

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS  
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

HADASSA RIBEIRO FEITOSA

**ESTUDO PARA SISTEMA DE VENTILAÇÃO PARA O GALPÃO DE UMA  
INDÚSTRIA DO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS**

MANAUS  
2025

**HADASSA RIBEIRO FEITOSA**

**ESTUDO PARA SISTEMA DE VENTILAÇÃO PARA O GALPÃO DE UMA  
INDÚSTRIA DO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia de  
Produção da Escola Superior de  
Tecnologia da Universidade do Estado do  
Amazonas, como parte dos requisitos para  
a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Dr. Francisco Assis  
Barros de Oliveira.

MANAUS

2025

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
**Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.**

R484e

Ribeiro Feitosa, Hadassa

ESTUDO PARA SISTEMA DE VENTILAÇÃO PARA O GALPÃO DE UMA INDÚSTRIA DO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS / Hadassa Ribeiro Feitosa . Manaus : [s.n], 2025.

47 f.: color.; 21,0 cm.

TCC - Graduação em Engenharia de Produção- Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2025.

Orientador: Francisco Assis Barros de Oliveira..

Coorientador: Rejane Gomes Ferreira.

1. Ventilação industrial. 2. Eficiência energética. 3. Ergonomia ocupacional. 4. -. I. Francisco Assis Barros de Oliveira. (Orient.) II. Rejane Gomes Ferreira (Coorient.) III. Universidade do Estado do Amazonas. IV. Título

CDU(1997)658.5

**HADASSA RIBEIRO FEITOSA**

**ESTUDO PARA SISTEMA DE VENTILAÇÃO PARA O GALPÃO DE UMA  
INDÚSTRIA DO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia de Produção da Universidade do Estado do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Data de aprovação: Manaus (AM), 11 de junho de 2025.

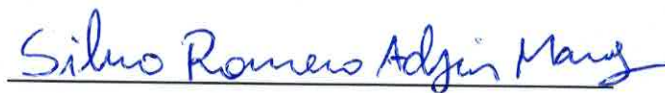
Banca examinadora:



Francisco Assis Barros de Oliveira, Prof., Doutor  
Universidade do Estado do Amazonas



Joésia Moreira Julião Pacheco, Profa., Doutora  
Universidade do Estado do Amazonas



Silvio Romero Adjar Marques, Prof., Mestre  
Universidade do Estado do Amazonas

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por ter guiado cada passo da minha jornada, abrindo caminhos e oportunidades no percurso acadêmico que, em muitos momentos, pareceram além do que eu poderia sonhar.

Aos meus pais, Ozeas e Edileusa, minha eterna gratidão por todo o amor, sacrifício e renúncias feitas em prol do meu futuro. Sei que muitas vezes renunciaram aos próprios sonhos para que eu pudesse realizar os meus. Esta conquista é tão minha quanto de vocês.

À minha irmã Rayssa, que foi uma das minhas maiores incentivadoras, sempre presente com palavras de força e gestos de apoio. Seu exemplo, motivação e carinho foram fundamentais para que eu não desistisse.

Aos meus amigos de curso, Andreison, João Victor, Katarina, Marcos Vinicius, Rodrigo, Thiago e Pedro Luka por dividirem comigo não apenas o aprendizado, mas também os desafios, as risadas e o companheirismo que tornaram essa trajetória mais leve e significativa.

Ao meu chefe e amigos de trabalho, por confiar em mim e por me proporcionarem a oportunidade de desenvolver este projeto em meio a tantas responsabilidades, contribuindo de forma valiosa com minha formação.

Ao professor Francisco Assis Barros de Oliveira e a professora Rejane Gomes Ferreira pela orientação, incentivo e ensinamentos.

A Escola Superior de tecnologia por disponibilizar a estrutura física e profissionais qualificados para a construção do meu conhecimento.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo técnico sobre a readequação do sistema de ventilação em uma montadora de motocicletas situada no Polo Industrial de Manaus, região caracterizada por elevadas temperaturas e umidade relativa do ar, fatores que impõem desafios significativos ao conforto térmico nos ambientes industriais. O objetivo principal da pesquisa foi analisar as ineficiências do sistema de ventilação existente, identificar as causas do desconforto térmico e acústico relatado por colaboradores, e propor soluções que otimizem a ergonomia, o desempenho produtivo e a eficiência energética da planta fabril. O método adotado foi um estudo de caso com abordagem explicativa, com base em inspeções técnicas, medições ambientais (temperatura, umidade e ruído), análise do layout industrial e avaliação de consumo energético. Inicialmente, o sistema composto por ventiladores axiais apresentava falhas de posicionamento, orientação conflitante de fluxo e ausência de exaustão, o que causava a formação de bolsões de ar quente, elevando a temperatura e os níveis de ruído, ultrapassando os limites das normas regulamentadoras. Com a substituição por dois equipamentos de aeração condicionada o sistema passou a manter temperaturas e níveis de ruído dentro da conformidade com as normas. Apesar do aumento no consumo energético anual, o novo sistema eliminou a necessidade de pagamento de insalubridade, resultando em uma economia anual. Conclui-se que a readequação do sistema de ventilação proporcionou ganhos significativos em saúde ocupacional, eficiência operacional e economia empresarial, sendo recomendada para indústrias em condições climáticas similares.

**Palavras-chave:** Ventilação industrial; Eficiência energética; Ergonomia ocupacional.

## **ABSTRACT**

*This paper presents a technical study on the readjustment of the ventilation system in a motorcycle assembly plant located in the Manaus Industrial Complex, a region characterized by high temperatures and relative humidity, factors that pose significant challenges to thermal comfort in industrial environments. The main objective of the research was to analyze the inefficiencies of the existing ventilation system, identify the causes of thermal and acoustic discomfort reported by employees, and propose solutions that optimize the ergonomics, production performance, and energy efficiency of the manufacturing plant. The method adopted was a case study with an explanatory approach, based on technical inspections, environmental measurements (temperature, humidity, and noise), analysis of the industrial layout, and assessment of energy consumption. Initially, the system composed of axial fans presented positioning failures, conflicting flow orientation, and lack of exhaust, which caused the formation of hot air pockets, raising the temperature and noise levels, exceeding the limits of regulatory standards. By replacing the system with two air-conditioned ventilation units, the system was able to maintain temperatures and noise levels within the standards. Despite the increase in annual energy consumption, the new system eliminated the need to pay health and safety premiums, resulting in annual savings. It was concluded that the readjustment of the ventilation system provided significant gains in occupational health, operational efficiency and business savings, and is recommended for industries in similar climate conditions.*

**Keywords:** *Industrial ventilation; Energy efficiency; Occupational ergonomics.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Curva característica ventilador tubo axial.....	18
Figura 2 - Efeitos do ruído pela correlação da intensidade e frequência em que ocorre .....	23
Figura 3 - Ventilador aviário industrial.....	28
Figura 4 - Layout ventiladores galpão 1.....	30
Figura 5 - Ventiladores galpão 1.....	30
Figura 6 - Zonificação térmica no galpão.....	31
Figura 7 - Divisão de área galpão 1 para monitoramento sonoro.....	34
Figura 8 - Equipamento de aeração condicionada GCH40.....	36
Figura 9 - Desenho instalação equipamento de aeração condicionada.....	37
Figura 10 - Layout instalação de ventilação condicionada.....	37
Figura 11 - Sistema de tubulação para distribuição de ar.....	38

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Monitoramento de temperatura e umidade - ventiladores .....	33
Gráfico 2 - Monitoramento de ruído ventiladores .....	34
Gráfico 3 - Monitoramento de temperatura e umidade - ar-condicionado .....	39
Gráfico 4 - Monitoramento de ruído atual .....	39
Gráfico 5 - Gráfico comparativo: monitoramento de ruído.....	41

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1	TEMA.....	11
1.2	PROBLEMA DA PESQUISA .....	11
1.3	OBJETIVOS .....	11
1.3.1	<b>Objetivo geral</b> .....	11
1.3.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	11
1.4	METODOLOGIA DO ESTUDO REALIZADO .....	12
1.5	LIMITAÇÃO DO ESTUDO .....	13
1.6	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
2.1	VENTILAÇÃO INDUSTRIAL.....	15
<b>2.1.1</b>	<b>Ventiladores axiais</b> .....	<b>17</b>
2.1.2	<b>Aeração condicionada</b> .....	18
2.2	NORMAS REGULAMENTADORAS DE VENTILAÇÃO INDUSTRIAL .....	19
2.3	CONFORTO TÉRMICO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS.....	20
2.4	FONTES DE RUÍDO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS .....	22
2.5	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMA DE VENTILAÇÃO.....	25
2.6	<i>LAYOUT</i> INDUSTRIAL .....	26
<b>3</b>	<b>DESCRIÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>28</b>
3.1	ANÁLISE DA SITUAÇÃO ANTERIOR .....	29
3.2	ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL .....	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>43</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A ventilação industrial é fundamental para manter ambientes de trabalho seguros e confortáveis, sendo um dos métodos mais eficientes no controle de contaminantes em indústrias. Além de reduzir a concentração de poeiras, gases e vapores, a ventilação também proporciona conforto térmico, prevenindo doenças ocupacionais associadas a condições ambientais inadequadas (Bittencourt, 2005). Por isso, seu papel é essencial tanto para a proteção da saúde dos trabalhadores quanto para a eficiência das atividades produtivas.

O Polo Industrial de Manaus (PIM) é um dos maiores centros industriais do Brasil, com destaque na produção de motocicletas e outros bens de consumo. Criado em 1968, o PIM cresce apoiado por incentivos fiscais (SUFRAMA, 2025). Contudo, sua localização na Amazônia impõe desafios adicionais, pois o clima equatorial, com temperaturas elevadas e alta umidade o ano inteiro, exige sistemas de ventilação eficientes para manter condições adequadas de trabalho (FERREIRA, 2011). Esses fatores reforçam a importância de avaliar e otimizar os sistemas de ventilação nas indústrias da região.

Nesse contexto, a montadora de motocicletas estudada neste trabalho enfrenta desafios específicos em relação ao desempenho do seu sistema de ventilação industrial. Setores como as linhas de montagem e outras áreas produtivas exigem um controle rigoroso da temperatura e da qualidade do ar, visando não apenas assegurar condições adequadas de trabalho para os colaboradores, mas também evitar desperdícios de energia e minimizar impactos negativos, como o aumento do nível de ruído e dos custos operacionais (Macintyre, 1990). Assim, torna-se evidente a necessidade de analisar a eficiência desses sistemas e propor melhorias que atendam às particularidades do ambiente industrial da região.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo principal analisar o sistema de ventilação de uma montadora de motocicletas localizada no Polo Industrial de Manaus, com o intuito de identificar possíveis ineficiências e propor soluções para otimizar as condições ambientais internas da planta. Busca-se, com isso, favorecer o conforto térmico dos trabalhadores, melhorar o desempenho produtivo e reduzir o consumo energético, assegurando, conseqüentemente, a saúde ocupacional, a eficiência dos processos industriais e a qualidade dos produtos (SUFRAMA, 2025; Bittencourt, 2005).

## 1.1 TEMA

Estudo para sistema de ventilação para o galpão de uma indústria do Polo Industrial de Manaus.

