



**Eduardo Adilson Reinheimer**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO E ESTUDO DA FIBRA  
VEGETAL DE COCO COMO MEMBRANA DE SISTEMA EVAPORATIVO**

Horizontalina - RS

2024

**Eduardo Adilson Reinheimer**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO E ESTUDO DA FIBRA  
VEGETAL DE COCO COMO MEMBRANA DE SISTEMA EVAPORATIVO**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Augusto Cesar Huppes da Silva.

Horizontina - RS

2024

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso**

**“PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO E ESTUDO DA FIBRA  
VEGETAL DE COCO COMO MEMBRANA DE SISTEMA EVAPORATIVO”**

**Elaborada por:**

**Eduardo Adilson Reinheimer**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 26/06/2024  
Pela Comissão Examinadora

---

Titulação. Augusto Cesar Huppés da Silva  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

---

Titulação. Geovane Webler  
FAHOR – Faculdade Horizontina

---

Titulação. Rafael Luciano Dalcin  
FAHOR – Faculdade Horizontina

**Horizontina - RS**  
**2024**

Dedico e divido todo o mérito com quem dividiu comigo todo o esforço, minha família. Sempre foram toda minha motivação. Se hoje ou por hora conquisto algo é por conta do impulso e das palavras recebidas em cada momento juntos. Não há exemplo maior de dedicação, sonho, e um poder de acreditar que a minha família. Pois a graduação em engenharia não vem sozinha, família sempre é a base e o amparo de tudo.

## AGRADECIMENTO

De fato, com antecedência, imensamente devo agradecer a Deus, por me ouvir em diversas oportunidades em que precisei, e com muita perseverança sem ele nada em minha vida seria possível.

Com muita gratidão, chegou o momento de agradecer a minha família, que sempre acreditou, sempre motivou, e sempre manteve a paciência. Vocês sempre fizeram tudo por mim e estiveram do meu lado em momentos difíceis além de comemorar comigo cada conquista, onde sempre se auto delegaram a incumbência de dedicar toda atenção e suporte para essa longa jornada. Ao meu pai Roberto, minha mãe Ivonete e meu irmão Rafael, com todo meu amor, e meu muito obrigado, vocês são onde encontro alegria e vontade de sempre continuar em frente.

Também gostaria de agradecer ao meu orientador Augusto, onde em meio a lacunas se dispôs a contribuir, influenciar, ajudar e orientar e foi onde pude extrair conhecimentos para a conclusão deste trabalho.

Dedico meu agradecimento com muito carinho a fundação capacitar, que junto ao meu mentor Márcio me acompanharam desde o início da minha trajetória. O símbolo do infinito representa muito bem a grandiosidade da fundação.

E por fim, agradeço a vida, por me ensinar que nunca se pode desistir da pessoa que você deseja se tornar. Por me ensinar que progredir leva tempo, para uns mais para outros menos. Que progredir gera frustrações, deixa cicatrizes, mas é a construção que vale todo o processo, é onde formará a pessoa que irá se tornar.

“É fácil comandar homens livres: basta mostrá-  
lhes o caminho do dever. O caminho, está ali em  
frente!”

(Marechal Manuel Luís Osório)

## RESUMO

O atual trabalho tem por sua consistência o resfriamento evaporativo, aplicado ao estudo da fibra vegetal de como material alternativo de preenchimento da célula evaporativa de um sistema. Para isso, foi construído um túnel de vento didático de circuito aberto com ventilação forçada para testes evaporativos na fibra vegetal. Com tudo, foram encontrados valores de eficiência de saturação em torno de 87% que se comparados e aplicados às mesmas condições a membranas comerciais de papel kraft de celulose rígida corrugada, são resultados extremamente eficientes e viáveis. Os resfriadores evaporativos são sistemas eficazes e econômicos, reduzem a temperatura do ambiente, além de trazerem benefícios e uma maior qualidade para o ar já existente. Seu funcionamento é através dos princípios básicos da evaporação da água absorvendo calor do ambiente, e de que quanto maior sua temperatura maior será sua eficiência de saturação e retenção de vapor d'água respeitando os princípios de transferência de calor e massa. Os resultados do trabalho se tornaram promissores para a finalidade de resfriamento, a fibra vegetal de coco atingiu condições de absorção de água de grande potencial, tal qual, só foram capazes de se atingir por conta das condições psicrométricas da região noroeste do Rio Grande do Sul serem convenientes e proveitosos para o resfriamento evaporativo.

