

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE PARA MITIGAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA ELEVADA EM UMA  
MARCENARIA

por

Lucas Vinicius Loebens

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, setembro de 2023

## CIP - Catalogação na Publicação

Loebens, Lucas Vinicius  
ANÁLISE PARA MITIGAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA ELEVADA  
EM UMA MARCENARIA / Lucas Vinicius Loebens. -- 2023.  
20 f.  
Orientador: Cirilo Seppi Bresolin.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Marcenaria. 2. Umidade. 3. Ventilação. 4.  
Desumidificação. 5. Climatização. I. Bresolin, Cirilo  
Seppi, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Lucas Vinicius Loebens

ANÁLISE PARA MITIGAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA ELEVADA EM UMA  
MARCENARIA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignacio Iturrioz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Cirilo Seppi Bresolin

Comissão de Avaliação:

Prof. Cirilo Seppi Bresolin (Presidente)

Prof. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Prof<sup>a</sup>. Leticia Jenisch Rodrigues

Porto Alegre, setembro de 2023

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família por todo apoio desde o início desta caminhada, a qual foi essencial para que eu pudesse ter chegado aqui com tal preparação. Agradeço de maneira especial minha namorada que esteve comigo neste período incentivando e auxiliando no desenvolvimento deste trabalho. Por último agradeço também ao professor Cirilo pelo apoio e direcionamento durante o desenvolvimento do trabalho.

*“A persistência é o caminho do êxito.”*

*Charles Chaplin*

Loebens, Lucas. **Análise para Mitigação da Umidade Relativa Elevada em Uma Marcenaria**. 2023. 54. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## RESUMO

Foi proposta uma análise do ambiente industrial de uma marcenaria para reduzir os altos níveis de umidade do ar. A madeira é um material higroscópico, que se degrada na presença de água e umidade. No caso de uma marcenaria, a degradação do matéria-prima gera prejuízos financeiros. Com o objetivo de definir formas de controlar os níveis de umidade foi analisada a forma de que o pavilhão foi construído, incluindo disposição de aberturas e materialidade e realizadas medições de temperatura e umidade no local para avaliar a viabilidade de aplicação de sistemas de ventilação, desumidificação ou climatização. Estimou-se a perda de material causada pela umidade para avaliar o retorno de investimento de cada um dos sistemas. A perda de material anual estimada representa em torno de 75 chapas de MDF e um valor de R\$ 22.500,00 por ano. Considerando o aumento de produção estimado para o ano de 2024, esse valor deve chegar aos R\$ 33.600,00. Dentre as alternativas propostas para a solução do problema de umidade todos tiveram VPL positivo, representando que são investimentos que se pagam ao longo do tempo avaliado, que foi um período de 10 anos. O projeto que oferece o maior retorno para a empresa é da ventilação natural com VPL de R\$ 166.279,34.

**PALAVRAS-CHAVE:** Marcenaria, Umidade, Ventilação, Desumidificação, Climatização.

Loebens, Lucas. **Analysis for Mitigation of High Relative Humidity in a Woodwork Facility**. 2023. 54. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## ABSTRACT

An analysis of the industrial environment of a joinery was proposed to reduce the high levels of air humidity. Wood is a hygroscopic material, which degrades in the presence of water and humidity. In the case of a joinery, the degradation of the raw material generates financial losses. With the aim of defining ways to control humidity levels, the way the pavilion was built was analyzed, including the arrangement of openings and materiality, and measurements of temperature and humidity were carried out on site to assess the feasibility of applying ventilation, dehumidification, or air conditioning systems. The material loss caused by humidity was estimated to evaluate the return on investment of each of the systems. The estimated annual material loss represents around 75 MDF sheets and a value of R\$ 22,500.00 per year. Considering the estimated increase in production for the year 2024, this value should reach R\$ 33,600.00. Among the proposed alternatives for solving the humidity problem, all had a positive NPV, representing that they are investments that pay for themselves over the evaluated period, which was a period of 10 years. The project that offers the highest return for the company is natural ventilation with a NPV of R\$ 166,279.34.

**KEYWORDS:** Woodwork, Humidity, Ventilation, Dehumidification, Air Conditioning

## LISTA DE ABREVIATURAS

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
MDF	Medium density fiberboard
VPL	Valor presente líquido
COP	Coefficient of Performance
UR	Umidade Relativa do ar
ACH	Air changes per hour
PMV	Predicted mean vote

## LISTA DE SÍMBOLOS

$w$	Conteúdo de umidade	g/kg
$p_v$	Pressão de vapor de água no ar	kPa
$p_{sat}$	Pressão de saturação da água na temperatura do ar	kPa
$UR_i$	Umidade relativa do ar interna	%
$UR_e$	Umidade relativa do ar externa	%
$T_d$	Temperatura de orvalho	°C
$T$	Temperatura do ar	°C
$\dot{m}_w$	Massa de água condensada	Kg
$\dot{m}_a$	Massa de ar	Kg
$w_e$	Conteúdo de umidade na entrada do processo	g/kg
$w_s$	Conteúdo de umidade na saída do processo	g/kg
$V_{\text{água}}$	Volume de água retirado do ar	m <sup>3</sup> /dia
$V$	Vazão de ar de ventilação	m <sup>3</sup> /h
$A$	Área	m <sup>2</sup>
$v$	Velocidade média dos ventos na região	pés/s
$V_t$	Vazão do ar proporcionado pelo efeito chaminé	pés <sup>3</sup> /h
$H_1$	Diferença de altura entre entrada e saída do ar	pés
$T_i$	Temperatura interna do ar	°C
$T_e$	Temperatura externa	°C
$D_{mat}$	Desperdício de material	R\$
$P_{MDF}$	Valor do m <sup>2</sup> de MDF	R\$/m <sup>2</sup>
$A_{perdida}$	Área de matéria prima desperdiçada	m <sup>2</sup>
$Q$	Carga térmica	kW
$U$	Coefficiente global de transferência de calor	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$R$	Condutividade térmica dos materiais	W/(m·K)
$\dot{V}$	Vazão de ar externo que entra no pavilhão por infiltração	m <sup>3</sup> /h
$c_p$	Calor específico	J/(kg·K)
$G$	Gasto em energia elétrica	R\$
$P$	Potência elétrica	kW
$T_{op}$	Tempo de operação	horas
$FC$	Fluxo de caixa	R\$

## SÍMBOLOS GREGOS

$\varphi$	Grandeza adimensional relacionada ao posicionamento das aberturas em uma edificação para o cálculo de ventilação	Adimensional
$\rho$	Massa específica	$\text{kg m}^{-3}$

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação .....	1
1.2 Objetivo .....	1
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>2</b>
2.2 Umidade relativa do ar .....	2
2.3 Temperatura de orvalho.....	2
2.4 Processo de desumidificação .....	2
2.4.1 Processo de desumidificação por condensação .....	3
2.5 Climatização artificial.....	3
2.5.1 Conforto térmico em ambientes industriais.....	4
2.5.2 Carga térmica.....	4
2.6 Ventilação em pavilhões industriais .....	4
2.6.1 Ventilação natural.....	5
2.6.2 Ventilação Mecânica .....	5
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>6</b>
3.1 Contextualização do local de estudo .....	6
3.2 Perda de Material.....	7
3.3 Coleta de dados.....	8
3.4 Projeto do sistema de ventilação .....	8
3.4.1 Ventilação Natural .....	9
3.4.2 Ventilação Mecânica .....	9
3.5 Climatização .....	9
3.5.1 Telhado Isolante .....	11
3.6 Projeto do sistema com desumidificadores .....	11
3.7 Estimativa de custos de operação .....	11
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>12</b>
4.1 Coleta de dados.....	12
4.2 Perda de processo .....	12
4.3 Ventilação natural.....	12
4.4 Ventilação mecanizada .....	13
4.5 Climatização .....	14
4.5.1 Telhado Isolante .....	14
4.6 Desumidificadores .....	14
4.7 Viabilidade econômica .....	15