## 1.2 PROBLEMA DA PESQUISA

A montadora de motocicletas localizada no Polo Industrial de Manaus enfrenta desafios significativos no controle das condições térmicas de sua linha de produção, devido ao clima equatorial da região, caracterizado por altas temperaturas e umidade elevada. Esse cenário resulta em desconforto térmico e reclamações frequentes dos colaboradores, sendo as tentativas de mitigação, como a movimentação de ventiladores sem análise técnica, ineficazes, intensificando o problema ao criar bolsões de ar quente e elevando ainda mais a temperatura ambiente. Esse problema impacta diretamente o conforto dos trabalhadores e a produtividade, além de aumentar o consumo de energia e os custos operacionais. Dessa forma, a questão que se coloca é: quais fatores contribuem para a ineficiência do sistema de ventilação industrial nessa montadora e como sua readequação pode eliminar os bolsões de ar quente, melhorar o conforto térmico e otimizar a produtividade da empresa?

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Propor um sistema de ventilação que adeque o conforto térmico e ergonômico no ambiente de trabalho e proporcione melhor eficiência energética.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Mapear as áreas do ambiente de trabalho que podem ser otimizadas por meio de uma configuração eficiente da ventilação;
- Avaliar as condições térmicas e ergonômicas do ambiente de estudo, considerando os impactos no conforto e produtividade;
- Propor um sistema que adeque o conforto térmico e ergonômico;
- Comparar o consumo energético antes e depois da instalação do novo sistema de ventilação, verificando os ganhos em eficiência.

#### 1.4 METODOLOGIA DO ESTUDO REALIZADO

A definição da metodologia de pesquisa deve ser cuidadosamente alinhada ao problema investigado e aos objetivos propostos. Conforme Pereira *et al.* (2018), a escolha do método de pesquisa é essencial para assegurar a coerência entre o caminho metodológico e os resultados esperados, permitindo que o estudo alcance conclusões válidas e confiáveis. A metodologia funciona como um roteiro que orienta a investigação científica, determinando as etapas e as técnicas a serem utilizadas.

A revisão de literatura, também chamada de pesquisa bibliográfica, consiste na análise de obras e estudos já publicados, permitindo o embasamento teórico do tema. A pesquisa experimental tem como foco a manipulação de variáveis em ambientes controlados, visando identificar relações de causa e efeito (Prodanov; Freitas, 2013). Já a pesquisa *ex-post-facto* analisa eventos já ocorridos, sem a manipulação de variáveis.

Quanto à sua finalidade, a pesquisa científica pode ser classificada como exploratória, descritiva ou explicativa. As pesquisas descritivas têm como foco detalhar as características de um fenômeno ou população, enquanto as explicativas visam identificar as causas e relações entre variáveis, aprofundando a análise dos fatores que influenciam determinado fenômeno (Pereira *et al.*, 2018).

A metodologia deste estudo foi estruturada como um estudo de caso, pois essa abordagem permite uma investigação aprofundada de fenômenos contemporâneos em seu contexto real, como destaca Yin (2001). No presente trabalho, o foco é analisar a ineficiência do sistema de ventilação industrial em uma montadora de motocicletas localizada no Polo Industrial de Manaus. Essa metodologia possibilita identificar os fatores que causam bolsões de ar quente e examinar seus impactos no conforto térmico dos trabalhadores e na produtividade organizacional. Trata-se de uma pesquisa explicativa.

A coleta de dados foi realizada por meio de múltiplas fontes, incluindo observações diretas no ambiente de produção, análise de registros de reclamações e medições das condições ambientais. Essa triangulação de dados, conforme orientam Melo Júnior e Morais (2018), aumenta a robustez dos resultados e proporciona uma visão mais abrangente do problema.

A metodologia de análise utilizada neste estudo envolveu uma abordagem sistemática e detalhada para avaliar o sistema de ventilação da planta industrial. Primeiramente, foi realizada uma inspeção visual com mapeamento do layout para identificar falhas no posicionamento e funcionamento dos ventiladores, seguida de medições ambientais de temperatura e umidade, utilizando termômetros e higrômetros, para avaliar as condições térmicas do ambiente. Também foram utilizados decibelímetros para monitorar os níveis de ruído e identificar as principais fontes de poluição sonora. Os dados coletados foram analisados de forma a comparar o desempenho do sistema de ventilação existente com o proposto, considerando fatores como eficiência energética, conforto térmico, e impacto no ambiente de trabalho. As informações foram complementadas com cálculos de consumo energético e economia operacional gerada pela eliminação do pagamento de insalubridade, permitindo uma avaliação abrangente dos benefícios da readequação do sistema de ventilação.

## 1.5 LIMITAÇÃO DO ESTUDO

O estudo foi realizado em uma fábrica do segmento de duas rodas localizada na cidade de Manaus, cuja estrutura compreende três galpões, sendo dois destinados à produção e um ao armazenamento, todos equipados com ventiladores industriais. A coleta de dados e as análises ocorreram no período de março a agosto de 2024. Os resultados obtidos refletem as condições específicas desta planta, neste período, considerando suas particularidades estruturais, operacionais e de *layout*. Embora os achados possam servir de referência para outras fábricas com características semelhantes de infraestrutura e organização espacial, sua aplicação deve ser feita com cautela, respeitando as especificidades de cada contexto industrial.

## 1.6 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. O primeiro capítulo contém a parte introdutória, onde é apresentada a introdução do trabalho, os objetivos e a metodologia utilizada na pesquisa.

O segundo capítulo é uma revisão da literatura das principais discussões sobre

o tema que será abordado neste trabalho.

O terceiro capítulo apresenta uma descrição do sistema de ventilação anterior e atual e apresenta os materiais e métodos utilizados nessa pesquisa.

O quarto capítulo mostra os resultados analisados.

O quinto capítulo mostra as conclusões sobre o trabalho feito.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Com a finalidade de aprofundar a compreensão do tema e apresentar as principais abordagens já consolidadas na literatura, serão desenvolvidos tópicos que fundamentam a temática em estudo. Os assuntos tratados são: ventilação industrial, normas regulamentadoras de ventilação industrial, ventiladores axiais, aeração condicionada, conforto térmico em ambientes industriais, fontes de ruído em ambientes industriais e *layout* industrial.

### 2.1 VENTILAÇÃO INDUSTRIAL

A ventilação industrial é um processo fundamental para garantir a renovação do ar em ambientes de trabalho, visando a manutenção da qualidade do ar e a segurança dos trabalhadores. A ventilação industrial pode ser definida como a movimentação controlada do ar dentro de um espaço fechado, com o objetivo de remover contaminantes e fornecer ar fresco (Bittencourt, 2005). Esta prática é essencial para controlar a temperatura, a umidade, os níveis de oxigênio e a presença de substâncias perigosas, como gases, vapores e partículas em suspensão.

Segundo Frota e Schiffer (2003), no "Manual de Conforto Térmico", os objetivos da ventilação industrial vão além da simples movimentação do ar, abrangendo aspectos diretamente ligados à saúde ocupacional, à eficiência dos processos produtivos e ao bem-estar dos colaboradores.

Um dos principais objetivos da ventilação industrial é assegurar a manutenção da qualidade do ar interior. Isso envolve a renovação contínua do ar ambiente, com a remoção de contaminantes físicos, químicos e biológicos, e a introdução de ar fresco em quantidade suficiente para diluir as concentrações de poluentes. Essa prática é essencial para manter as condições de salubridade dentro dos limites aceitáveis, conforme estabelecido por normas técnicas e órgãos de saúde ocupacional (Fundacentro, 2022).

Outro aspecto crucial refere-se ao controle da temperatura do ambiente de trabalho. Em processos industriais, é comum a geração de calor proveniente de máquinas, equipamentos e operações específicas. A ventilação, nesse contexto, atua na extração do ar aquecido, contribuindo para a regulação térmica e criando

condições mais seguras e confortáveis para a execução das atividades laborais (Frota; Schiffer, 2003).

Além da temperatura, a umidade relativa do ar é um fator crucial no ambiente de trabalho. A ventilação deve ser projetada para manter níveis adequados de umidade, evitando tanto o ressecamento excessivo quanto a saturação do ar. De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (1997), o controle da umidade é fundamental para garantir o conforto térmico e a qualidade do ar interior, prevenindo problemas como condensação, proliferação de fungos e impactos negativos na saúde respiratória dos trabalhadores

A ventilação industrial também desempenha um papel vital na diluição e remoção de poluentes atmosféricos. Em ambientes fabris, a presença de partículas em suspensão, vapores químicos e gases tóxicos representa riscos à saúde dos trabalhadores. Segundo Field e Cuthbert (2019), a ventilação adequada é essencial para reduzir a concentração desses poluentes, promovendo um ambiente de trabalho mais seguro e conforme aos padrões de higiene industrial.

Por fim, a ventilação industrial contribui diretamente para a melhoria do conforto térmico dos trabalhadores. Ao garantir uma circulação de ar eficiente e a manutenção de parâmetros adequados de temperatura, umidade e qualidade do ar, cria-se um ambiente mais agradável, o que reflete positivamente no bem-estar físico e mental dos colaboradores. Segundo estudos sobre ergonomia ambiental, ambientes termicamente confortáveis favorecem a concentração, reduzem a fadiga e aumentam a produtividade (ABNT NBR 16401-2:2023).

Os sistemas de ventilação podem ser classificados de acordo com sua finalidade e modo de operação, abrangendo desde métodos passivos, como a ventilação natural, até soluções mecânicas complexas, como exaustão localizada, ventilação geral diluidora, insuflamento e sistemas de ventilação de emergência. Cada tipo possui características específicas e aplicações recomendadas conforme as demandas do ambiente e os riscos envolvidos, sendo essencial uma análise criteriosa para a seleção do sistema mais eficiente (ASHRAE, 2022). O Quadro 1 apresenta um resumo esquemático dos principais tipos de ventilação industrial conforme essa classificação, destacando suas características e aplicações práticas.

Quadro 1 – Tipos de ventilação

<b>Tipo de ventilação</b>	<b>Característica principal</b>	<b>Aplicação típica</b>
Natural	Usa forças naturais para renovar o ar	Ambientes com boa ventilação cruzada
Mecânica (Forçada)	Usa ventiladores e exaustores	Ambientes industriais fechados
Geral Diluidora	Dilui poluentes no ambiente	Grandes galpões industriais
Localizada	Atua diretamente na fonte de poluição	Soldagem, pintura, exaustão de calor
Mista (Híbrida)	Combina natural e mecânica	Fábricas que buscam eficiência
Ventilação de Processo	Atende processos industriais específicos	Fornos, cabines de pintura
Ventilação de Emergência	Atua em situações críticas (incêndios, gases)	Indústrias químicas, metalúrgicas

Fonte: Autor, 2025.

