

Outro ponto é que as três capelas serão necessariamente ligadas ao mesmo tempo e o ruído será bem maior, já que o sistema precisará de um motor de alta potência e que suporte alta vazão. Além dessas desvantagens, ainda é preciso considerar que, como cada capela precisa de um diâmetro de saída diferente, será necessário ajustar essa abertura de duas capelas.

Entretanto, uma vantagem do Caso 1 é que, como o Instituto possui muitas salas, é vantajoso que cada uma delas ocupem o menor espaço externo possível e o caso 1 terá apenas uma tubulação saindo para a parte externa. Além disso, como os diâmetros dos dutos que saem de cada capela são distintos, as chances de vapores e gases voltarem por outras capelas serão reduzidas, já que as três sugarão o ar do laboratório ao mesmo tempo.

Já o caso 2 possui menores quantidades de singularidades e cada capela precisará de um motor com potência bem menor, resultando em níveis de pressão sonora com menor impacto, já que as capelas serão ligadas separadamente. No entanto, ocuparão um maior espaço no exterior dos laboratórios, já que necessitarão de 3 tubulações.

Os resultados se apresentaram satisfatórios, mantendo uma velocidade de transporte nos dutos superior a 10 *m/s* e inferior a 15 *m/s* nos dois casos (como recomendada pela NBR 17154:2013, para gases, vapores e particulados pequenos), com diâmetros de tubulação fáceis de encontrar e devidamente calculados e com perdas de carga relativamente baixas, de acordo com as análises feitas.

No entanto, pensando em possíveis melhorias na avaliação de um SVLE, seria de extrema relevância, após a instalação do sistema, realizar alguns testes, como de velocidade de captura na face de cada capela, velocidade de saída do ar ao final de cada tubulação, medição de vazão em cada capela e medição de ruído ocasionados pelos motores, para analisar a necessidade de dimensionamento de abafadores.

Além disso, outra análise importante que pode acrescentar em trabalhos futuros é relacionada aos riscos das substâncias manuseadas em cada laboratório para verificar a

necessidade de um filtro ou um lavador de gases antes do ar ser eliminado para o ambiente externo. Esse estudo, além de minimizar os riscos a saúde de seres vivos e do meio ambiente, também pode reduzir a pressão total final, podendo selecionar motores menos potentes e com menor nível de pressão sonora.

Outro ponto de melhoria que pode ser considerado para trabalhos futuros é a verificação da necessidade de instalar capelas mais modernas, além de capelas diferentes para cada uma das tubulações de diâmetros distintos do caso 2. Além disso, é importante considerar abafadores para minimizar ruídos dos motores que incomodam os frequentadores dos ambientes de ensino.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1193 – Standard Guide for Use of Joint Sealants**. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. **ASHRAE Handbook – HVAC Applications**. Atlanta: ASHRAE, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5648. **Tubos e Conexões de PVC-U com Junta Soldável para Sistemas Prediais de Água Fria – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10152. **Níveis de ruído para conforto acústico – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 17154. **Sistemas de ventilação local exaustora – Requisitos para projeto e desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BARRETO, M. de O. **Manual de boas práticas de laboratório**. Porto Alegre: UERGS, 2018.

BELFANO. **Catálogo da conexão Y soldável**, 2025. Disponível em: <https://www.belfano.com.br/portifolio/cs-j-juncao-ou-te-45/>. Acesso em: 10 de maio de 2025.

BELFANO. **Catálogo de curva de 90°**, 2025. Disponível em: <https://www.belfano.com.br/portifolio/cs-09-curva-45-soldavel/>. Acesso em: 10 de maio de 2025.

BELFANO. **Catálogo de exaustores centrífugos**, 2025. Disponível em: https://www.belfano.com.br/exaustores-centrifugos/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 10 de maio de 2025.

BELFANO. **Catálogo da luva de redução abrupta soldável**, 2025. Disponível em: <https://www.belfano.com.br/portifolio/cs-15-luva-de-reducao-soldavel/>. Acesso em: 10 de maio de 2025.

BELFANO. **Catálogo dos tubos de PVC**, 2025. Disponível em: <https://www.belfano.com.br/portifolio/tubo-pead-polietileno-alta-densidade-norma-din-8074/>. Acesso em: 10 de maio de 2025.

BERANEK, Leo L. **Noise and Vibration Control**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1971.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 12 – Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**. Brasília, DF: MTE, 2019.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 15 – Atividades e operações insalubres**.