**Palavras-chave:** Resfriamento evaporativo, Túnel de vento, conforto térmico, fibra de coco.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Etapas do andamento do trabalho .....	18
<b>Figura 2</b> – Fenômeno evaporativo em interface líquida.....	23
<b>Figura 3</b> – Zonas da carta psicrométrica .....	25
<b>Figura 4</b> – Limitações das zonas de conforto térmico e resfriamento evaporativo ..	26
<b>Figura 5</b> – Exemplo do Fenômeno Evaporativo do Sistema.....	27
<b>Figura 6</b> - Temperatura máxima no dia 02 de fevereiro de 2022 – 15:00 horas.....	29
<b>Figura 7</b> - Carta Psicrométrica.....	30
<b>Figura 8</b> – Precipitação Acumulada (mm) em 174 horas.....	31
<b>Figura 9</b> – Umidade relativa – 12:00 UTC de 05/11/2022 .....	32
<b>Figura 10</b> – Umidade relativa – 14:00 UTC de 05/11/2022 .....	33
<b>Figura 11</b> – Umidade relativa – 16:00 UTC de 05/11/2022 .....	33
<b>Figura 12</b> – Umidade relativa – 18:00 UTC de 05/11/2022 .....	34
<b>Figura 13</b> – Umidade relativa – 20:00 UTC de 05/11/2022 .....	34
<b>Figura 14</b> – Umidade relativa – 22:00 UTC de 05/11/2022 .....	35
<b>Figura 15</b> – Temperaturas máximas de janeiro de 2024 .....	36
<b>Figura 16</b> – Temperaturas máximas de fevereiro de 2024 .....	37
<b>Figura 17</b> – Precipitação de chuvas e temperatura máximas.....	38
<b>Figura 18</b> – Perfis de furação de membranas evaporativas .....	40
<b>Figura 19</b> – Exemplo de túnel de vento 2D .....	41
<b>Figura 20</b> – Túnel de vento de estudo semelhante .....	42
<b>Figura 21</b> – Imagem aproximada das placas testadas .....	43
<b>Figura 22</b> - Fluxograma de etapas do túnel de vento .....	46
<b>Figura 23</b> - Bomba d'água submersa .....	49
<b>Figura 24</b> - Moto-ventilador Elgin .....	49
<b>Figura 25</b> - Fibra de coco .....	50
<b>Figura 26</b> - Painel evaporativa comercial .....	51
<b>Figura 27</b> - Anemômetro.....	51
<b>Figura 28</b> - Higrômetro .....	52
<b>Figura 29</b> - Esboço do túnel de vento.....	54
<b>Figura 30</b> - Estabilizadores.....	55
<b>Figura 31</b> - Corpo de testes.....	56
<b>Figura 32</b> - Vista interna do Corpo de testes.....	56