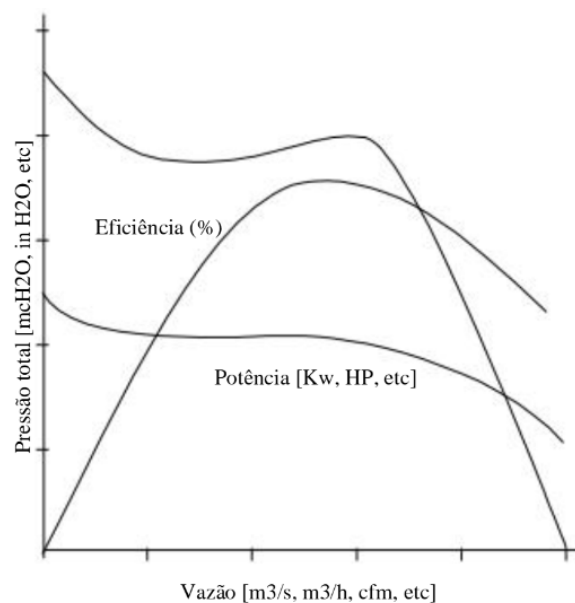
Dentre os diversos tipos de ventiladores industriais, os ventiladores axiais se destacam como uma solução eficiente para garantir a movimentação de grandes volumes de ar com baixo custo energético. Sua operação, baseada no direcionamento do fluxo de ar ao longo do eixo do equipamento, os torna adequados para ambientes que exigem ventilação em larga escala, contribuindo para a renovação do ar e o controle de condições ambientais.

### **2.1.1 Ventiladores axiais**

Os ventiladores axiais são amplamente utilizados em sistemas de ventilação devido à sua capacidade de mover grandes volumes de ar com alta eficiência. Diferente dos ventiladores centrífugos, os ventiladores axiais funcionam de forma que o ar é aspirado pelo local de entrada e expelido diretamente pelo difusor de saída, com o fluxo movendo-se paralelamente ao eixo do ventilador. O design típico dos ventiladores axiais envolve um rotor axial que gira dentro de uma carcaça tubular, sendo denominado ventilador tubular. O controle da vazão de ar é feito por meio da variação do número de pás do rotor ou da inclinação das lâminas, o que permite ajustar a intensidade do fluxo e garantir a eficiência do sistema. Segundo Perez (2014), esse tipo de ventilador é especialmente eficaz em condições em que o principal objetivo é movimentar grandes volumes de ar com resistência mínima.

De acordo com Villar Alé (2011), o controle de vazão é realizado ao ajustar a entrada de ar ou o ângulo das lâminas, otimizando a distribuição do fluxo e, conseqüentemente, o desempenho do ventilador. Esse tipo de ventilador é mais eficiente em aplicações que exigem grandes volumes de ar a baixas pressões, como ventilação de galpões industriais e resfriamento de ambientes. A curva característica dos ventiladores axiais, apresenta uma região de instabilidade onde a potência máxima é atingida, com a vazão zero (ponto onde não ocorre fluxo, mas o ventilador ainda opera com alta resistência), como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Curva característica ventilador tubo axial



Fonte: Jorge Antonio Villar Alé, 2011.

### 2.1.2 Aeração condicionada

Os equipamentos de aeração condicionada são uma boa opção no controle ambiental de ambientes industriais, assegurando condições adequadas de temperatura e umidade. Conforme apontado por Reynolds e Wenzel (2004), tais sistemas são essenciais para a manutenção de um ambiente térmico estável, favorecendo não apenas o desempenho operacional, mas também o conforto térmico dos trabalhadores, especialmente em áreas sujeitas a flutuações de temperatura.

De acordo com a ASHRAE (2017), os sistemas HVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado), que englobam os equipamentos de aeração condicionada, são projetados para mover grandes volumes de ar a baixas pressões,

o que garante uma distribuição eficiente e o controle da qualidade do ar interior. Tais características são determinantes para evitar o acúmulo de calor em determinadas zonas, além de melhorar significativamente as condições de trabalho.

Bischoff e McDougall (2010) ressaltam que esses sistemas são particularmente vantajosos em ambientes industriais de grande porte, como galpões, onde o controle simultâneo de temperatura e umidade é necessário. Além de promoverem eficiência energética, esses sistemas favorecem a saúde ocupacional, criando um ambiente de trabalho mais seguro e confortável para os colaboradores.

Além da classificação e aplicação dos sistemas de ventilação industrial, é imprescindível considerar as normas regulamentadoras que estabelecem os requisitos legais e técnicos para garantir a saúde e segurança dos trabalhadores. No Brasil, essas diretrizes são definidas por normas específicas que orientam o dimensionamento, a instalação e a eficiência dos sistemas de ventilação em ambientes industriais (Fundacentro, 2022).

## 2.2 NORMAS REGULAMENTADORAS DE VENTILAÇÃO INDUSTRIAL

Conforme destacado por Bittencourt (2005), a ventilação industrial é uma medida preventiva essencial para a proteção da saúde dos trabalhadores e para assegurar a conformidade com as normas de segurança ocupacional. No Brasil, a regulamentação da ventilação em ambientes industriais é estabelecida por um conjunto de normas técnicas e regulamentadoras, sendo as principais referências as Normas Regulamentadoras (NRs) do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) e as normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Essas diretrizes visam garantir condições adequadas de trabalho, tanto do ponto de vista da saúde ocupacional quanto da eficiência dos processos produtivos.

Entre as principais normas, destaca-se a NR 15 – Atividades e Operações Insalubres, que define os limites de tolerância à exposição de agentes físicos, químicos e biológicos nocivos à saúde, como poeiras, fumos, vapores e gases. A norma estabelece que, sempre que possível, a exposição deve ser controlada por medidas de ventilação adequadas, antes mesmo da adoção de equipamentos de proteção individual (EPI), reforçando o princípio da hierarquia das medidas de controle

(BRASIL, 2023). Assim, a ventilação industrial passa a ser uma solução prioritária para minimizar riscos à saúde dos trabalhadores expostos a agentes contaminantes.

Outro aspecto importante está previsto na NR 17 – Ergonomia, que trata das condições ambientais e organizacionais necessárias para a prevenção de doenças ocupacionais e para a promoção do conforto no ambiente de trabalho. A norma enfatiza que a ventilação adequada é fundamental para o controle das condições térmicas, principalmente em regiões de clima quente e úmido, como é o caso da Zona Franca de Manaus. O objetivo é garantir que o ambiente não exponha os trabalhadores a esforços excessivos ou desconforto térmico, que comprometam a saúde e o desempenho das atividades (BRASIL, 2025).

No campo das normas técnicas, a NBR 16401 – Instalações de Ar-Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários da ABNT, estabelece os critérios para o projeto, a instalação e a manutenção de sistemas de ventilação e ar-condicionado, visando a garantir a qualidade do ar interior e a eficiência energética dos equipamentos. Embora voltada para sistemas de climatização, essa norma serve de referência para projetos industriais que exigem controle rigoroso da renovação de ar, temperaturas e níveis de contaminantes no ambiente (ABNT, 2018).

Complementarmente, a NBR 10152 – Níveis de Ruído para Conforto Acústico aborda a questão do ruído gerado pelos sistemas de ventilação e exaustão. Embora não trate diretamente da ventilação industrial, a norma estabelece parâmetros de aceitabilidade para níveis de ruído em ambientes de trabalho, uma vez que projetos mal dimensionados de ventiladores e exaustores podem causar desconforto acústico e até mesmo problemas auditivos aos colaboradores (ABNT, 2017). Assim, a integração dos critérios acústicos ao projeto de ventilação é uma prática recomendada para garantir ambientes laborais saudáveis e produtivos.

Garantir condições adequadas de temperatura e umidade no ambiente laboral é fundamental para a saúde, o bem-estar e a produtividade. Diante dessa relevância, o próximo tópico abordará o conceito de conforto térmico em ambientes industriais e sua importância para a operação das empresas.

### 2.3 CONFORTO TÉRMICO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

O conforto térmico é um elemento essencial para a qualidade do ambiente de trabalho em instalações industriais, influenciando diretamente o bem-estar físico, a

saúde ocupacional e o desempenho produtivo dos trabalhadores. A exposição contínua a temperaturas inadequadas pode ocasionar fadiga, redução da concentração, aumento do estresse térmico e, conseqüentemente, queda na produtividade e elevação do risco de acidentes. Segundo Fanger (2021), a sensação de conforto térmico resulta do equilíbrio entre os fatores ambientais — como temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e radiação térmica — e as características fisiológicas dos indivíduos, como metabolismo e vestuário.

No contexto industrial, o desafio de garantir conforto térmico é amplificado por processos produtivos que geram calor intenso, aliados às particularidades arquitetônicas das edificações e às condições climáticas externas. Conforme estabelece a Norma Regulamentadora (NR) 17 – Ergonomia do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE, 2023), é responsabilidade das empresas implementar medidas que assegurem condições ambientais adequadas, considerando a interação entre temperatura, umidade e ventilação para minimizar o desconforto térmico e seus impactos na saúde e na produtividade.

Dentre as soluções aplicáveis, destacam-se os sistemas de ventilação mecânica e natural, que promovem a renovação e o movimento do ar, além de dispositivos de climatização, como o ar-condicionado, que permitem maior controle das variáveis térmicas. O uso de isolamento térmico em coberturas e fachadas também é uma estratégia eficiente para reduzir a transferência de calor, conforme orienta a ABNT NBR 16401-1:2022 – Instalações de condicionamento de ar – Sistemas centrais e unitários (ABNT, 2022). Tecnologias de automação, como sensores e sistemas de controle inteligente, são cada vez mais utilizadas para otimizar o desempenho desses equipamentos, ajustando as condições ambientais de forma dinâmica e eficiente.

Estudos recentes reforçam a importância dessas intervenções para a melhoria das condições de trabalho. Um exemplo é o trabalho de Sant’Ana *et al.* (2022), que avaliou a implementação de sistemas de ventilação forçada em uma indústria do setor metalúrgico, observando uma redução significativa nas reclamações de desconforto térmico e um aumento da produtividade em até 12%. Outro caso relevante foi descrito por Silva e Rodrigues (2023), ao analisarem a aplicação de soluções bioclimáticas em galpões industriais na região Norte do Brasil, evidenciando a redução do consumo

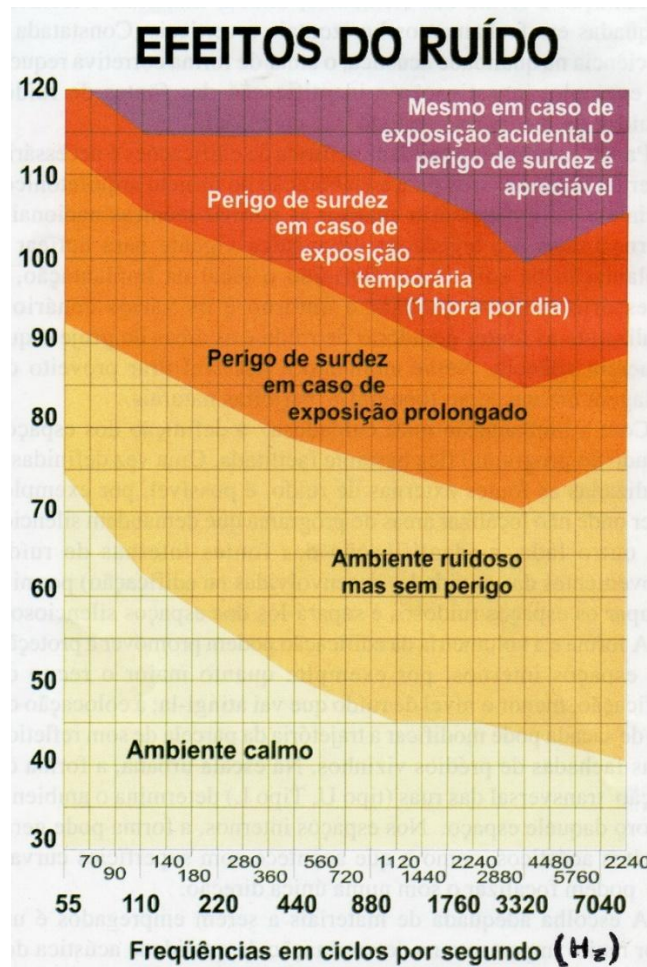
energético e a melhora do conforto térmico com estratégias de ventilação cruzada e sombreamento arquitetônico.