<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>15</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>16</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>17</b>
Apêndice 1 – Planta Baixa Marcenaria .....	17
Apêndice 2 – Corte AA .....	18
Apêndice 3 – Imagens do espaço .....	18
Apêndice 4 – Imagens efeitos da umidade .....	19
Apêndice 5 – Pontos de medição estabelecidos .....	19
Apêndice 6 – Posicionamento das máquinas de ar-condicionado .....	20
Apêndice 7 – Posicionamento dos desumidificadores .....	20

## 1. INTRODUÇÃO

O uso racional dos recursos deve ser um dos objetivos no meio empresarial. Qualquer processo que gere desperdício de tempo ou matéria prima precisa ser aprimorado para que o resultado geral do empreendimento seja satisfatório (Stevens, 2017). O ambiente industrial é pensando com o objetivo de racionalizar o uso dos recursos em todas as operações desenvolvidas, desde a sua concepção até a operação. O processo de projetar, idealizar e planejar é necessário para que ao longo do tempo não se tenha problemas com a redução do processo produtivo devido, por exemplo, a um layout de máquinas ou de iluminação ineficientes. Problemas relacionados ao conforto térmico como temperatura e umidade relativa fora das faixas de conforto, como o abordado nesse trabalho, também tem sua origem na concepção da edificação (Ass Malheiros, 2005).

Neste contexto, a escolha da materialidade na construção é o principal fator que afeta a eficiência energética do pavilhão industrial. Esta eficiência está ligada, por exemplo, a possibilidade de gastar-se menos com sistemas de climatização de ar ou iluminação. A utilização de materiais isolantes é uma alternativa pois proporciona uma menor condução do calor externo ou interno. Um exemplo disso na construção de pavilhões industriais são as telhas com isolamento, que reduzem a transferência do calor e na contenção do problema da condensação em ambientes mais úmidos (Lamberts et all, 2014).

Segundo Macintyre (1990) a ventilação industrial é uma operação que tem objetivo de controlar a temperatura, distribuição do ar, a umidade e eliminar agentes poluidores do ar, tais como gases, vapores, poeira, fumos, névoas, microrganismos e odores. O trabalho de Mauler Junior (2004) estudou a utilização de exaustores eólicos em sistemas de secagem de produtos como capim limão, abacaxi e sementes de tomate a fim de reduzir o custo com exaustão mecânica e proporcionar a mesma qualidade no processo de secagem. Os estudos mostraram resultados positivos com a umidade dos produtos apresentado quedas satisfatórias quando comparadas com outras metodologias.

No estudo de Borré (2013) os exaustores eólicos são apresentados como elementos que além de não consumirem energia elétrica oferecem benefícios como promover a ventilação e reduzir a umidade. No entanto, ainda segundo Borré (2013) a remoção de umidade do ar constitui um dos objetivos básicos do condicionamento de ar, mesmo que em algumas situações a ventilação industrial também se aplique.

### 1.1 Motivação

No ambiente industrial estudado a exposição das chapas de MDF ao ambiente com elevada taxa de umidade relativa mostrou causar um desperdício de matéria prima no processo produtivo. As chapas que têm uma vida mais longa de estoque absorvem umidade e incham gerando a necessidade de descarte da área afetada. Além disso, o ambiente úmido associado com a materialidade da construção favorece o efeito da condensação no telhado do pavilhão, o que gera um ambiente desconfortável para os colaboradores e contribui também para o desperdício de matéria prima.

### 1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo buscar soluções para o problema do alto índice de umidade relativa do ar encontrado no pavilhão da marcenaria estudada.

Como objetivos específicos destaca-se:

1. criação de um modelo térmico para a determinação das causas do problema;
2. determinação de soluções a fim de reduzir os índices de umidade relativa;
3. análise de viabilidade técnica e econômica das soluções encontradas.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.2 Umidade relativa do ar

O conteúdo de umidade ( $w$ ) mostrado na equação 1, representa quanta massa de água esta contida no ar. Quando o ar atinge a sua capacidade máxima de absorver água diz-se que chegou ao seu ponto de saturação e a partir disso o excesso de água no ar assume outras formas, como névoa, orvalho e a chuva (Lamberts et all, 2014).

$$w = 0,622 \frac{p_v}{p_t - p_v} \quad (1)$$

A umidade relativa do ar (UR) é uma medida de saturação do ar úmido por vapor de água e indica a relação de quanto de sua capacidade de absorver água está ocupada. É a razão entre a pressão de vapor de água no ar ( $p_v$ ) e a pressão de saturação da água na temperatura do ar ( $p_{sat}$ ) como mostrado na equação 2.

$$UR = \frac{p_v}{p_{sat}(T)} \quad (2)$$

A quantidade de massa de vapor que o ar úmido pode ter até atingir a saturação vai depender da temperatura. Quando o ar úmido está mais frio, a quantidade de massa de vapor até a saturação é menor de que quando o ar úmido está mais quente. Em geral a umidade resulta da evaporação da água, da transpiração de seres visos e da transpiração dos vegetais (Stoecker, 1985).

### 2.3 Temperatura de orvalho

De acordo com Salby (1996) o ponto de orvalho, ou temperatura de orvalho é definido como a temperatura que o sistema precisa ser refrigerado para alcançar a saturação. Ou seja, é a temperatura em que o ar chega na sua capacidade máxima de conter vapor de água, iniciando a partir daí o processo de condensação, onde água é liberada do ar conforme ele vai se resfriando.

De acordo com Magnus-Tetens (1937) a temperatura de orvalho pode ser calculada quando conhecidos os valores de umidade relativa (UR) e temperatura do ar (T), através da equação 3.

$$T_d = \frac{237,7 \cdot \left( \ln\left(\frac{UR}{100}\right) + \frac{(17,27 \cdot T)}{(237,7 \cdot T)} \right)}{17,27 - \ln\left(\frac{UR}{100}\right) - \frac{(17,27 \cdot T)}{(237,7 \cdot T)}} \quad (3)$$

### 2.4 Processo de desumidificação

Desumidificar o ar consiste no processo de reduzir seu conteúdo de umidade e pode ser entendido através do seu desenho na carta psicrométrica (Matos, UTFPR). De acordo com Kalume (2017) o processo de desumidificação consiste em duas etapas, o resfriamento e o aquecimento, como mostrado na figura 2.

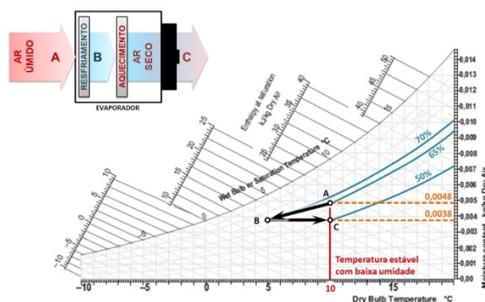


Figura 2 - Processo de desumidificação na carta psicrométrica

Fonte: Kalume, 2017

O processo desenhado na carta psicrométrica está representado pelos pontos A, B e C, onde cada um deles é uma etapa do todo. Então o processo começa do ponto A para o ponto B com o ar úmido sendo resfriado, perdendo umidade específica e tendo sua densidade e umidade relativa aumentadas. Em seguida, partindo do ponto B para o ponto C este ar é aquecido, diminuindo a sua densidade e umidade relativa.