<b>Figura 33</b> - Suporte do ventilador .....	57
<b>Figura 34</b> - Túnel de vento .....	57
<b>Figura 35</b> - Vista interna do Túnel de vento.....	58
<b>Figura 36</b> – Distribuição de água do sistema .....	59
<b>Figura 37</b> – Corrente de Ar no Sistema .....	59
<b>Figura 38</b> – Placa evaporativa de fibra de coco .....	60
<b>Figura 39</b> – Interior do Sistema .....	60
<b>Figura 40</b> - Túnel de vento montado.....	61
<b>Figura 41</b> - Instalação de fita led .....	62
<b>Figura 42</b> - Moldura centralizada .....	63
<b>Figura 43</b> – Vista aproximada dos painéis evaporativos usados .....	64
<b>Figura 44</b> - Vista da flambagem fibra de coco .....	65
<b>Figura 45</b> - Cotas e posicionamento das velocidades internas .....	66
<b>Figura 46</b> - Variação de pressão com velocidade de entrada de 20 m/s.....	67
<b>Figura 47</b> - Vista interna da análise de pressão no sistema .....	67
<b>Figura 48</b> - Vista em corte do interno da análise de pressão no sistema .....	68
<b>Figura 49</b> - Fluxo de velocidade do ar .....	69
<b>Figura 50</b> – Gráfico de dados de entrada e saída do túnel para fibra de coco .....	73
<b>Figura 51</b> – Gráfico de dados de entrada e saída do túnel.....	74
<b>Figura 52</b> – Evolução e passagem dos pontos dentro da carta psicrométrica .....	75
<b>Figura 53</b> – Gráfico de efetividade de saturação a fibra de coco .....	76
<b>Figura 54</b> – Influência da TBSe e UR na efetividade.....	77
<b>Figura 55</b> – Leitura adversa.....	78
<b>Figura 56</b> – Leitura adversa fora da zona favorável na carta psicrométrica .....	78
<b>Figura 57</b> – Gráfico de dados de entrada e saída do túnel para painel de celulose .....	86
<b>Figura 58</b> – Gráfico de efetividade de saturação o material comercial .....	87
<b>Figura 59</b> – Amostras de fibra de coco secas .....	89
<b>Figura 60</b> – Amostras de papel Kraft secas.....	90
<b>Figura 61</b> – Amostras em repouso para saturação .....	91
<b>Figura 62</b> – Amostras de fibra de coco saturadas .....	92
<b>Figura 63</b> – Amostras de papel Kraft saturadas .....	92
<b>Figura 64</b> – Amostras de fibra de coco secas para obtenção da densidade .....	95
<b>Figura 65</b> – Amostras de papel Kraft secas para obtenção da densidade .....	95

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1) – Equação geral dos gases .....	69
Equação (2) – Adaptação da Equação 1 .....	70
Equação (3) – Variação de pressão .....	70
Equação (4) – Variação de umidade relativa .....	72
Equação (5) – Variação de temperatura de bulbo seco.....	72
Equação (6) – Efetividade de saturação .....	75
Equação (7) – Fluxo volumétrico .....	79
Equação (8) – Fluxo mássico.....	80
Equação (9) – Taxa de evaporação .....	80
Equação (10) – Variação de entalpia .....	81
Equação (11) – Calor Total.....	81
Equação (12) – Razão de calor sensível modelo 1 .....	82
Equação (13) – Razão de calor sensível modelo 2 .....	82
Equação (14) – Calor latente.....	83
Equação (15) – Taxa de refrigeração .....	84
Equação (16) – Coeficiente de desempenho .....	84
Equação (17) – Retenção de água .....	93
Equação (18) – Retenção de água por unidade de massa .....	93
Equação (19) – Densidade .....	96

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Redução de Temperatura .....	28
<b>Tabela 2</b> – Médias de precipitações secas de 10/12/21 a 10/02/22 .....	36
<b>Tabela 3</b> - Tabela de gastos e de Materiais.....	47
<b>Tabela 4</b> - Serviços de terceiros .....	52
<b>Tabela 5</b> – Dados da fibra de coco .....	73
<b>Tabela 6</b> – Eficiência de saturação da fibra de coco .....	75
<b>Tabela 7</b> – Tabela de admissão de valores de entrada .....	77
<b>Tabela 8</b> – Dados tabelados de entrada e saída da membrana de papel Kraft .....	85
<b>Tabela 9</b> – Dados da carta psicrométrica .....	86
<b>Tabela 10</b> – Eficiência de saturação do papel Kraft.....	87
<b>Tabela 11</b> – Absorção de água das amostras .....	94
<b>Tabela 12</b> – Análise de densidade.....	97

## LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

MEC – Massa de ar Equatorial Continental

CAD – Computer Aided-Desing

UHMW – Chapa de poliestireno

CFD – Computacional Fluid Dynamics

COP – Coeficiente de desempenho, admissional

UR – Umidade relativa, %

v – Velocidade, m/s

A – Área, m<sup>2</sup>

m – Massa, kg

m<sub>1</sub> – Massa inicial, kg

m<sub>2</sub> – Massa final, kg

ΔUR – Variação de umidade relativa, %

UR<sub>e</sub> – Umidade relativa entrada, %

UR<sub>s</sub> – Umidade relativa saída, %

ΔTBS – Variação de temperatura de bulbo seco, °C

TBS<sub>e</sub> – Temperatura de bulbo seco de entrada, °C

TBS<sub>s</sub> – Temperatura de bulbo seco de saída, °C

TBU<sub>e</sub> – Temperatura de bulbo úmido de entrada, °C

$\varepsilon$  – Eficiência de saturação, %

$h$  – Entalpia, kJ/kg(da)