Dando sequência à análise dos fatores ambientais que influenciam a qualidade das condições laborais, o controle do ruído emerge como um elemento essencial para a preservação da saúde e do bem-estar dos trabalhadores, complementando as medidas voltadas ao conforto térmico. Em ambientes industriais, a exposição contínua a níveis elevados de pressão sonora representa um risco significativo à segurança, à eficiência produtiva e à saúde auditiva dos colaboradores. Nesse contexto, torna-se indispensável a identificação das principais fontes de ruído e a adoção de estratégias eficazes para sua mitigação, conforme preconizado pelas normas de saúde e segurança do trabalho.

#### 2.4 FONTES DE RUÍDO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

O ruído industrial, particularmente em sistemas de ventilação, é uma das principais fontes de desconforto ocupacional e representa um risco significativo à saúde e segurança dos trabalhadores. As vibrações mecânicas geradas por ventiladores, exaustores, motores e compressores, bem como a turbulência do ar em dutos e a propagação de vibrações por estruturas edificadas, são apontadas como as principais causas da poluição sonora nesses ambientes (Bittencourt, 2005). Tais fatores não apenas comprometem o conforto acústico, mas também afetam a produtividade e aumentam a incidência de doenças ocupacionais, como a Perda Auditiva Induzida por Ruído - PAIR, conforme estabelecido pela NR 15 - Atividades e Operações Insalubres do MTE. A Figura 2 ilustra o efeito do ruído dependendo da sua intensidade.

Figura 2 - Efeitos do ruído pela correlação da intensidade e frequência em que ocorre



Fonte: MARTINS (1975).

A literatura especializada enfatiza que o controle do ruído deve ser uma preocupação desde a etapa de projeto até a operação dos sistemas industriais. Macintyre (1990) destaca que intervenções como isolamento acústico de equipamentos, instalação de barreiras físicas, atenuadores de ruído em dutos e a correta manutenção de motores e ventiladores são medidas fundamentais para minimizar os níveis de pressão sonora. Além disso, práticas como a seleção de equipamentos de baixo ruído, o planejamento adequado do layout fabril e o uso de tecnologias avançadas, como inversores de frequência e sistemas de monitoramento contínuo, têm se mostrado eficazes na mitigação dos impactos sonoros no ambiente de trabalho.

Essas estratégias não só promovem um ambiente mais seguro e confortável, como também contribuem para a preservação da saúde auditiva dos trabalhadores e para o aumento da eficiência produtiva, consolidando-se como parte integrante das boas práticas de engenharia e gestão ambiental na indústria (Bittencourt, 2005; Macintyre, 1990; NR 15, MTE).

Para uma jornada de oito horas diárias de trabalho, o limite máximo de exposição permitido é de 85 Dba, conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente

NÍVEL DE RUÍDO dB (A)	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA PERMISSÍVEL
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

Fonte: Norma Regulamentadora NR 15 – Anexo 1, 2023.

Além do impacto no conforto acústico e na saúde dos trabalhadores, os sistemas de ventilação industrial também têm uma relevância significativa em termos de eficiência energética. O aumento da demanda por energia para operação de ventiladores e outros equipamentos pode resultar em custos elevados e impactos ambientais. Portanto, é fundamental considerar soluções que não apenas minimizem o ruído, mas também melhorem a eficiência energética desses sistemas, otimizando o uso de recursos e reduzindo os custos operacionais. Este próximo tópico aborda estratégias e tecnologias que visam aumentar a eficiência energética em sistemas de ventilação industrial.

## 2.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

A eficiência energética em sistemas de ventilação é essencial para reduzir o consumo de energia enquanto mantém a eficácia das funções do sistema. Conforme definido pela ABNT NBR 16401-3 (2015), a eficiência energética é a relação entre o benefício proporcionado por um sistema de climatização e a energia consumida por ele em um determinado período. A gestão eficiente da energia em sistemas de ventilação requer uma abordagem estratégica que inclua várias práticas recomendadas. Segundo Turner (2007), auditorias energéticas são fundamentais para identificar áreas de desperdício e potenciais melhorias no sistema. Além disso, a implementação de sistemas de medição e monitoramento contínuos permite o acompanhamento preciso do consumo de energia e a detecção de padrões de uso que podem ser ajustados para otimizar a eficiência.

A manutenção preventiva é outro pilar crucial para a eficiência energética, pois assegura que os sistemas e equipamentos funcionem corretamente, evitando falhas que possam levar ao desperdício de energia (Turner, 2007). A automação e o controle inteligente também desempenham um papel importante, permitindo que os sistemas de ventilação ajustem automaticamente sua operação com base nas necessidades reais do ambiente, otimizando o uso de energia de maneira dinâmica. Além disso, a escolha de equipamentos de alta eficiência energética, como motores e ventiladores com baixo consumo, é essencial para garantir o desempenho ideal do sistema com o mínimo gasto energético.

Avanços tecnológicos, como a utilização de ventiladores de baixo consumo e a implementação de sistemas de recuperação de calor, também têm contribuído significativamente para melhorar a eficiência energética. A recuperação de calor, por exemplo, permite que o calor do ar de exaustão seja aproveitado para pré-aquecer o ar de entrada, reduzindo a carga térmica e os custos com aquecimento (Turner, 2007). O uso de inversores de frequência para controle de velocidade variável também permite uma operação mais eficiente, ajustando a velocidade dos ventiladores conforme a demanda real do sistema, o que reduz o desperdício de energia durante períodos de carga parcial.

Essas práticas e inovações tecnológicas são fundamentais para promover a eficiência energética nos sistemas de ventilação industrial, contribuindo para a redução dos custos operacionais e a melhoria do desempenho geral dos processos

industriais. No próximo tópico, abordaremos o conforto térmico em ambientes industriais, outro aspecto crucial para a saúde e produtividade dos trabalhadores.

A eficiência energética e o conforto térmico estão intrinsecamente relacionados ao *layout* industrial, uma vez que o design do ambiente de trabalho influencia diretamente a distribuição e o desempenho dos sistemas de ventilação e climatização. Um *layout* bem planejado pode otimizar a circulação de ar, reduzir o consumo de energia e melhorar as condições térmicas, contribuindo para a saúde e produtividade dos trabalhadores. No próximo tópico, exploraremos como o *layout* industrial pode ser projetado para atender a essas necessidades, maximizando a eficiência dos sistemas e garantindo um ambiente de trabalho mais confortável e seguro.

## 2.6 LAYOUT INDUSTRIAL

O *layout* industrial desempenha um papel fundamental na eficiência dos sistemas de ventilação e climatização, influenciando diretamente o conforto térmico e a qualidade do ambiente de trabalho. Conforme discutido por Stoecker e Jones (1985), um projeto bem elaborado deve priorizar a minimização das necessidades energéticas dos sistemas de ar-condicionado e refrigeração, considerando a disposição estratégica de fontes de calor e áreas de armazenamento. A localização e o posicionamento de equipamentos devem ser cuidadosamente planejados para garantir um fluxo de ar contínuo, reduzindo as zonas de estagnação e promovendo uma ventilação eficiente. Segundo Macintyre (1990), um *layout* inadequado pode resultar em ambientes com ventilação deficiente, comprometendo a qualidade do ar e o conforto dos trabalhadores.

De acordo com McPherson e Hunter (2008), o planejamento do *layout* industrial deve considerar o controle eficaz da dispersão de contaminantes, como poeiras e vapores, por meio de uma distribuição adequada do ar e do uso de barreiras físicas. A separação de áreas limpas e contaminadas é uma medida recomendada para evitar a recirculação de poluentes, contribuindo para a manutenção da qualidade do ar. O controle térmico, outro aspecto fundamental, pode ser aprimorado com a aplicação de zonificação térmica, permitindo que diferentes setores da instalação recebam ventilação conforme suas demandas específicas. Além disso, o isolamento térmico de fontes de calor — como equipamentos e processos industriais — é essencial para

reduzir a carga térmica interna, aumentar a eficiência do sistema de ventilação e proporcionar melhores condições de conforto térmico aos trabalhadores. Tais estratégias, quando bem implementadas, resultam em ambientes mais seguros, eficientes e produtivos.

Outro aspecto essencial no planejamento do *layout* industrial é a definição correta do espaçamento e posicionamento dos ventiladores e exaustores. A disposição adequada desses equipamentos é fundamental para garantir uma distribuição uniforme do ar, evitando zonas de estagnação e assegurando a renovação do ar nas áreas de ocupação. De acordo com a ASHRAE (2019), o espaçamento entre ventiladores deve ser calculado com base em variáveis como a vazão de ar requerida (em  $\text{m}^3/\text{h}$ ), a velocidade do ar desejada no ambiente (normalmente entre 0,25 m/s e 0,5 m/s para conforto térmico), a altura do pé-direito e a geometria do espaço a ser ventilado. A fórmula básica para estimar a quantidade de ventiladores necessária considera a vazão total de ar ( $Q$ ) dividida pela capacidade individual de cada ventilador ( $q$ ), respeitando a distribuição adequada para cobrir toda a área sem sobrecarga ou deficiência de ventilação.

Além da vazão, fatores como a direção predominante do fluxo de ar, a presença de obstáculos físicos (máquinas, divisórias, estruturas) e a localização de fontes de calor ou contaminantes devem ser levados em conta para definir o espaçamento e a orientação dos ventiladores. O objetivo é criar um fluxo de ar contínuo e eficiente, que facilite a remoção de calor, partículas e vapores, sem causar desconforto por correntes de ar excessivas (Fundacentro, 2022). Segundo Stoecker e Jones (1985), em aplicações industriais, é recomendável que o fluxo de ar seja projetado para atravessar a zona ocupada com uma velocidade moderada, permitindo a troca de ar em intervalos regulares (taxa de renovação), geralmente entre 10 e 30 trocas por hora, dependendo do processo produtivo. Esses cálculos devem ser ajustados conforme a necessidade térmica do ambiente e os limites de exposição ocupacional, garantindo tanto a eficiência do sistema quanto o conforto e a segurança dos trabalhadores.