Brasília, DF: MTE, 2019.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 9 – Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA)**. Brasília, DF: MTE, 2019.

CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2020.

FAHOR – FACULDADE HORIZONTINA. GELESKI, A. **Projeto e dimensionamento de um sistema de ventilação industrial com scrubber para gases ácidos**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, FAHOR, 2015.

FERRARI, Camilly Selvático. **Dimensionamento de um sistema de ventilação local exaustora para estação de soldagem**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, IFES, 2021.

FERNANDES, Ana Caroline Garcia et al. **Segurança no Laboratório de Química**. São Paulo, 2021.

GIUGNI, C. A. **Diagnóstico de sistemas de ventilação industrial em indústria alimentícia**. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE – HSE. **Controlling airborne contaminants at work: A guide to local exhaust ventilation (LEV)**. United Kingdom: HSE, 2017.

HERLEMANN, L. H. **Estudo e Aplicação da Norma Regulamentadora N° 12 em uma Empresa de Minérios**. Ponta Grossa, 2019.

LEANDRO. **Quais são os Tipos de Sistema de Exaustão de Gases Existentes Para Uso em Laboratório**. São Paulo, 2021.

MACINTYRE, A. J. **Ventilação Industrial e Controle de Poluição**. Rio de Janeiro, 1990.

MESQUITA, A. L. S.; GUIMARÃES, F. A.; NEFUSSI, N. **Engenharia de Ventilação Industrial**. São Paulo, 1977.

METALTEX. **Ficha técnica de botoeiras**. 2025. Disponível em: <https://www.kmabrasil.com.br/produtos/arquivos/tbsp-330-ft-33919.pdf>. Acesso em: 10 de maio de 2025.

MORLAN. **Catálogo de Telas de PVC**, 2025. Disponível em: <https://www.elastobor.com.br/tela-de-pvc-morlan-alambrado-2-90-x-1-80-x-25mts-verde-41074016/p>. Acesso em: 26 de maio de 2025.

NEDERMAN. **Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR)**, 2025.

NORTUFLEX. **Ficha técnica do chapéu chinês**, 2025. Disponível em: https://www.nicolaurosa.com/index.php?controller=attachment&id_attachment=8999. Acesso em: 10 de maio de 2025.

NOVA EXAUSTORES. **Catálogo da luva de redução cônica 30° soldável**, 2025. Disponível em: https://www.novaexaustores.com.br/luva-de-reducao-em-chapa-galvanizada?parceiro=1604&srsItd=AfmBOoqN865iai33rmEI3KEk3xhSfzfg5WL3YAFmynM5a-5CbvA1ufUrY4w&variant_id=5076. Acesso em: 10 de maio de 2025.

OLIVEIRA, M. B. **Manual de Boas Práticas de Laboratório - UERGS**, 2018. Disponível em: <https://www.uergs.edu.br/upload/arquivos/201901/02150629-manual-boas-praticas-de-laboratorio-uergs-site.pdf>. Acesso em: 10 de maio de 2025.

RODRIGUES, J. H. **Avaliação de Sistemas de Ventilação Local Exaustora do Tipo Capela Exaustora em Laboratórios Destinados a Alunos de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Ponta Grossa**, 2018.

ROSSI, L. A.; SANTOS, R. A.; VILLAS BÔAS, A. A. **Análise de eficiência de sistemas de exaustão em laboratórios químicos**. Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, São Paulo, 2019.

SIBRATEC. **Ficha técnica botoeira eletromecânica dupla KAO-10KH**, 2025. Disponível em: <https://47eletrica.cdn.magazord.com.br/img/2023/09/produto/3559/botoeira-eletromecanica-dupla-cao-10kh.pdf>. Acesso em: 10 de maio de 2025.

TEC DUTOS. **Empresa Tec Dutos - dutos de ventilação**, 2025. Disponível em: <https://www.tecdutos.com.br/dutos-de-ventilacao.php>. Acesso em: 10 de maio de 2025.

TEKBOND. **Ficha técnica silicone acético preto alta temperatura**, 2011. Disponível em: https://www.tekbond.com.br/sites/tekbond.com.br/files/2020-09/ficha_tecnica_silicone_acetico_preto_alta_temp_50g_rev_09_2020.pdf. Acesso em: 10 de maio de 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. **Segurança na utilização de cabines de exaustão**. Departamento de Engenharia de Produção, 2020.

VICENTE, Julianna Carolina da Silva et al. **Estudo observacional dos riscos ambientais em laboratório de pesquisa em Recife/PE**. Recife, 2021.