#### 2.4.1 Processo de desumidificação por condensação

O processo de desumidificação por condensação consiste basicamente em resfriar o ar para abaixo da temperatura de orvalho, com objetivo de que ocorra o processo de condensação. Pode-se fazer isso com o ar úmido passando por uma serpentina gelada que se encontra a uma temperatura inferior ao ponto de orvalho e que resfria o ar provocando a condensação do vapor de água. Após, para que a temperatura de insuflamento seja igual a temperatura de entrada, o sistema aquece o ar mantendo a temperatura do ambiente (Stoecker, 1985). Esse processo é mostrado na figura 2.

Com um balanço de massa de água e energia no processo, é possível obter a massa de água retirada do ar, seguindo a equação 4,

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a(w_e - w_s) \quad (4)$$

onde  $\dot{m}_w$  representa a massa de água condensada [g],  $\dot{m}_a$  representa a massa de ar [kg] e  $w_e$  e  $w_s$  representam o conteúdo de umidade na entrada e na saída do processo respectivamente [ $g_w/kg_a$ ]. Para a definição do volume de água que deve ser retirado do ar por dia deve-se utilizar a equação 5, que trabalha a massa de água para entregar o volume extraído por dia do ar,

$$V_{\text{água}} = \left( \frac{\dot{m}_w}{1000} \right) \cdot \text{Trocas de Ar} \cdot \text{N}^\circ \text{ de horas com máquina ligada} \quad (5)$$

onde  $V_{\text{água}}$  representa volume de água retirado em L/dia. Com este valor pode-se selecionar através de catálogo de fornecedores qual desumidificador atende a demanda de umidade.

#### 2.5 Climatização artificial

O projeto de climatização deve seguir alguns passos para o correto dimensionamento do sistema, como a definição do ambiente de conforto térmico com temperatura e umidade definidas. Com a definição de carga térmica, é possível calcular o consumo de sazonal de energia (Alvares, 2019). A seguir esses passos são apresentados.

### 2.5.1 Conforto térmico em ambientes industriais

Como definido em ASHRAE (2005) e por Lamberts et al (2014) “conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve as pessoas. Se o balanço de todas as trocas de calor a quem está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o homem sente conforto térmico”.

Para a determinação dos valores de temperatura e umidade relativa que conferem conforto térmico para as pessoas, diversos métodos foram desenvolvidos ao longo dos tempos. De acordo com Fanger (1970) o Voto Médio Predito (PMV) considera temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, temperatura radiante, taxa metabólica e resistência térmica da roupa das pessoas para definir esse ponto de conforto. O PMV é um valor numérico que relaciona a sensibilidade humana ao frio e ao calor, assumindo valores como -3 para situações de muito frio, 0 para uma situação de conforto e +3 para um caso de extremo calor (Lamberts et al, 2014).

### 2.5.2 Carga térmica

De acordo com Pita (2001) a carga térmica representa a quantidade de calor que precisa ser posta ou retirada de um sistema para que este esteja em um estado térmico desejado. Ou seja, em caso de aquecimento, quanto calor precisa ser injetado no sistema para que uma temperatura de conforto seja alcançada e em caso de resfriamento, quanto calor precisa ser retirado para que a temperatura de conforto seja mantida.

O dimensionamento da carga térmica é importante para um projeto de climatização de ar, visto que o seu valor máximo é igual a potência do equipamento de condicionamento. O cálculo de carga térmica considera a transmissão de calor através de paredes, telhado, janelas e quaisquer outras superfícies existentes. Infiltração de ar através das aberturas ou frestas, incidência solar e a geração interna de carga através das pessoas ou equipamentos como máquinas e iluminação, também podem influenciar uma maior transmissão de calor para a estrutura (Alvarez,2019).

## 2.6 Ventilação em pavilhões industriais

A renovação de ar em qualquer tipo de ambiente é importante para a saúde e conforto das pessoas que ali estão, seja este um ambiente residencial, comercial ou industrial. A movimentação do ar se dá pela necessidade da manutenção dos níveis de oxigênio do ar e a eliminação de gases poluentes e tóxicos gerados. (Macintyre, 1990).

A ventilação ajuda no controle da temperatura e da umidade, que influenciam diretamente no conforto térmico. Para o dimensionamento de sistemas de ventilação, se utiliza o conceito do número de trocas de ar por hora (ACH). O ACH é o número de vezes, ou frequência, que o volume de ar do ambiente é renovado com ar externo por hora. Com o ACH recomendado e o volume do pavilhão ( $V_{pav}$ ) pode-se calcular a vazão de ar ( $V$ ) que o sistema de ventilação precisa suprir, como mostrado na equação 6 (Macintyre, 1990).

$$V = ACH \cdot V_{pav} \quad (6)$$

O valor de ACH para ambientes é definido por norma regulamentadora NBR6401, a qual garante a segurança e saúde dos trabalhadores.

No ambiente industrial, sistemas de ventilação podem ser trabalhados de três formas distintas; natural contando com movimentação do ar pelas diferenças de temperatura, pressão

e dos ventos; mecanizada, através de elementos mecanizados e que gerem o movimento do ar através do consumo de energia; e um misto dos dois tipos (Macintyre, 1990).

### 2.6.1 Ventilação natural

A ventilação natural é um método que se vale da força de empuxo gerada pelas diferenças de pressão, temperatura e dos ventos para que o ar se movimente pela edificação e renove o ar. As principais variáveis do projeto para o aproveitamento da ventilação natural são o posicionamento, o tamanho de aberturas e a altura interna da edificação (Mazon, 2005).

A força de empuxo se deve a diferença de massa específica do ar devido a variação de temperatura. Quanto mais quente o ar, menor a sua massa específica. Para calcular a vazão de ar que entra no ambiente ( $V$  [ $\text{pés}^3/\text{min}$ ]) através da velocidade média sazonal dos ventos na região de interesse utiliza-se a equação 7,

$$V = \varphi \cdot A \cdot v \quad (7)$$

onde  $A$  é a área de aberturas ( $\text{pés}^2$ ),  $v$  a velocidade média dos ventos na região ( $\text{pés}/\text{min}$ ) e  $\varphi$  é uma grandeza adimensional relacionada ao posicionamento da abertura que pode ser de 0,5 a 0,6 para ventos perpendiculares a parede e 0,25 a 0,35 para ventos diagonais (Macintyre, 1990).

Considerando apenas a diferença de temperatura, o dimensionamento da vazão de ar pode ser calculado pela equação 8,

$$V_t = 9,4 \cdot A \sqrt{H_1(T_i - T_e)} \quad (8)$$

onde  $V_t$  representa a vazão de ar conseguida pela diferença de temperatura ( $\text{pés}^3/\text{min}$ ), 9,4 é um constante de proporcionalidade que leva em conta a efetividade das aberturas (se as condições de escoamento não forem favoráveis deve ser diminuído para 7,2),  $A$  representa a área das saídas de ar ( $\text{pés}^2$ ),  $H_1$  representa a diferença de altura entre a entrada e saída de ar ( $\text{pés}$ ) e  $T$  (K) representa a temperatura interna e externa (Macintyre, 1990).