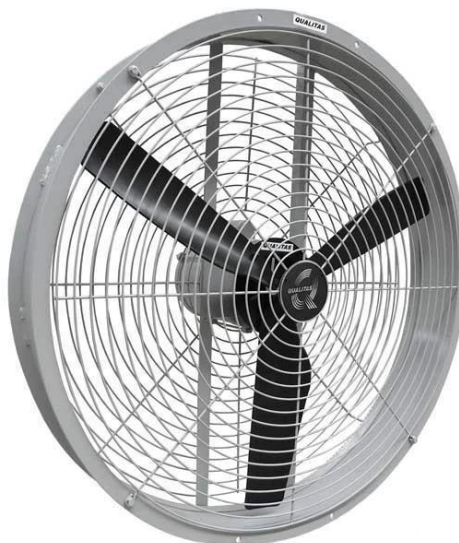
### 3 DESCRIÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DE CASO

Este estudo foi realizado em uma montadora de duas rodas situada no Polo Industrial de Manaus. A planta industrial em questão tem três galpões, com área total de aproximadamente 15 mil metros quadrados, emprega centenas de funcionários, divididos em diversas áreas de produção: logística, montagem do chassi e montagem do motor da motocicleta. A localização no Polo Industrial de Manaus apresenta desafios específicos devido ao clima tropical, caracterizado por altas temperaturas e umidade elevada. Esses fatores influenciam diretamente a eficiência dos sistemas de ventilação instalados.

A montagem do chassi e do motor ocorre no Galpão 1, foco deste estudo. A área destinada à montagem dos motores possui controle de temperatura e umidade, em razão da sensibilidade das peças e da necessidade de minimizar a presença de partículas em suspensão. Em contraste, a área de montagem do chassi — que ocupa aproximadamente 80% da área total do galpão — é ventilada por meio de ventilação mecânica utilizando ventiladores industriais.

Atualmente, estão instaladas 40 unidades equipadas com motores WEG de 0,5 CV, conforme ilustrado na Figura 3, com as seguintes especificações técnicas: Tensão: 127 V / 220 V; Potência: 1 HP e 2 HP; Corrente: 6,0 A / 3,0 A; Frequência: 60 Hz; Rotação nominal: 1110 RPM; Vazão máxima: 15.000 m<sup>3</sup>/h; Peso: 35,0 kg.

Figura 3 - Ventilador aviário industrial



Fonte: MF Rural. Ventilador aviário industrial. Itapira, SP, 2023

A principal reclamação dos funcionários é o desconforto térmico causado pelo calor excessivo e pela inadequação do direcionamento do fluxo de ar. Atualmente, a planta enfrenta um problema significativo com a realocação frequente de ventiladores, que não segue um padrão de fluxo de vento. Essa prática resulta em um ambiente ainda mais quente e desconfortável, o que gerou o alto volume de ordens de serviço para ajustes dos ventiladores sem uma solução efetiva.

Para a condução do estudo, foram utilizados os seguintes instrumentos calibrados:

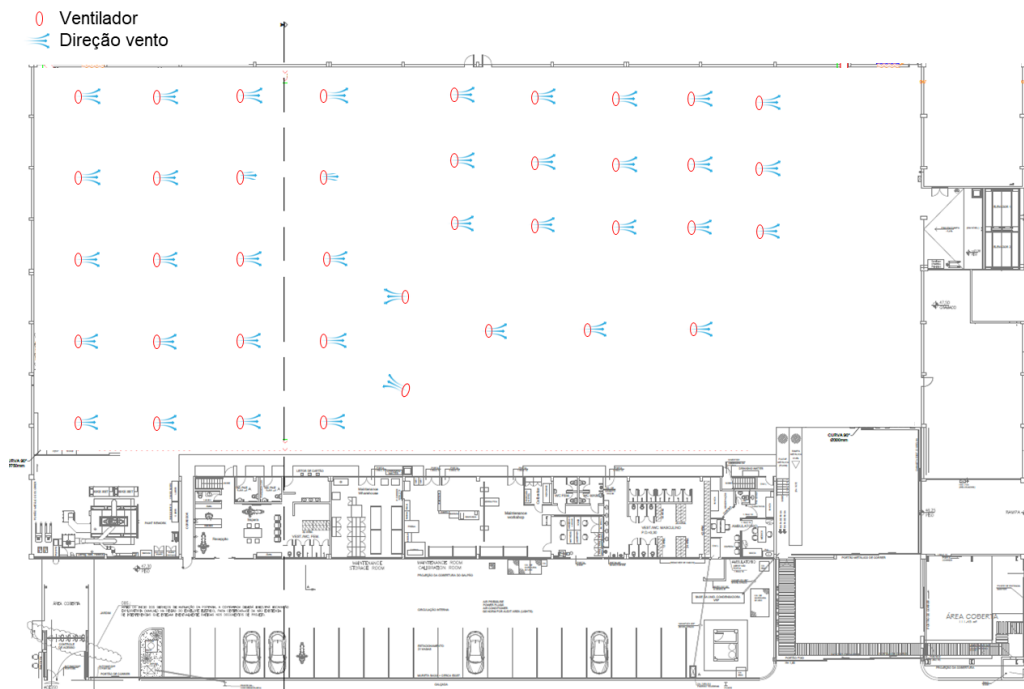
- a) Termo-higrômetro: para monitorar a temperatura ambiente e medir a umidade do ar;
- b) Decibelímetros: para medir os níveis de ruído em pontos estratégicos.

### 3.1 ANÁLISE DA SITUAÇÃO ANTERIOR

A coleta de dados foi realizada em duas etapas principais: análise do sistema de ventilação existente e avaliação das condições térmica e ergonômica ambiental interna.

Foi realizada uma inspeção visual completa do sistema de ventilação atual do galpão 1, focado nos ventiladores, uma vez que o local não possui exaustores, condutos de ar ou filtros instalados. Os ventiladores estavam instalados a aproximadamente 8 metros de altura no galpão, distribuídos com espaçamento médio em uma área de cerca de 5 m<sup>2</sup> entre unidades, conforme desenho da Figura 4 e foto de uma área do galpão na figura 5.

Figura 4 - Layout ventiladores galpão 1



Fonte: autor, 2025.

Figura 5 - Ventiladores galpão 1



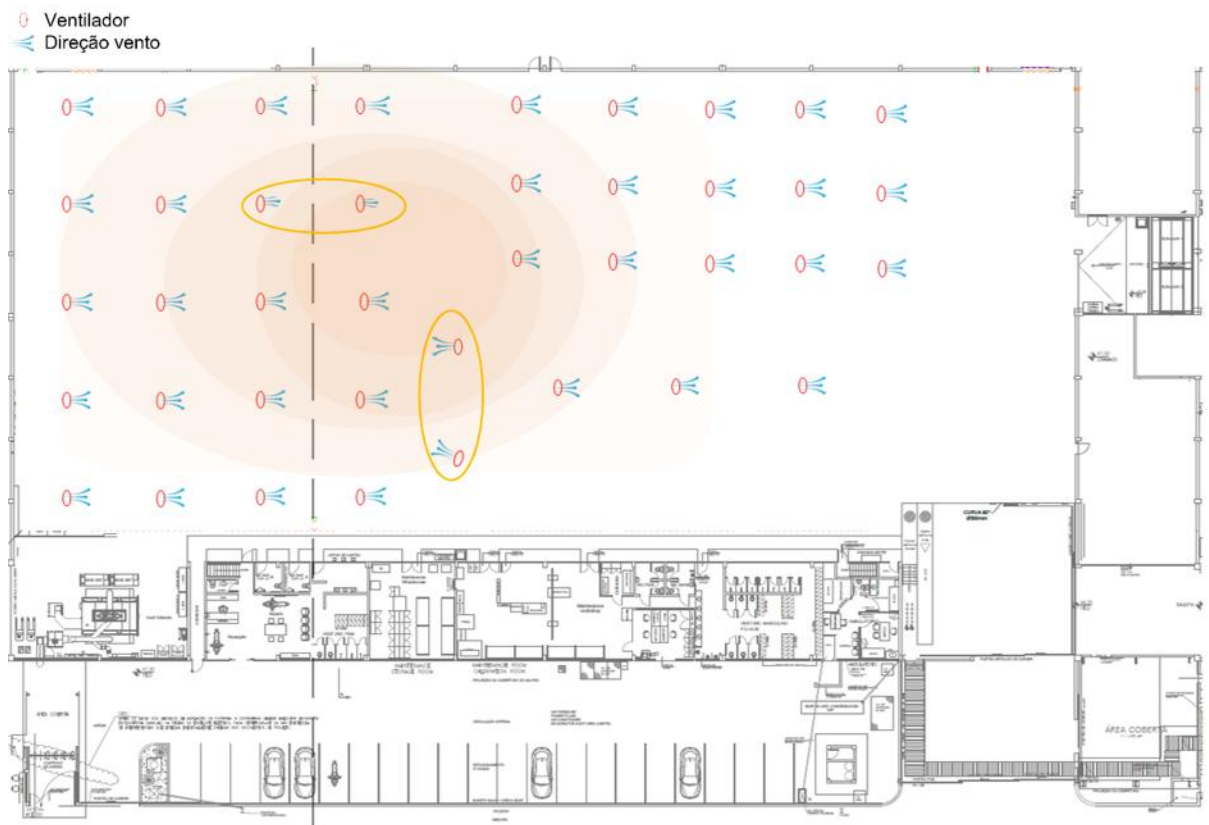
Fonte: autor, 2025.

Constatou-se que alguns ventiladores foram posicionados com inclinação dos eixos em angulação quase vertical, promovendo o fluxo de ar de cima para baixo,

enquanto outros estavam orientados em sentido contrário ao fluxo de ventilação predominante — conforme circulado em laranja na Figura 6, em resposta a reclamações de calor naquela região. Essa configuração contribuiu para a recirculação do mesmo volume de ar em uma zona específica, reduzindo a eficácia da renovação do ar e provocando acúmulo de calor local.

Tal situação agrava um fenômeno conhecido como estratificação térmica, no qual o ar quente tende a se concentrar nas regiões superiores, formando bolsões de calor em ambientes com grande volume interno e ventilação mal planejada (ASHRAE Handbook – Fundamentals, 2017; ABNT NBR 16401-1:2008). Essa condição compromete o conforto térmico e a eficiência energética do sistema de ventilação, conforme evidenciado na área destacada da Figura 6.

Figura 6 - Zonificação térmica no galpão



Fonte: autor, 2025.

Além desta inspeção visual, foi realizado um levantamento técnico detalhado dos equipamentos de ventilação. Foram coletados dados essenciais, como: capacidade de ventilação, potência dos ventiladores, e condições operacionais. Essas

informações são fundamentais para compreender a eficiência atual do sistema e identificar oportunidades de intervenção que possam melhorar o ambiente interno, isto é: temperatura, ruído e eficiência energética.