$\Delta h$  – Variação de entalpia, kJ/kg(da)

$h_i$  – Entalpia inicial, kJ/kg(da)

$h_f$  – Entalpia final, kJ/kg(da)

$w$  – Umidade absoluta, g/kg(da)

$P_o$  – Ponto de orvalho, °C

$V_{ar}$  – Fluxo volumétrico do ar, m<sup>3</sup>/s

$m_a$  – Fluxo mássico, kg(da)/s

$v_e$  – Volume específico, m<sup>3</sup>/kg(da)

$T_{evap\ água}$  – Taxa de evaporação da água, g/L

$\Delta w$  – Variação de umidade absoluta, g/kg(da)

$P$  – Pressão, Pa

$V$  – Volume, m<sup>3</sup>

$n$  – Número de mols

$R$  – Constante dos gases ideais, J/mol.K

$T$  – Temperatura, °C

$\Delta P$  – Variação de pressão, Pa

$P_1$  – Pressão inicial, Pa

$P_2$  – Pressão final, Pa

$\Delta Q_{Total}$  – Variação de calor total, kJ

$R_{calor\ sensível}$  – Razão de calor sensível kJ

$Q_{\text{total}}$  – Quantidade de calor total kJ

$Q_{\text{sensível}}$  – Quantidade de calor sensível kJ

$Q_{\text{Latente}}$  – Quantidade de calor latente kJ

CC – Capacidade de refrigeração, kJ/h

$m_{\text{ar}}$  – Massa do ar, kg

$W_p$  – Potência da bomba, W

$W_f$  – Potência do ventilador, W

D – Densidade, g/ml

j – Capacidade de absorção de água, ml/g

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1. TEMA .....	19
1.2. DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	19
1.3. PROBLEMA DE PESQUISA .....	19
1.4. JUSTIFICATIVA .....	20
1.5. OBJETIVOS .....	20
<b>1.5.1. OBJETIVOS GERAIS</b> .....	21
<b>1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	21
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	21
2.1. RESFRIAMENTO EVAPORATIVO .....	21
2.2. CARTA PSICROMÉTRICA .....	24
2.3. CLIMATIZADOR EVAPORATIVO .....	26
2.4. DADOS PSICROMÉTRICOS .....	28
2.5. FIBRA VEGETAL DE COCO.....	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS INSERIR QUEBRA DE PAG.....	45
3.1. TÚNEL DE VENTO .....	46
<b>3.1.1. MATERIAIS E RECURSOS</b> .....	46
<b>3.1.1.1. BOMBA D'ÁGUA</b> .....	48
<b>3.1.1.2. MOTOR E VENTILADOR</b> .....	49
<b>3.1.1.3. PLACAS EVAPORATIVAS</b> .....	50
<b>3.1.1.4. ANEMÔMETRO</b> .....	51
<b>3.1.1.5. HIGRÔMETRO</b> .....	52
<b>3.1.2. CONSIDERAÇÕES</b> .....	53
<b>3.1.3. CONJUNTO E COMPONENTES</b> .....	54
<b>3.1.4. DESENVOLVIMENTO E PROJETO</b> .....	58
<b>3.1.4.1. PROTOTIPAGEM EM ANDAMENTO</b> .....	58
<b>3.1.4.2. MONTAGEM E FABRICAÇÃO DO TÚNEL</b> .....	61
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....	63
4.1. CONTRUÇÃO .....	63
4.2. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....	66
4.3. VALIDAÇÃO DE QUEDA DE PRESSÃO .....	69
4.4. ANÁLISE PSICROMÉTRICA .....	72
<b>4.4.1. FIBRA DE COCO</b> .....	72
<b>4.4.2. PAPEL KRAFT</b> .....	85
4.5. BALANÇO DE MASSA.....	89
4.6. ANÁLISE DE DENSIDADE .....	94
5. CONCLUSÃO.....	97
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	100
<b>6. ANEXO I – CONCEITOS FUNDAMENTAIS</b> .....	101
<b>7. ANEXO II – ORIENTAÇÕES DE LEITURA</b> .....	103
<b>8. ANEXO III – CARTA PSICROMÉTRICA COMPLETA</b> .....	104
<b>9. ANEXO IV – PROPRIEDADE DOS GASES</b> .....	105
<b>10. ANEXO V – TEMPERATURAS MÁXIMAS DOS MESES DE JANEIRO</b> .....	106
<b>11. ANEXO VI – REGISTROS DE HIGRÔMETROS PARA FIBRA DE COCO</b> .....	107
<b>12. ANEXO VII – REGISTROS DE HIGRÔMETROS PARA PAPEL KRAFT</b> ...	108
<b>13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	109