Uma das vantagens da ventilação natural é não ter nenhum consumo de energia. Como desvantagem, esse processo não fornece uma vazão uniforme de ar, podendo apresentar variações diárias e até dentro da mesma hora dependendo das condições do ambiente (Mazon, 2005).

Por isso, em casos de indústrias que tenham um alto índice de geração de calor e emissão de gases poluentes, normalmente esse sistema não pode ser utilizado, ou precisa ser associado a um sistema de ventilação mecanizado para garantir a uniformidade e a eliminação do ar contaminado (Macintyre, 1990).

### 2.6.2 Ventilação Mecânica

A ventilação mecanizada emprega componentes mecânicos para gerar movimentação ar. A ventilação forçada garante uma uniformidade na vazão do ar, atendendo as demandas definidas em projeto, com um custo operacional diretamente proporcional ao volume de ar que precisa ser renovado. Quando se faz a tiragem do ar de um ambiente, nomeia-se esse processo de exaustão, enquanto quando se injeta ar no ambiente, e nomeia-se o processo como insuflação de ar. Esses dois processos são os que compõem a dinâmica de ventilação mecanizada (Borré, 2013).

No caso de utilização de um insuflador (Figura 3 (a)) ao injetar ar, cria-se uma zona de maior pressão, o que irá gerar a saída do ar pelas áreas livres. Ao utilizar somente a exaustão

(Figura 3 (b)) se criará uma zona de menor pressão no ambiente, que irá gerar a infiltração do ar exterior pelas entradas livres, como frestas, portas e janelas abertas.

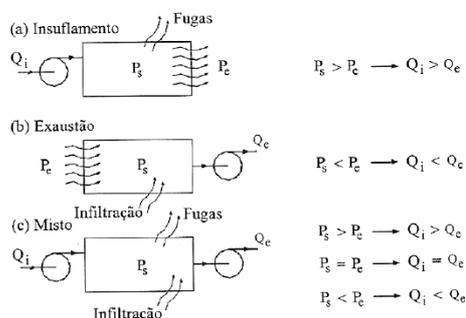


Figura 3 – Ventilação mecanizada

Fonte: Borré, 2013

Ambos os processos também podem ser empregados juntos (Figura 3 (c)) tendo assim um sistema de ventilação totalmente mecanizado a depender do que for mais viável para cada caso (Borré, 2013).

### 3. METODOLOGIA

Como forma de abordar o problema e encontrar possíveis soluções serão propostos os seguintes passos:

1. Contextualização do problema
2. Coleta de dados
3. Projeto de sistemas de controle da umidade
4. Definição dos custos de instalação e operação
5. Análise de viabilidade

#### 3.1 Contextualização do local de estudo

A marcenaria está localizada em Santa Cruz do Sul, Rio Grande do Sul. Seu espaço é mais baixo que a rodovia e fica cercado em sua face norte por uma encosta de mata nativa que é uma fonte natural de umidade e cria uma barreira a incidência do sol no pavilhão. Na figura 4 é mostrada a vista de satélite da marcenaria estando demarcado em branco o lote, em rosa o pavilhão estudado, em amarelo o posicionamento solar e com a flecha verde é indicada a entrada ao terreno.



Figura 4 – Contextualização do local

Fonte: Google Maps

Assim, as características do local criam um ambiente extremamente úmido durante todo o ano.

Na figura 6 e nos apêndices 1, 2 e 3 mostram-se a edificação estudada que tem uma área de 633,06m<sup>2</sup>. A cobertura é de duas águas com telha metálica trapezoidal modelo TP-40. O piso é de concreto armado, 3 paredes de alvenaria e 1 com a mesma telha metálica do telhado. Possui 4 portões grandes de 3,6 metros de altura por 3 metros de largura e 9 janelas basculantes espalhadas pela planta que são utilizadas para promover a ventilação do ambiente. Contudo, o pavilhão não possui nenhum sistema de ventilação projetado ou condicionamento de ar.

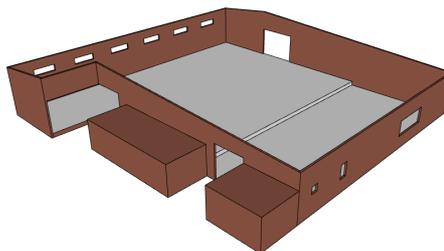


Figura 6 – Modelo 3D do pavilhão  
Fonte: Autor

### 3.2 Perda de Material

A chapa de MDF tem medidas de 2,75 x 1,83 metros tendo uma área de 5,03m<sup>2</sup> e um custo médio de R\$ 300,00. O processo produtivo considera uma perda de material padrão de 2 cm na borda em virtude dos machucados que as chapas sofrem no transporte da fábrica até a marcenaria. Quando as chapas absorvem umidade devido ao um período mais longo de vida no estoque descarta-se uma faixa de 8 centímetros da borda. Uma imagem do efeito da umidade na marcenaria é mostrada no apêndice 4.

Por mês são cortadas em média 300 chapas na marcenaria, sendo que 80% são de cores que tem grande rotatividade e por isso tem uma vida de estoque curta. Os 20% restantes são de chapas de que não tem uma grande rotatividade e acabam tendo uma vida maior no estoque. Assim, para o cálculo do desperdício de matéria prima foram considerados apenas esses 20% das chapas, visto que o tempo de exposição a umidade é maior.

Estima-se que em 2024 o volume de chapas cortadas chegue a 450 por mês. Como consequência, o impacto financeiro do desperdício vai crescer. Então, para ilustrar as dimensões e custos, a tabela 1 mostra como é definido qual a metragem quadrada que é desperdiçada de material em cada situação.

Tabela 1 - Dados referentes a perda de material perda de material

Varável	Valor
Área chapa MDF (m2)	5,03
Área útil chapa (m2)	4,85
Área útil chapa inchada (m2)	4,32
Volume de chapas /mês (atual)	300
Volume de chapas /mês (2024)	450
Valor médio chapa (R\$)	300,00
Valor do m2 de MDF (R\$)	59,61

Fonte: Autor

O custo associado a perda de material ( $D_{mat}$ ) em reais é obtido com o base no valor do  $m^2$  do MDF ( $P_{MDF}$ ) e com a quantidade de matéria prima ( $A_{perdida}$ ) que é desperdiçada nesse processo de exposição a umidade como mostrado na equação 9.

$$D_{mat} = P_{MDF} \cdot A_{perdida} \quad (9)$$

Dessa forma, considerando o volume anual de chapas e utilizando os valores da tabela 1 na equação 9 estima-se o valor anual do desperdício com MDF em virtude da umidade.

### 3.3 Coleta de dados

Com objetivo de modelar o ambiente para avaliação de projetos para mitigação da umidade foi proposta a realização de medições da temperatura e da umidade no local com base na norma ISSO 7726:2001. Foram definidos 4 pontos relevantes dentro do pavilhão e dois pontos no ambiente externo dentro do terreno da empresa, um mais próximo a mata e outro mais distante, como mostrado na figura do apêndice 5. A rotina de medições foi então definida para acontecer 3 vezes ao dia, no início da manhã, ao meio-dia e no fim da tarde para que a coleta de dados fornecesse uma média do dia.