A eficiência do sistema de ventilação pode ser analisada pela Taxa de Troca de Ar (ACH). De acordo com padrões industriais, a taxa de troca de ar recomendada varia de 6 a 12 trocas por hora, dependendo do tipo de atividade e do calor gerado no ambiente. Para este cálculo Taxa de Troca de Ar, está sendo considerado 275 m<sup>3</sup>/min a vazão nominal de um ventilador a partir da ficha técnica do fabricante do ventilador, então:

$$\text{Capacidade Total de Ventilação} = \text{Qnt Ventiladores} \times \text{Vazão} \quad (1)$$

$$\text{Capacidade Total de Ventilação} = 40 \times 275 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\text{Capacidade Total de Ventilação} = 11.000 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\text{Capacidade Total de Ventilação} = 660.000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Volume do Galpão} = \text{área} \times \text{altura} \quad (2)$$

$$\text{Volume do Galpão} = 5.000 \text{ m}^2 \times 20 \text{ m}$$

$$\text{Volume do Galpão} = 100.000 \text{ m}^3$$

$$\text{Troca de Ar (ACH)} = \frac{\text{Capacidade Total de Ventilação}}{\text{Volume do Galpão}} \quad (3)$$

$$\text{Troca de Ar (ACH)} = \frac{660.000 \text{ m}^3/\text{h}}{100.000 \text{ m}^3}$$

$$\text{Troca de Ar (ACH)} = 6,6 \text{ trocas/h}$$

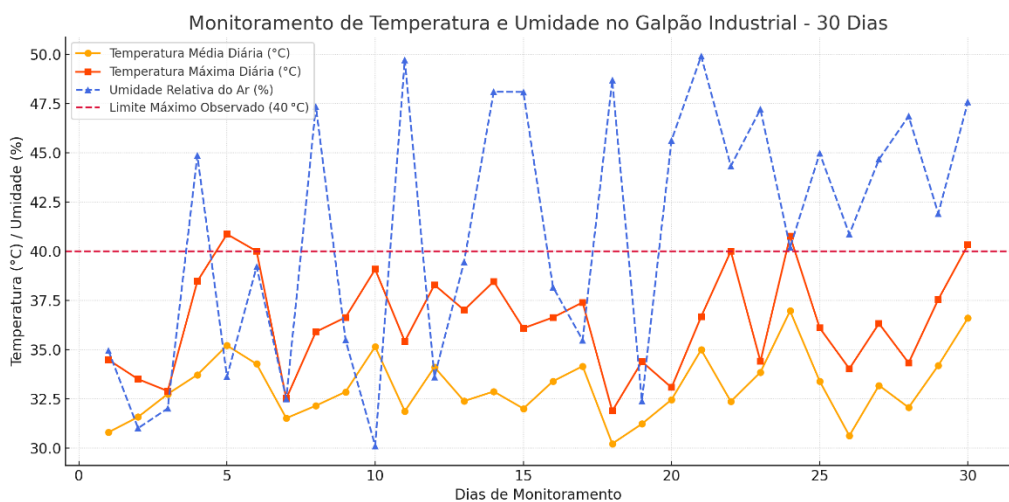
Conforme os cálculos demonstrados, para o galpão em análise, de 5.000 metros quadrados com 20 metros de altura, utilizando 40 ventiladores industriais com uma vazão de 275 m<sup>3</sup>/min cada, a taxa de troca de ar é de aproximadamente 6.6 trocas por hora.

Com uma taxa de troca de ar de 6,6 trocas por hora, o sistema de ventilação está no limite inferior da faixa recomendada, indicando que o sistema é eficiente, mas próximo ao mínimo necessário, com base nas recomendações da ASHRAE 62.1 e práticas da ABNT NBR 16401 – Instalações de condicionamento de ar, para ambientes industriais. Se o ambiente requer um controle mais rigoroso da qualidade

do ar ou se há produção significativa de calor ou contaminantes, pode ser necessário aumentar a capacidade de ventilação.

Para medição de temperatura e umidade, foram instalados termômetros e higrômetros em pontos estratégicos da planta para monitorar a temperatura e a umidade relativa durante um período de 30 dias. As medições foram feitas em intervalos regulares para captar variações ao longo do dia e das diferentes condições operacionais. Verificou-se que em dias mais quentes a temperatura no local de trabalho chegava até 40 graus celsius, conforme Gráfico 1.

Gráfico 1 - Monitoramento de temperatura e umidade - ventiladores

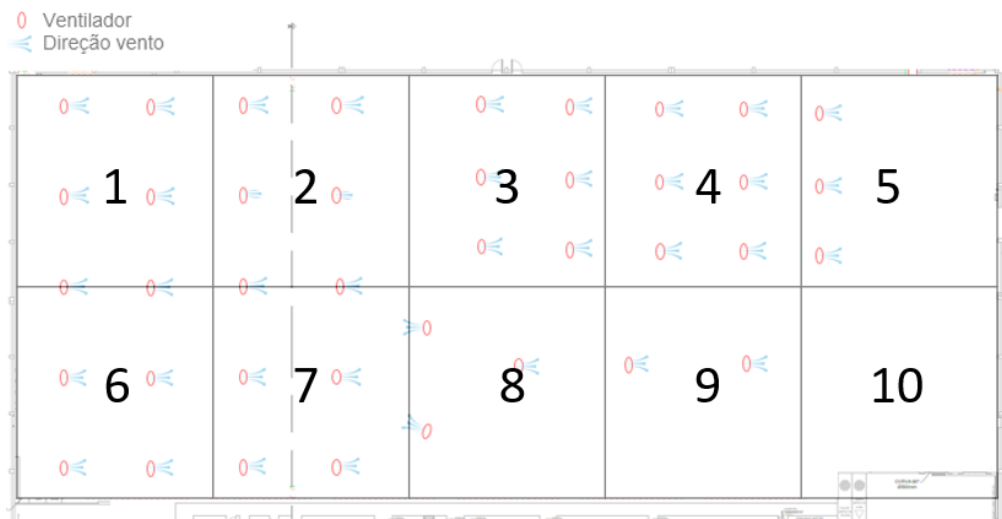


Fonte: autor, 2025.

Segundo a NR 17 de ergonomia, quando o ambiente não é climatizado, deve-se garantir que os parâmetros de temperatura, umidade, velocidade do ar e radiação térmica estejam dentro de faixas que não prejudiquem a saúde e o desempenho dos trabalhadores, e para o resultado das medições deve haver uma intervenção técnica (Brasil, 2015).

Para o monitoramento de ruído utilizou-se decibelímetros para medir os níveis de ruído em diferentes áreas do Galpão 1, separadas igualmente conforme Figura 8 especialmente durante os horários de pico. Essas medições ajudaram a identificar as principais fontes de ruído e avaliar a necessidade de intervenções específicas

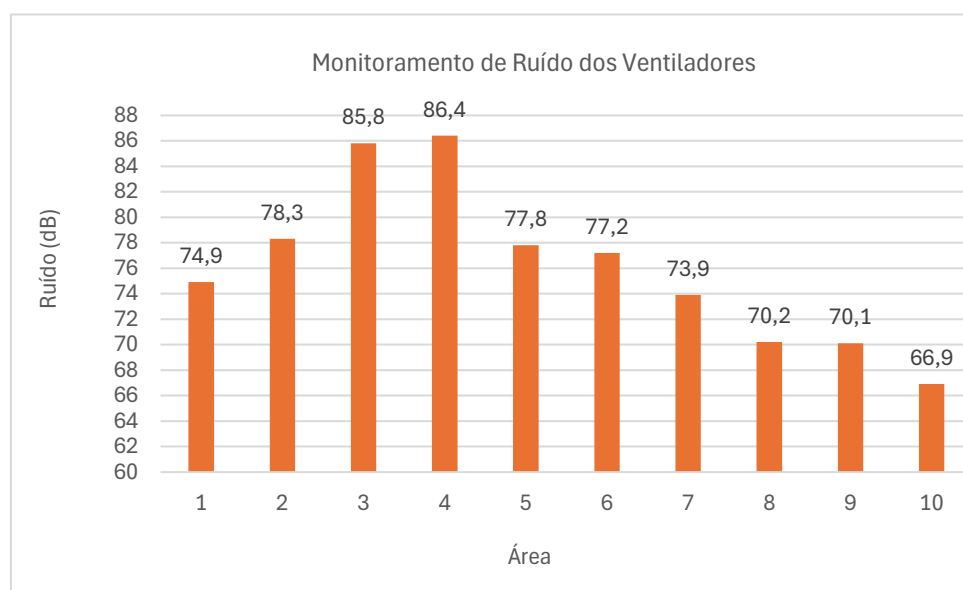
Figura 7 - Divisão de área galpão 1 para monitoramento sonoro



Fonte: autor, 2025.

De acordo com o Gráfico 2 de monitoramento sonoro, os níveis de ruído variaram entre 69,9 dB e 86,4 dB, dependendo da localização e da quantidade de ventiladores em operação. Observou-se que a principal fonte de poluição sonora é proveniente dos próprios ventiladores, uma vez que o galpão possui poucas máquinas em funcionamento, predominantemente prensadoras, cujo ruído é intermitente e não contínuo.

Gráfico 2 - Monitoramento de ruído ventiladores



Fonte: autor

De acordo com a NR-15, Anexo 1- Limites de Tolerância para Ruído Contínuo ou Intermitente , o limite de tolerância para exposição contínua ou intermitente ao ruído é de 85 dB(A) para uma jornada de até 8 horas diárias. Esse valor representa o nível máximo permitido para proteger a saúde auditiva dos trabalhadores sem necessidade de medidas adicionais, considerando uma exposição diária contínua. Acima desse limite, o tempo máximo de exposição deve ser reduzido conforme a tabela da norma.

No caso analisado, os níveis de ruído registrados ultrapassam os 85 dB(A), tornando-se obrigatória a implementação de medidas de controle coletivo e/ou individual. Entre essas, destaca-se o uso de protetores auditivos, que é exigido de todos os funcionários ao ingressarem na área, como medida preventiva de proteção auditiva.

Então, para estimar o impacto energético da utilização dos ventiladores industriais, considerou-se a operação de 40 unidades por galpão, cada uma com potência de 2HP (equivalente a 1,471 kW). Com isso, a potência total instalada para ventilação atinge 58,84 kW.

$$P_{tot}=40 \times 1,471=58,84 \text{ kW} \quad (1)$$

A fábrica opera 8 horas por dia, 5 dias por semana, totalizando aproximadamente 2.080 horas anuais de funcionamento.

$$T=8 \times 5 \times 52=2.080 \text{ h/ano} \quad (2)$$

Multiplicando-se essa potência pelo número de horas anuais de operação, obtém-se um consumo anual de energia de 122.387,2 kWh por galpão.

$$E \text{ anual} = 58,84 \times 2.080 = 122.387,2 \text{ kWh} \quad (3)$$

Considerando a tarifa de R\$ 1,53 por kWh no horário de pico em Manaus em 2024, o custo energético anual associado ao funcionamento contínuo desses ventiladores é de aproximadamente R\$ 187.253,42.

$$C \text{ anual}=122.387,2 \times 1,53=R\$187.253,42 \quad (4)$$

Esse valor representa um impacto direto no custo operacional do galpão e destaca a importância de avaliar alternativas mais eficientes de ventilação industrial.

Adicionalmente, devido ao enquadramento da área como ambiente insalubre devido ao calor da temperatura e nível de ruído, há um impacto econômico associado, com a inclusão de um adicional de R\$ 308,99 por colaborador, referente ao pagamento mensal do adicional de insalubridade aplicado à mão de obra exposta de 160 colaboradores. Esse valor de R\$ 593.293,80 deve ser considerado na composição de custos operacionais da planta.

$$C_{\text{anual insalubridade}} = 308,99 \times 160 \times 12 \text{ meses} = R\$593.260,80/\text{ano} \quad (1)$$

### 3.2 ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL

Assim como na etapa anterior, a coleta de dados foi realizada em duas fases principais: a análise do sistema de ventilação existente e a avaliação das condições térmicas e ergonômicas do ambiente interno. No cenário atual, foi realizado um estudo de fornecedores para climatização do ambiente como mínimo de mudança estrutural e foram instalados dois equipamentos de aeração condicionada, modelo GH40 da marca *CoolSeed*, com alimentação trifásica móvel de 380 V, frequência de 60 Hz e potência nominal de 88,4 kW cada (Figura 10).

Figura 8 - Equipamento de aeração condicionada GCH40

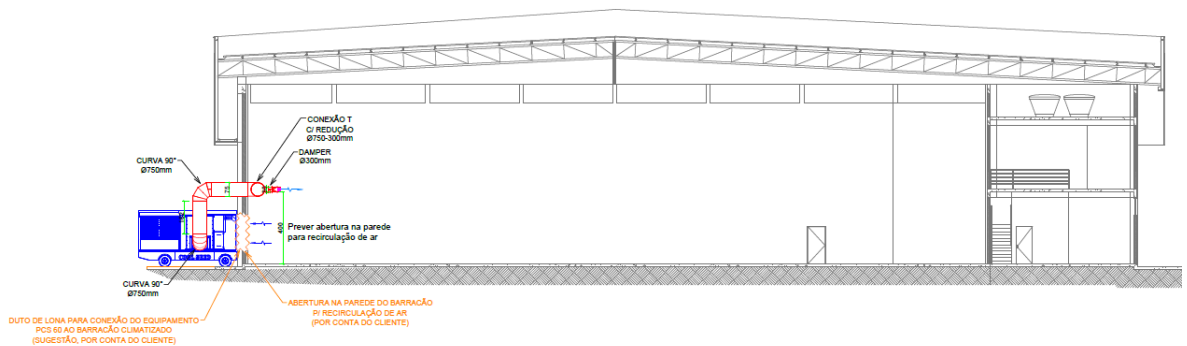


Fonte: autor, 2025.

Esses equipamentos foram posicionados em locais estratégicos para maximizar a eficiência da circulação de ar e minimizar os efeitos da estratificação térmica anteriormente identificada. A disposição dos sistemas de climatização pode ser visualizada na Figura 11, enquanto o layout completo da área está representado na Figura 12.

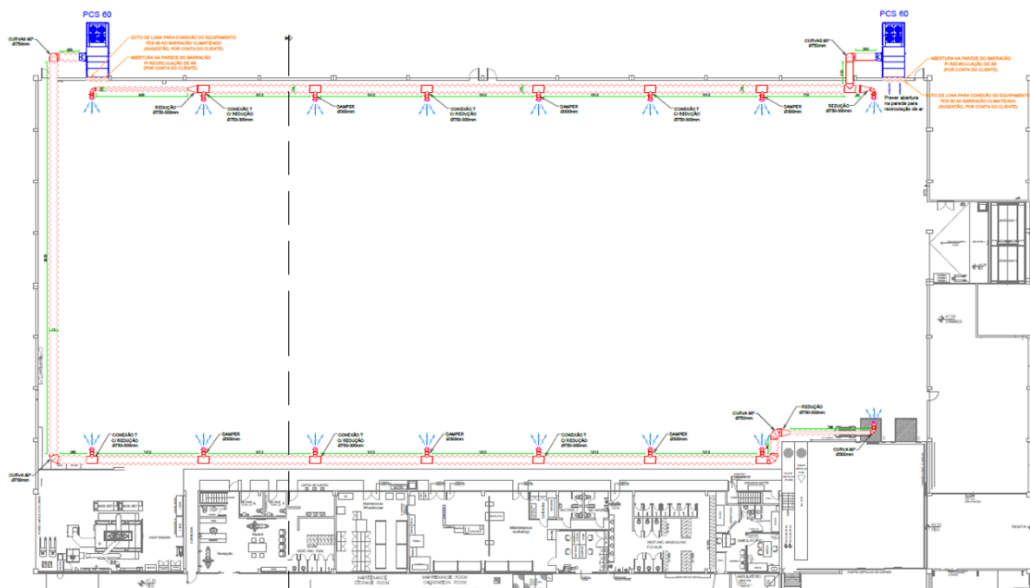
O sistema de aeração inclui dutos de distribuição de ar que percorrem toda a extensão do galpão, permitindo uma ventilação homogênea e eficiente em toda a área coberta, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 9 - Desenho instalação equipamento de aeração condicionada



Fonte: autor, 2025.

Figura 10 - Layout instalação de ventilação condicionada



Fonte: autor, 2025.

Figura 11 - Sistema de tubulação para distribuição de ar

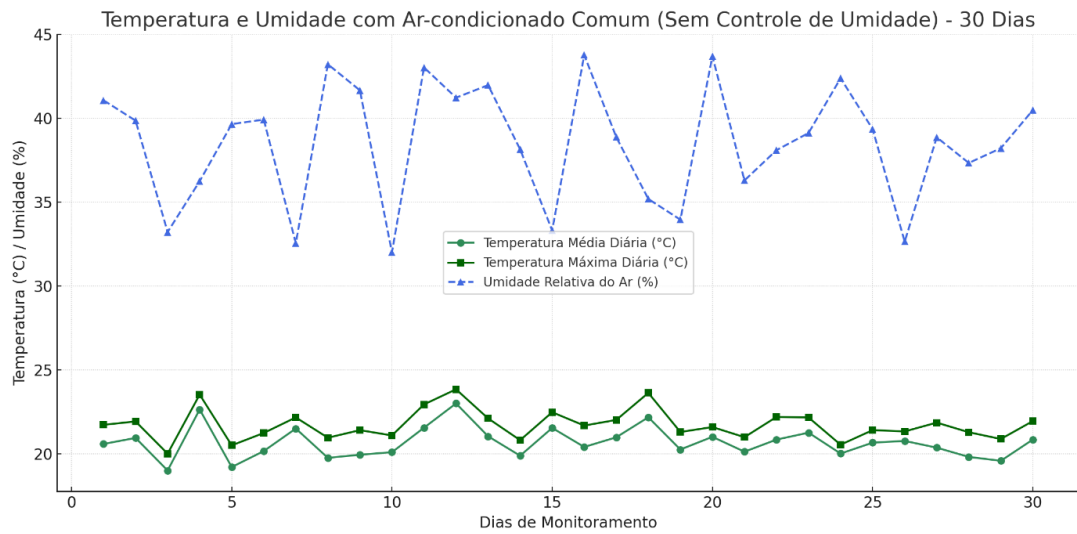


Fonte: autor, 2025.

O investimento total para a implementação do novo sistema de climatização foi estimado em R\$ 3.600.000,00, distribuídos entre os principais componentes do projeto. A maior parte dos recursos foi destinada à aquisição dos equipamentos de aeração condicionada da marca *CoolSeed*, totalizando R\$ 3.000.000,00. Adicionalmente, foram investidos R\$ 350.000,00 na instalação de cortinas de ar para isolamento térmico, R\$ 200.000,00 em obras civis necessárias para adequação da infraestrutura, e R\$ 50.000,00 no fechamento com telhas, a fim de garantir a eficiência térmica do sistema como um todo.

Com a implementação dos equipamentos de aeração condicionada, foi conduzido um monitoramento ambiental durante 30 dias, utilizando termômetros e higrômetros instalados em pontos estratégicos da planta. As medições foram realizadas em intervalos regulares ao longo do expediente, contemplando diferentes condições operacionais. Os resultados indicaram que a temperatura do ambiente de trabalho se manteve estável entre 20 °C e 22 °C, enquanto a umidade relativa do ar permaneceu dentro dos parâmetros controlados, garantindo um ambiente climatizado e adequado para as atividades industriais. Esses dados estão representados graficamente no Gráfico 3.

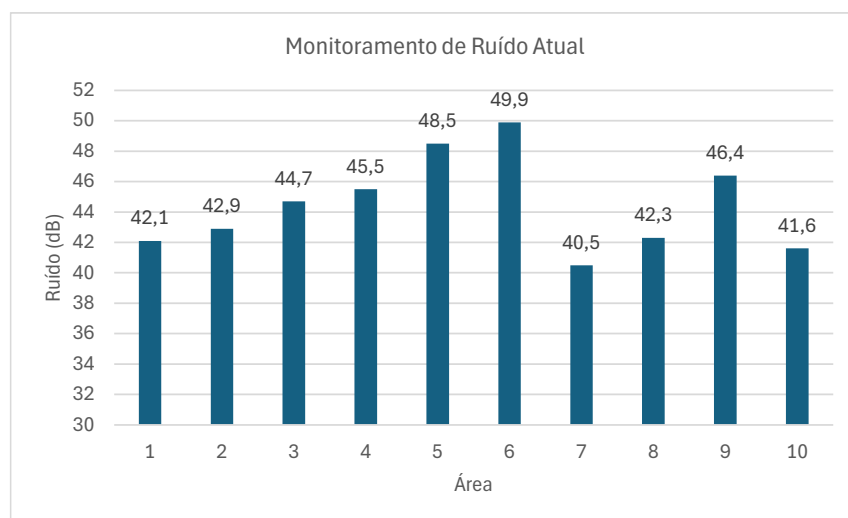
Gráfico 3 - Monitoramento de temperatura e umidade - ar-condicionado



Fonte: autor, 2025.

Segundo a mesma metodologia aplicada anteriormente, foi realizado o monitoramento dos níveis de ruído no Galpão 1 por meio de decibelímetros devidamente calibrados. As medições foram realizadas em dez áreas distintas do galpão, conforme já apresentado na Figura 6. Os valores registrados variaram entre 40,5 dB e 49,9 dB, indicando um ambiente com baixos níveis de pressão sonora, compatíveis com as condições de conforto acústico recomendadas para ambientes industriais não ruidosos. Os resultados obtidos estão representados graficamente no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Monitoramento de ruído atual



Fonte: autor, 2025.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A situação anterior apresentava um cenário de desconforto térmico severo, com temperaturas que chegavam a 40 °C em dias mais quentes. Essa condição não atendia aos critérios mínimos de conforto definidos pela NR 17 (BRASIL, 2023), a qual exige ambientes com parâmetros adequados de temperatura, umidade, ventilação e radiação térmica. Segundo Fanger (2021), a sensação de conforto térmico é diretamente influenciada pela temperatura do ar e velocidade de ventilação, fatores que estavam sendo negativamente afetados por má orientação dos ventiladores e presença de bolsões de ar quente (estratificação térmica).

O problema de estratificação térmica, detectado por meio da análise do layout e fluxo de ar no galpão, é amplamente discutido pela ASHRAE (2017), que destaca a importância de uma distribuição homogênea do ar para evitar acúmulos térmicos. A instalação irregular dos ventiladores, com orientações conflitantes, contribuiu para a recirculação do ar quente, reduzindo a eficiência do sistema.