Durante todo o período foram tomados os devidos cuidados para que o padrão de medição fosse mantido como descrito na norma para que os resultados medidos sejam confiáveis. Para a aquisição dos dados de temperatura e de umidade relativa do ar foi utilizado um termo-higrômetro digital INS – 1383. A faixa de operação do equipamento vai de -20 até 70 °C com exatidão de +/- 1 °C para temperatura de bulbo seco e 0% até 100% com exatidão de +/- 4% para umidade relativa do ar. Destaca-se que este é um equipamento com certificado de calibração do Inmetro.

Dentro do histórico de anos passados, o período do ano o qual se tem maior prejuízo com a umidade é no inverno. Em virtude disso, as medições foram realizadas entre os dias 19/06/2023 e 13/07/2023. Ao longo do período de medições foi identificado a necessidade de buscar outra variável. Percebeu-se que além da característica do local, o pavilhão apresenta detalhes de projeto que contribuem para a concentração de umidade e condensação no período da noite quando o pavilhão se encontra fechado.

Assim, a partir do dia 29/06/2023 propôs-se a aferição da temperatura do telhado utilizando um termômetro infravermelho Minipa MT – 350, que tem sua faixa de operação determinada de - 30 °C até 550 °C com uma precisão de +/- 2 °C. A nova medição seguiu a mesma estratégia definida para a temperatura e umidade do ar agregando-se apenas medições no período da noite com o pavilhão fechado. A partir das medições foram obtidas as temperaturas médias interna e externa do pavilhão, do telhado e os dados de umidade em ambos os ambientes. Além disso, com esses dados pode-se avaliar também a temperatura de orvalho para observar como as ações trabalhadas vão influenciar no problema da condensação no local.

### 3.4 Projeto do sistema de ventilação

A NBR 6401 não lista todos os tipos de indústria em seu texto, mas por semelhança com os índices definidos, como os mostrados na tabela 2, pode-se definir o ACH para a marcenaria. Em virtude da poeira de MDF gerada no processo de corte das chapas será considerado 20 trocas de ar por hora para o sistema de ventilação. Assim, aplicando esse valor na equação 6 obtém-se a vazão de ar necessária para que estas trocas ocorram.

Tabela 2 – Trocas de ar por tipo de espaço

Ambiente	Nº de trocas de ar
Fábrica	10
Fundições	20
Cabine de Pintura	60
Fábrica de Papel	30

Fonte: NBR 6401/ABNT

### 3.4.1 Ventilação Natural

No pavilhão estudado a área de aberturas é igual a  $43,35 \text{ m}^2$  e a velocidade média dos ventos na região é, segundo o mapa de potencial eólico do estado,  $4\text{m/s}$ . Aplicando-se então a equação 7 considerando  $\varphi$  como  $0,25$  tem-se a vazão de ar gerada naturalmente no espaço. Da mesma forma poderia ser utilizada a equação 8 que considera o efeito chaminé para determinação desta vazão de ar. No entanto, como as entradas e saídas de ar estão todas em um mesmo nível de altura este modelo de análise não é indicado para este caso.

Uma vez determinada a vazão natural de ar compara-se este valor com a vazão encontrada com a equação 6. Se ele for igual ou superior considera-se que o sistema de ventilação natural supre a demanda e não precisa ser aliado a outras estratégias de ventilação, e se esta vazão fosse inferior a encontrada na equação 6 essa associação será necessária.

### 3.4.2 Ventilação Mecânica

A ventilação mecânica deve promover uma vazão de ar igual ou superior ao determinado como necessário pela equação 6. Devido a grande área de aberturas no pavilhão, considera-se para esse projeto somente sistemas de exaustão mecanizada de ar através de exaustores de telhado. Assim, avaliam-se modelos que forneçam uma vazão suficiente e que possam ser distribuídos na cobertura.

## 3.5 Climatização

Considerando as características construtivas do pavilhão e a rotina foi definido um projeto de climatização que condicione o ar do ambiente durante o período da noite, das 17:30 até as 07:30, que são os horários em que a marcenaria finaliza e inicia o expediente respectivamente. À noite, quando fechada, a marcenaria sofre bastante com o problema de condensação no telhado pois não ocorre circulação de ar. Ao mesmo tempo a temperatura do telhado diminui abaixo do ponto de orvalho e acaba atuando como uma serpentina gelada condensando o vapor de água presente no ar que está mais quente.

Sendo assim, como o sistema está sendo dimensionado somente para o período da noite e quando o pavilhão está vazio e com todos os equipamentos desligados não foram considerados no cálculo da carga térmica a incidência do sol na estrutura e a geração interna de carga devido as pessoas, equipamentos e iluminação, sendo contabilizadas somente as parcelas de transmissão pelas paredes, telhado, janelas e pela infiltração de ar.

Para o cálculo da carga térmica de transmissão pelo telhado e paredes utiliza-se a equação 10,

$$Q = UA(T_e - T_i) \quad (10)$$

onde  $Q$  é a transmissão térmica [W],  $U$  é o coeficiente global de transferência de calor [ $W/m^2K$ ],  $A$  é a área [ $m^2$ ] e  $(T_e - T_i)$  é a diferença entre temperatura externa e interna [ $^{\circ}C$  ou K]. Para as paredes o valor de  $U$  utilizado na equação 10 é mostrado na equação 11,

$$U = \frac{1}{R_{ex} + R_k + R_{in}} \quad (11)$$

onde  $R$  representa a condutividade dos materiais que compõem a parede que devem ser somados no denominador da equação 11. Os valores de condutividade são tabelados e facilmente encontrados, assim como o  $U$  para determinados casos usuais, como o de uma parede de alvenaria com e sem reboco.

Para as janelas utiliza-se o valor de  $U$  é dado pela equação 12,

$$U = (C + Bu)F_a \quad (12)$$

onde os fatores  $C$ ,  $B$ , e  $F_a$  são valores tabelados e  $u$  é a velocidade do vento no local. No caso da infiltração a determinação de carga térmica é feita através das equações 13,

$$Q_{inf} = \rho \dot{V} c_p (T_e - T_i) \quad (13)$$

onde  $Q_{inf}$  é a carga de ventilação de infiltração [W],  $\dot{V}$  é a vazão em volume de ar externo [ $L/s$ ],  $\rho$  é a massa específica do ar [ $kg/m^3$ ] e  $c_p$  o calor específico do ar [ $kJ/kgK$ ]. Por fim, a carga térmica do ambiente ( $Q_{tot}$ ) é dada pela soma de todas as parcelas conforme equação 14,

$$Q_{tot} = Q_{paredes} + Q_{telhado} + Q_{janelas} + Q_{inf} \quad (14)$$

Assim, para dimensionar o sistema de climatização definiu-se a condição de conforto considerando o que é importante para as pessoas e para os materiais. No caso da temperatura considerou-se  $25^{\circ}C$  e para umidade relativa o valor de 60% de umidade relativa, visto que essa é a faixa indicada pelos fornecedores de MDF para um ambiente ideal de estoque. A temperatura externa foi definida em  $32^{\circ}C$  com base nas informações do atlas eólico de 2014 e a umidade do ambiente externo 100% em virtude das medições realizadas e da mata que cerca o local e é uma grande fonte de umidade. Assim, para o cálculo da carga térmica utilizam-se essas definições e os dados da tabela 3 mostrada a seguir.