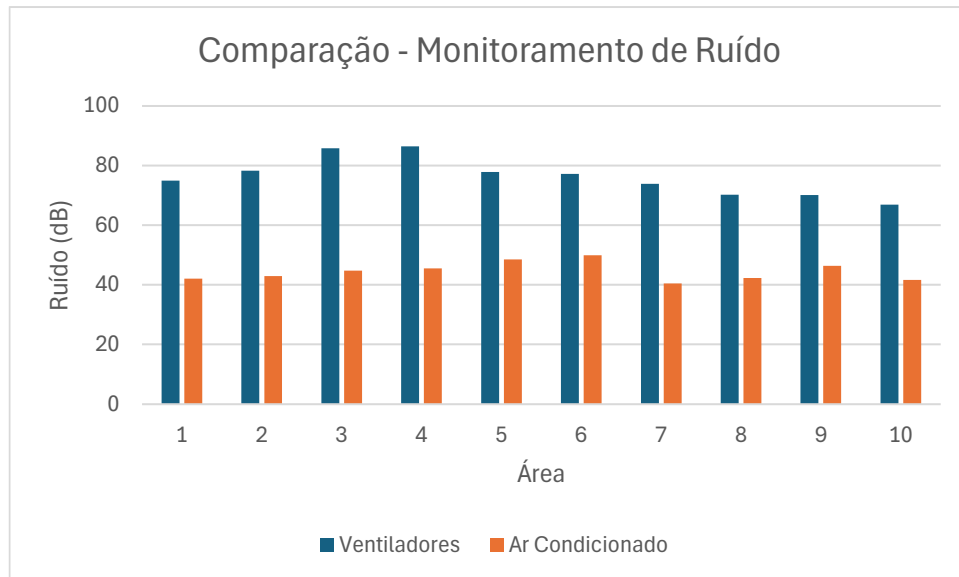
Além disso, embora a taxa de troca de ar (ACH) estivesse dentro do limite mínimo recomendado pelas normas técnicas — 6,6 trocas/h, conforme a ASHRAE 62.1 —, sua eficácia estava comprometida devido à má distribuição espacial dos ventiladores e ausência de exaustão. McPherson e Hunter (2008) já apontavam que o planejamento inadequado do layout compromete significativamente a eficiência dos sistemas de ventilação, ao não considerar a localização de fontes de calor, obstáculos físicos e direcionamento do fluxo de ar.

A substituição dos ventiladores por um sistema de aeração condicionada GH40, com distribuição por dutos e cortinas de ar, demonstrou um impacto expressivo nos parâmetros ambientais. As temperaturas passaram a se manter entre 20 °C e 22 °C, atendendo perfeitamente ao conforto térmico recomendado por Frota e Schiffer (2003) e pela NBR 16401-1:2022, que indicam essa faixa como ideal para ambientes industriais.

Adicionalmente, os níveis de ruído foram reduzidos de até 86,4 dB para uma faixa entre 40,5 dB e 49,9 dB, uma melhora significativa conforme os limites estabelecidos pela NR 15, que exige controle em ambientes com exposição superior a 85 dB(A). A redução também está em conformidade com a NBR 10152, que orienta

sobre conforto acústico e níveis aceitáveis de pressão sonora para ambientes de trabalho, conforme Gráfico 5.

Gráfico 5 - Gráfico comparativo: monitoramento de ruído



Fonte: autor, 2025.

Do ponto de vista econômico e operacional, mesmo com o aumento no consumo energético anual (de aproximadamente 122.387 kWh para 239.033 kWh), o novo sistema elimina o pagamento de insalubridade, que somava mais de R\$ 590 mil/ano, além de reduzir custos indiretos com ordens de serviço e paradas operacionais.

Com a implementação dos dois equipamentos de aeração condicionada modelo GH40 da marca *Cool/Seed*, a estimativa de consumo energético anual é de R\$ 365.753,40. Este valor é calculado considerando a potência nominal de 88,4 kW por equipamento, um fator de carga de 0,65, e operação de 8 horas por dia, 5 dias por semana, durante 52 semanas ao ano.

$$P_{tot} = 88,4 \times 0,65 \times 2 = 114,92 \text{ kW} \quad (1)$$

$$T = 8 \times 5 \times 52 = 2.080 \text{ h/ano} \quad (2)$$

$$E_{anual} = 114,92 \times 2.080 = 239.033,6 \text{ kWh} \quad (3)$$

$$C_{anual} = 239.033,6 \times 1,53 = R\$365.71,408 \quad (4)$$

Embora o custo energético elevado, é importante considerar que esse investimento proporciona controle térmico preciso, mantendo a temperatura entre O investimento total de R\$ 3.600.000,00, apesar de elevado, pode ser compensado em médio prazo por meio da redução dos custos operacionais e melhoria da produtividade, como apontado por Sant'Ana et al. (2022), que identificaram ganhos de até 12% na produtividade com a adoção de sistemas de ventilação forçada em ambiente similar. Ao considerar apenas a eliminação dos custos com insalubridade anual de R\$ 593.293,80 o *payback* do investimento pode ser obtido em seis anos e um mês, através do cálculo:

$$\textit{Payback} = \frac{\text{Valor investido}}{\text{Lucro anual}} \quad (1)$$

$$\textit{Payback} = \frac{3.600.000}{593.293,80} \quad (1)$$

$$\textit{Payback} = 6,06 \text{ anos} \quad (1)$$

## 5 CONCLUSÃO

O presente estudo abordou a análise e a readequação do sistema de ventilação industrial em uma montadora de motocicletas localizada no Polo Industrial de Manaus, com foco na eliminação de bolsões de ar quente, melhoria do conforto térmico e otimização da produtividade dos colaboradores. A pesquisa identificou que o sistema de ventilação existente, composto por ventiladores industriais, não era eficiente o suficiente para garantir um ambiente térmico adequado, com a formação de zonas de calor excessivo e desconforto para os trabalhadores. A análise das condições térmicas e ergonômicas, juntamente com a avaliação do consumo energético, revelou que o sistema atual estava operando no limite inferior das condições recomendadas, comprometendo tanto o conforto quanto a eficiência energética.

A implementação de um novo sistema de aeração condicionada foi a solução proposta, com dois equipamentos CoolSeed GH40, que, apesar do custo energético anual elevado, proporcionaram um ambiente mais controlado, com temperaturas entre 20°C e 22°C, e melhoraram significativamente as condições térmicas e ergonômicas. Esse novo sistema também eliminou os bolsões de ar quente e otimizou a qualidade do ar, criando um ambiente de trabalho mais seguro e confortável, impactando diretamente na produtividade e bem-estar dos colaboradores.

Além disso, a eliminação do pagamento de insalubridade para 160 colaboradores, que totalizava R\$ 593.260,80 anuais, representa uma economia significativa para a empresa, com o *payback* sobre o investimento em seis anos e um mês, compensando parte dos custos do novo sistema de ventilação e destacando a importância de soluções que promovam não só a eficiência energética, mas também o bem-estar dos trabalhadores.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 10152: Acústica — Níveis de ruído para conforto acústico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 16401: Instalações de ar-condicionado — Sistemas centrais e unitários — Parte 1: Projetos das instalações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 16401-3: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 3: Qualidade do ar interior**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 16401-2:2023 – Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários - Parte 2: Parâmetros de conforto térmico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 16401-1:2022. Instalações de Ar-Condicionado — Sistemas Centrais e Unitários — Parte 1: Projetos das Instalações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASHRAE – American Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers, HVAC. **ASHRAE Handbook – HVAC Applications**. Atlanta: ASHRAE, 2022.

ASHRAE – American Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers, HVAC. **Fundamentals SI**. 2017. Disponível em: <https://archive.org/details/ashraehandbook2017hvacfundamentalssi>. Acesso em: 22 maio 2025.

BISCHOFF, KENNETH B.; MCDUGALL, LINDON A. **Industrial ventilation: a manual of recommended practice for design**. 27. ed. Cincinnati: ACGIH, 2010.

MARTINS, JOÃO ALCINO. **Ruído Urbano – Aspecto Industrial**, FAU USP/IPT, 1975.

BITTENCOURT, LEONARDO; CÂNDIDO CHRISTHINA. **Introdução à Ventilação Natural**. Maceió, EdUFAL, 2005.

BITTENCOURT, LUIS R. **Ventilação Industrial: Princípios e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

BITTENCOURT, LUIZ. **Projeto acústico de edifícios industriais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego (MTE). **Norma Regulamentadora NR 15: Atividades e operações insalubres**. Brasília, 2023. Disponível em:

<https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-15>. Acesso em: 14 maio 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora NR 17: Ergonomia**. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-17>. Acesso em: 14 maio 2025.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering**. 2nd ed. Copenhagen: Danish Technical Press, 2021.

FERREIRA, L. V.; ALMEIDA, S. S. **A importância da Amazônia na dinâmica climática do planeta**. Revista Brasileira de Geografia, v. 62, n. 1, p. 5–20, 2011. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/7484/748481122004.pdf>. Acesso em: 22 maio 2025.

FIELD, D.; CUTHBERT, D. **Ventilation and Indoor Air Quality in Hospitals**. London: Routledge, 2019.

FROTA, ANÉSIA B.; SCHIFFER, SUELI R.; **Manual de Conforto Térmico**; 7a ed.; São Paulo; Studio Nobel; 2003.

FUNDACENTRO – Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho. **Manual de segurança em sistemas de ventilação industrial**. São Paulo: Fundacentro, 2022.

LAMBERTS, ROBERTO; DUTRA, LÚCIA; PEREIRA, FREDERICO. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW Editores, 1997.

MACINTYRE, ARCHIBALD JOSEPH. **Ventilação industrial e controle da poluição**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1990.

MACINTYRE, D. A. **Ventilation and air-conditioning engineering**. New York: Pergamon Press, 1990.

MCPHERSON, R.; HUNTER, R. P. **Ventilação Industrial – Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.

MELO JÚNIOR, A. L. DE, & MORAIS, R. DE. **Estudo de caso como estratégia de investigação qualitativa em educação**. Ensaios Pedagógicos, 2(1), 26–33, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.14244/enp.v2i1.59>. Acesso em: 18 maio 2025.

MTE. **Norma Regulamentadora NR 17 — Ergonomia**. Ministério do Trabalho e Emprego, 2023.

PEREIRA, A. S., SHITSUKA, D. M., PARREIRA, F. J., & SHITSUKA, R. **Metodologia da pesquisa científica**. UFSM, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/15824>. Acesso em: 18 maio 2025.

PEREZ, NESTOR PROENZA. **Sistemas de Fluxo de Massa – Aula 19: Controle de Desempenho**. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2014. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/nestorproenzaperez/sfm-2014-aula-19.pdf>. Acesso em: 20 maio 2025.

PRODANOV, C. C., & FREITAS, E. C. DE. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico** (2ª ed.). Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

REYNOLDS, DENNIS; WENZEL, MICHAEL. **HVAC: heating, ventilating, and air conditioning**. 4. ed. Tinley Park: Goodheart-Willcox, 2004.

SANT'ANA, R. A.; OLIVEIRA, M. G.; SILVA, D. P. **Impacto da Ventilação Forçada no Conforto Térmico em Ambientes Industriais**. Revista Brasileira de Engenharia de Produção, v. 12, n. 3, p. 56-67, 2022.

SILVA, L. F.; RODRIGUES, J. C. **Estratégias Bioclimáticas para Ambientes Industriais no Clima Equatorial**. Cadernos de Arquitetura e Sustentabilidade, v. 8, n. 1, p. 45-58, 2023.

SUFRAMA - SUPERINTENDÊNCIA DA ZONA FRANCA DE MANAUS. **Indústria**. Disponível em: <https://www.gov.br/suframa/pt-br/assuntos/industria>. Acesso em: 22 maio 2025.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e ar-condicionado**. São Paulo: Makron Books, 1985.

TURNER, WAYNE C. **Energy Management Handbook**. 6th ed. Lilburn: The Fairmont Press, 2007.

VILLAR ALÉ, JANETE. **Ventilação industrial: projeto, execução e avaliação**. São Paulo: Erica, 2011

YIN, ROBERT K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.