Tabela 3 – Dados para cálculo de carga térmica

Variável	Valor
$U_{alvenaria}$	2,46 $W/m^2K$
$U_{telha}$	7 $W/m^2K$
B	0,09
C	5,6
$F_a$	1,05

Fonte: Autor

A carga das paredes de alvenaria, do telhado e da parede de telha são calculados pela equação 10. Os valores de  $U$  são dados pela tabela do Inmetro N° 50/2013 para as paredes e pelos fornecedores para atelha. A carga das janelas é calculada com a mesma equação 10, porém utilizando a equação 12 para definição do  $U$  dependendo este dos valores das

constantes  $C$ ,  $B$  e  $F_a$  e de  $u$ . Por último considera-se a carga térmica gerada pela infiltração de ar que é obtida com a equação 13 e que depende diretamente da vazão de infiltração e que neste caso teve como padrão a infiltração de  $6000 \text{ m}^3$  que representa 2 trocas de ar por hora.

### 3.5.1 Telhado Isolante

Calculou-se a carga térmica com uma alteração no telhado para uma telha do mesmo perfil, mas com uma camada de isolamento de isopor com 30mm de espessura. Para o cálculo da carga térmica todos os fatores se mantêm iguais ao da telha sem isolamento, mudando somente o coeficiente global de transferência de calor da telha, que conforme informado pelo fabricante é de  $0,0326 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

### 3.6 Projeto do sistema com desumidificadores

Para a seleção dos desumidificadores seguiu-se o mesmo princípio do sistema de climatização considerando somente o período da noite. Com o valor de temperatura interna e umidade relativa medidos obtém-se da carta psicrométrica o conteúdo de umidade antes do processo de desumidificação. Da mesma forma, considerando o valor de UR após o processo e a mesma temperatura define-se qual o conteúdo de umidade que precisa ser retirado do ar. O volume de água retirado de ar por dia é determinado então aplicando estes valores na equação 4, que determina a massa de água retirada em um processo de desumidificação. Em seguida, utilizando este dado na equação 5 obtém-se o volume de água retirado por dia no processo.

A seleção do desumidificador industrial é feita com base no volume de água por dia que deve ser retirado do ar. Após a seleção, as máquinas devem ser posicionadas ao longo do pavilhão para operação considerando também a necessidade da instalação de um dreno para cada máquina direcionar a água condensada durante o processo.

### 3.7 Estimativa de custos de operação

Os custos de operação são definidos com base no consumo de energia elétrica e nos gastos com manutenção. O gasto de energia elétrica ( $G$ ) em [kWh] é calculado conforme equação 15, considerando a potência elétrica ( $P$ ) em [kW] dos equipamentos e o tempo de operação ( $T_{op}$ ) em horas.

$$G = P \cdot T_{op} \quad (15)$$

No caso específico de aparelhos de ar-condicionado utiliza-se como parâmetro para estimar o custo de energia consumido pelo coeficiente de desempenho (COP), assim como mostrado na equação 16 dependendo da carga térmica e do tempo de operação.

$$G = \frac{Q}{COP} \cdot T_{op} \quad (16)$$

Assim, pode-se estimar qual o consumo de energia que determinado motor elétrico gerará para a empresa. Para transformar esse consumo em valor real deve-se multiplicar pelo custo do kWh cobrado pela distribuidora de energia da região.

O valor de manutenção de cada sistema é quantificado com base nos dados do fabricante ou em orçamentos de assistências técnicas. A depender do maquinário e do sistema manutenção pode ser realizada internamente sem nenhum custo. De qualquer forma, para um projeto seguro mesmo quando não houver custo de manutenção identificado um valor ano deve ser provisionado para o caso de imprevistos com o sistema.

Ao fim, para comparar o investimento proposto em cada sistema, é importante considerar a variação de valor do dinheiro no tempo. O método do Valor Presente Líquido (VPL) é aplicado para avaliar a viabilidade de cada investimento com base na taxa mínima de atratividade (TMA) como mostrado na equação 17.

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+TMA)^t} \quad (17)$$

Onde  $n$  é o número de períodos avaliados (anos, meses...),  $t$  é o período específico e  $FC_t$  é o fluxo de caixa líquido gerado pelo projeto no período em reais. Se o valor do VPL é positivo significa que o investimento é viável e se for negativo significa que o investimento é inviável.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta sessão são apresentados os resultados da estimativa de perda de material, de cada projeto e seus respectivos orçamentos de custo para instalação e operação.

##### 4.1 Coleta de dados

Os dados coletados de temperatura interna e externa, umidade relativa interna e externa do pavilhão e da temperatura do telhado com incertezas são mostrados na tabela 4.

Tabela 4 – Dados coletados

$T_i$	15,4 °C	+/- 1 °C
$T_e$	15,6 °C	+/- 1 °C
$UR_i$	100%	+/- 4 %
$UR_e$	100%	+/- 4 %
$T_{telhado}$	15,5 °C	+/- 2 °C

Fonte: Autor

Observa-se o valor da umidade relativa de 100%, o que inevitavelmente causa a condensação do telhado pois neste caso a temperatura de orvalho é igual a temperatura do ambiente. Assim, quando fechado e com baixo índice de renovação do ar a umidade acaba se concentrando dentro do pavilhão e cria um ambiente prejudicial a conservação do material. Dessa forma, gera-se uma necessidade de trabalhar projetos para ventilação ou condicionamento do ar.

##### 4.2 Perda de processo

Avaliou-se com base na equação 9 o volume atual de chapas cortadas gera uma perda financeira por ano de 75 chapas que representam R\$ 22.500,00. No volume de produção planejado para 2024 esse número sobre para um desperdício de 112 chapas por ano em um valor de R\$ 33.600,00. Esses números reforçam ainda mais a demanda por um projeto de tratamento deste ambiente, visto que nesta abordagem não foram consideradas outros gastos, como manutenção predial e de máquinas também intensificados pelos umidade elevada.

##### 4.3 Ventilação natural

A vazão de ar demandada para a ventilação determinada pela equação 6 é de aproximadamente  $60000 \text{ m}^3/\text{h}$ . O orçamento de exaustores eólicos ofereceu equipamentos que proporcionam uma vazão de até  $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Assim, considerando o caso crítico com o pavilhão fechado seriam necessárias 15 unidades instaladas em sua capacidade máxima para

garantir a vazão demandada. Como essa vazão varia com a intensidade do vento, considerou-se o projeto com 20 exaustores para segurança. A compra e instalação das 20 unidades tem custo de R\$ 8.000,00. É importante lembrar que esse é um sistema que não consome energia e tem manutenção zero. O posicionamento dos exaustores é mostrado na figura 8.

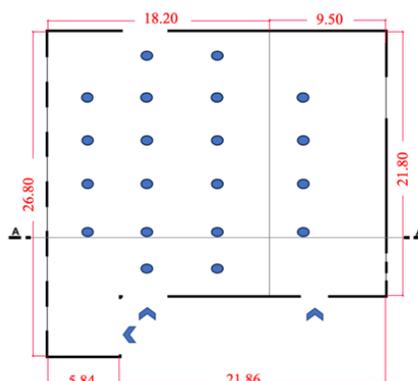


Figura 8 – Posicionamento dos exaustores eólicos na planta  
Fonte: Autor

Neste desenho, os 20 exaustores são posicionados em quatro linhas, com duas de 6 exaustores nos pontos mais altos do pavilhão e 2 linhas de 4 exaustores nos pontos mais baixos. Dessa forma concentra-se a maior capacidade de vazão nos pontos onde o ar naturalmente se direciona e pode se acumular e os demais em zonas menos demandadas para evitar que tenha ar parado. Como esse sistema, espera-se combater a concentração de umidade no período da noite evitando a absorção de umidade das chapas e a condensação no telhado do pavilhão. Além disso, tem-se um grande potencial nesta solução em virtude do não consumo de energia do sistema, o que garante um baixo custo de operação ao longo do tempo.

#### 4.4 Ventilação mecanizada

Considerando a mesma necessidade de vazão foram selecionados exaustores de telhado com  $16000\text{m}^3/\text{h}$  de vazão custando R\$ 7.125,00 cada unidade instalada. Para operação precisam ser considerados energia e manutenção pois cada exaustor tem um motor de 1,5cv. Assim, os custos e vazão do conjunto de 4 exaustores são mostrados na tabela 5.

Tabela 5 – Sistema de ventilação mecanizada

Custo de instalação	R\$ 28.500,00
Vazão do conjunto	$64000\text{ m}^3/\text{h}$
Custo energético por ano	R\$ 10.147,69
Custo de manutenção por ano	R\$ 500,00

Fonte: Autor

Diferente dos exaustores eólicos este sistema traz consigo um custo de operação mais alto, mas em contrapartida traz uma uniformidade de vazão que o outro sistema não entrega. A proposta de posicionamento dos 4 equipamentos na planta é mostrada na figura 9.

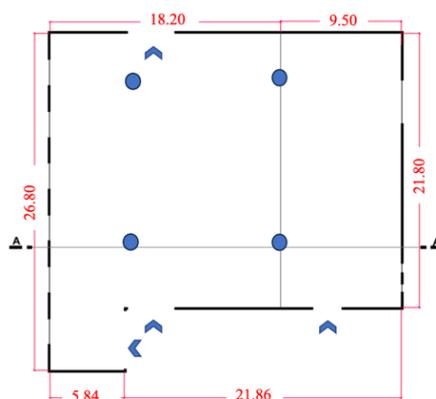


Figura 9 – Posicionamento dos exaustores mecânicos de telhado na planta  
Fonte: Autor

Devido a alta vazão dos exaustores eles foram distribuídos mais espaçados para gerar uma melhor distribuição da sucção de ar no pavilhão.

#### 4.5 Climatização

A carga térmica calculada para o ambiente no período da noite foi 58932,85 W o que demanda um sistema de refrigeração de 201.079 BTU/h. Com base nessa demanda foi definido a utilização de máquinas piso teto que oferecem uma capacidade maior de climatização a um custo menor. Foram selecionadas máquinas de 55000 BTU/h a um valor de R\$ 10.456,26 por máquina instalada. Serão necessárias 4 máquinas e o valor total do investimento de compra e instalação fica em R\$ 41.825,04. O custo energético considerando 8 horas de funcionamento por dia das máquinas é de R\$ 11.763,23 por ano. O custo de manutenção estimado é de R\$ 9.000,00 por ano. O posicionamento das máquinas de ar-condicionado no espaço do pavilhão é mostrado na figura do apêndice 6.

Diferente dos sistemas de ventilação esta proposta trabalha considerando que o sistema de climatização vai condicionar o ar do ambiente e recircular esse ar durante a noite mantendo sempre no padrão definido. É de maneira geral uma opção mais cara do que as apresentadas anteriormente, mas que pode oferecer uma garantia maior que os sistemas de ventilação, visto o ar é condicionado.

##### 4.5.1 Telhado Isolante

Considerando a adição de isolamento no telhado a carga térmica calculada cai para 28057,21 W e 95731,21 BTU/h. Dessa forma o número de máquinas necessárias passaria a ser 2 com um custo de instalação de R\$ 20.912,52, de energia R\$ 5.600,33 e de manutenção R\$ 4.500,00. No entanto, para a implantação do isolamento do telhado foi calculado um investimento de R\$ 39.246,00 o que somado ao valor das máquinas de ar-condicionado resulta em um custo instalação de R\$ 60.158,52.

#### 4.6 Desumidificadores

Para a seleção dos equipamentos foi obtido um valor de 479,76 litros de água por dia a serem retirados do ar pelos desumidificadores. Avaliando a planta propõem-se a escolha de no mínimo 2 máquinas para que se distribua a carga de desumidificação na área do pavilhão. Foram selecionadas então 2 máquinas com capacidade de 240 litros por dia de condensação a um valor de R\$ 73.760,00. Esse valor considera os equipamentos instalados. O

posicionamento das máquinas pode ser visto na figura do apêndice 7. Para a manutenção das máquinas não foi considerado nenhum gasto, visto que utilizam filtros de PVC que podem ser lavados com água corrente e podem ser feitos pelos colaboradores da empresa. O gasto energético estimado por ano para as duas máquinas que tem potência de 3,385kW cada ficou em R\$ 12.454,09.

Da mesma forma que o sistema de climatização, os desumidificadores trabalham condicionando o ar e garantem o controle da umidade de maneira mais expressiva. Os conjuntos apresentam um custo mais alto de instalação e tem um consumo de energia significativo, mas mostra um ótimo custo de manutenção.

#### 4.7 Viabilidade econômica

Na tabela 6 mostra-se a avaliação de custos em 10 anos considerando o volume de chapas projetado para 2024.

Tabela 6 – Análise de viabilidade econômica

	Instalação	Energia / Ano	Manutenção / Ano	VPL
Ventilação Natural	R\$ 8.000,00	R\$ 0,00	R\$ 500,00	R\$ 166.279,34
Ventilação Mecanizada	R\$ 28.500,00	R\$ 10.147,69	R\$ 1.000,00	R\$ 106.635,25
Desumidificadores	R\$ 73.760,00	R\$ 12.454,09	R\$ 500,00	R\$ 87.982,07
Climatização	R\$ 41.825,04	R\$ 11.261,38	R\$ 9.000,00	R\$ 35.436,51
Climatização com Isolamento	R\$ 60.158,52	R\$ 5.600,33	R\$ 4.500,00	R\$ 81.280,56

Fonte: Autor

É possível observar que mesmo em valores diferentes todas as propostas de projeto representam um ganho no longo prazo com VPL positivo. Assim, estima-se que trazendo a valor presente os valores apresentados na coluna VPL são o ganho em valor com a instalação de cada sistema ao longo dos 10 anos considerados, valores estes que são expressivos para o fluxo de caixa da empresa.

## 5. CONCLUSÕES

A análise do local foi extremamente importante para o estudo do alto índice de umidade relativa. A marcenaria encontra-se instalada em um local muito particular cercado por uma grande fonte natural de umidade o que sem um devido preparo e tratamento gera um grande prejuízo a empresa, principalmente considerando o desperdício de chapas de MDF.

O pavilhão em si já possui uma boa ventilação natural devido a suas amplas aberturas que durante o dia desempenham muito bem o papel de renovar o ar e evitar que a umidade se concentre no local. No entanto, a noite quando o pavilhão está fechado não se tem nenhuma ventilação e a umidade acaba se concentrando e gerando a condensação no telhado. Com os projetos de ventilação natural, ventilação mecanizada, desumidificadores industriais, sistema de climatização e isolamento do telhado percebe-se que o problema da umidade é mitigado e a perda de material minimizada.

Assim, com base nos resultados pode-se dizer que o sistema de ventilação natural traz o maior retorno financeiro para a empresa. Sugere-se, como oportunidade de trabalho futuro, uma simulação dos sistemas propostos com objetivo de reproduzir as condições do ambiente encontrado na marcenaria e avaliar a efetividade de cada solução. Dessa forma a escolha de sistema tornará o investimento mais seguro para o proprietário e o retorno será garantido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarez, Mario Eusebio Torres. Refrigeração, Ar Condicionado e Ventilação. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019.

ASHRAE Handbook—HVAC Applications: Chapter 23, Humidity Control (2019).

ASTM E104-02 - Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Glycerin Solutions (2014).

Associação Brasileira De Normas Técnicas - ABNT, Instalações Centrais de Ar Condicionado para Conforto – NBR 6401: Rio de Janeiro, Brasil. 1978.

Borré, Régis Leandro. Sistema de Ventilação em Ambiente Industrial. 2013. Monografia Pós-graduação – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi.

Camponez do Brasil, René Porfírio. Utilização de exaustores eólicos no controle da temperatura e da ventilação em ambiente protegido. 2004. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo – Piracicaba.

Candido, Christina. Ventilação natural e conforto térmico em climas quentes. Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

Chiarello, J.A. Ventilação Natural por Efeito Chaminé - Estudo de Modelo Reduzido de Pavilhões Industriais, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

Fanger, P. O. (1970). Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. Danish Technical Press.

Frota, Anésia Barros; Schiffer, Sueli Ramos. Manual do Conforto Térmico. 5.ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

Governo do Rio Grande do Sul, Atlas Eólico do Rio Grande do Sul. 2014.

Kalume, Diego Almeida. Psicrometria Aplicada à Refrigeração. LinkedIn. Post em 21/12/2012. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/psicrometria-aplicada-%C3%A0-refrigera%C3%A7%C3%A3o-diego-almeida-kalume/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: 27/07/2023.

Lamberts, R.; Dutra, L.; Pereira, F. O. R. Eficiência energética na arquitetura. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás/ PROCEL: Ministério de Minas e Energia, 2014. 366 p.

Macintyre, Archibald Joseph. Ventilação Industrial e Controle da Poluição. 2.ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1990.

Magnus, G.; Tetens, A. Vapor pressure and saturation deficit. In: Z. Geophys., 1937.

Mauler Júnior, Jorge. Secagem Utilizando Exaustor Eólico. 2004. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

Manzon, Ana Amélia Oliveira. Ventilação Natural em Galpões Utilizando Lanternins. 2005. Dissertação de Pós-graduação – Universidade Federal de Ouro Preto – Ouro Preto.

Pereira, Rui Baptista. Segurança e Medicina do Trabalho. Lisboa: Lidel, 2019.

Pita, Edward G. Air Conditioning Principles and Systems: An Energy Approach. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2001.

Rudmar Serafim Matos. Climatização. Universidade Federal do Paraná, 2018.

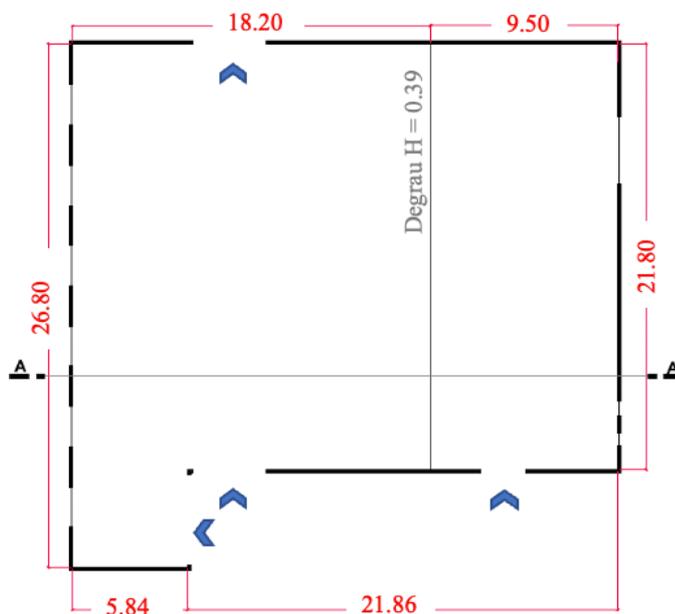
Salby, Murry L. Fundamentals of Atmospheric Physics. Academic Press, 1996.

Stevens, William J. Operations Management. 5. ed: McGraw Hill, 2017.

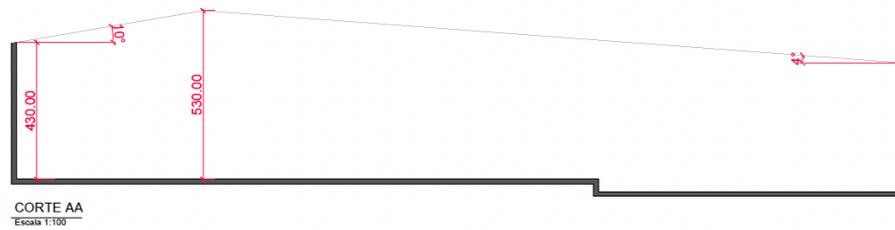
Stoecker, Wilbert F.; Jones, Jerold W. Refrigeração e Ar Condicionado. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.

## APÊNDICES

### Apêndice 1 – Planta Baixa Marcenaria



### Apêndice 2 – Corte AA



### Apêndice 3 – Imagens do espaço



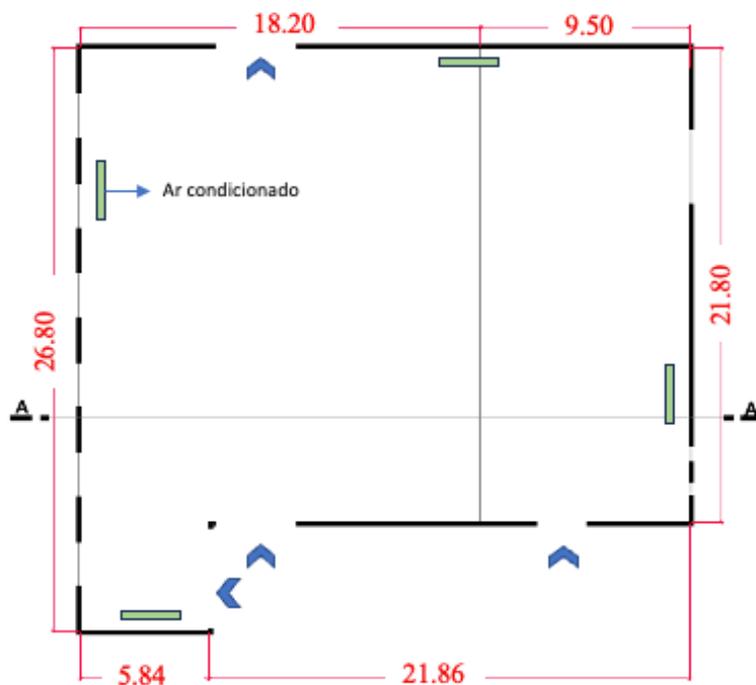
Apêndice 4 – Imagens efeitos da umidade



Apêndice 5 – Pontos de medição estabelecidos



### Apêndice 6 – Posicionamento das máquinas de ar-condicionado



### Apêndice 7 – Posicionamento dos desumidificadores