## 1. INTRODUÇÃO

O controle e a satisfação térmica em ambientes fechados tornam-se cada vez mais conveniente. Tendo em vista a região noroeste do estado Rio Grande do Sul, que conta com Clima sazonal de verões cada vez mais quentes, a procura e a aquisição de sistemas de climatizador ou por meios que tragam tal conforto crescem em uma exponencial contínua, com fins de atender as necessidades desejadas buscando em um amplo mercado por modelos e características adversas. O condicionamento do ambiente de trabalho do homem por exemplo, tem influência direta aos seus resultados de trabalho e desempenho no mesmo, gerando melhores condições de bem-estar objetivando com que este trabalhador não decline em sua produção ou função.

Segundo Asharae (2006), conforto térmico é a condição psicológica de um indivíduo que expressa satisfação com relação às condições térmicas do ambiente em que este se encontra. Pode se dizer que conforto térmico está associado a condição mental em que pode se expressar satisfação diante das condições de ambiente encontradas. Isso, através de um julgamento subjetivo a sensação térmica combinada a parâmetros climáticos e fatores fisiológicos. Ainda segundo o autor, do ponto de vista fisiológico, o conforto térmico ocorre quando há um equilíbrio térmico na ausência de suor regulatório durante a troca de calor entre o corpo de um indivíduo e o ambiente em que se encontra.

Toda via, neste contexto, dentre os sistemas de climatização, aqueles equipados com ventilação e uso de pressões altas e baixas e resfriamento evaporativo tem se destacado devido à possibilidade de proporcionar melhores condições térmicas no interior das instalações.

Com intuito de dimensionar climatizador evaporativo, são esperados desafios quanto ao comportamento da colmeia vegetal de fibra de coco. Com isso, cresce de importância o estudo deste material e a análise de dados de acordo com testes e resultados encontrados.

Neste trabalho optou-se pela construção de um túnel de vento de bancada com circuito aberto onde o ar não recircular no sistema, se tornando assim de baixo custo para fins acadêmicos em comparação a um de circuito fechado, foi possível realizar testes evaporativos em escala reduzida. Com a revisão bibliográfica e pesquisas, foram encontrados diversos tipos de túneis com diferentes finalidades, bem como,



com particularidades que os distinguem como testes de aerodinâmica de veículos, aeronáutica e design de perfis prediais.

Neste caso, o dimensionamento foi voltado para melhor obtenção de dados e manobras com equipamentos e componentes, e também visando pela simplicidade construtiva, e geometria dos corpos, gerando menor custo de fabricação do mesmo sem afetar os resultados esperados e sua funcionalidade se comparado ao de circuito fechado.

Com o avanço da tecnologia, o estudo de materiais alternativos e rentáveis no que se diz respeito a custo benefício, cresce nas diferentes engenharias e empresas. Quando se há a oportunidade de implementação de novo componente, material, equipamento ou máquina. Este, independentemente de sua finalidade, deve ser testado e comprovado sua efetividade para sua função específica. A construção deste túnel de vento se dá pela necessidade de estudo e análise do comportamento e de troca térmica da fibra vegetal de coco como membrana evaporativa de um resfriador.

O resfriamento evaporativo, núcleo deste trabalho, pode ser obtido por meio da nebulização ou de placas porosas umedecidas. A diferenciação deste se dá pelo uso de placas de fibra vegetal de coco. Esta efetividade será gradativamente maior com a elevação da temperatura bulbo seco e baixos níveis de umidade relativa do ar por se tratar de um sistema adiabático, ou seja, ele não emite calor no ambiente a ser refrigerado.

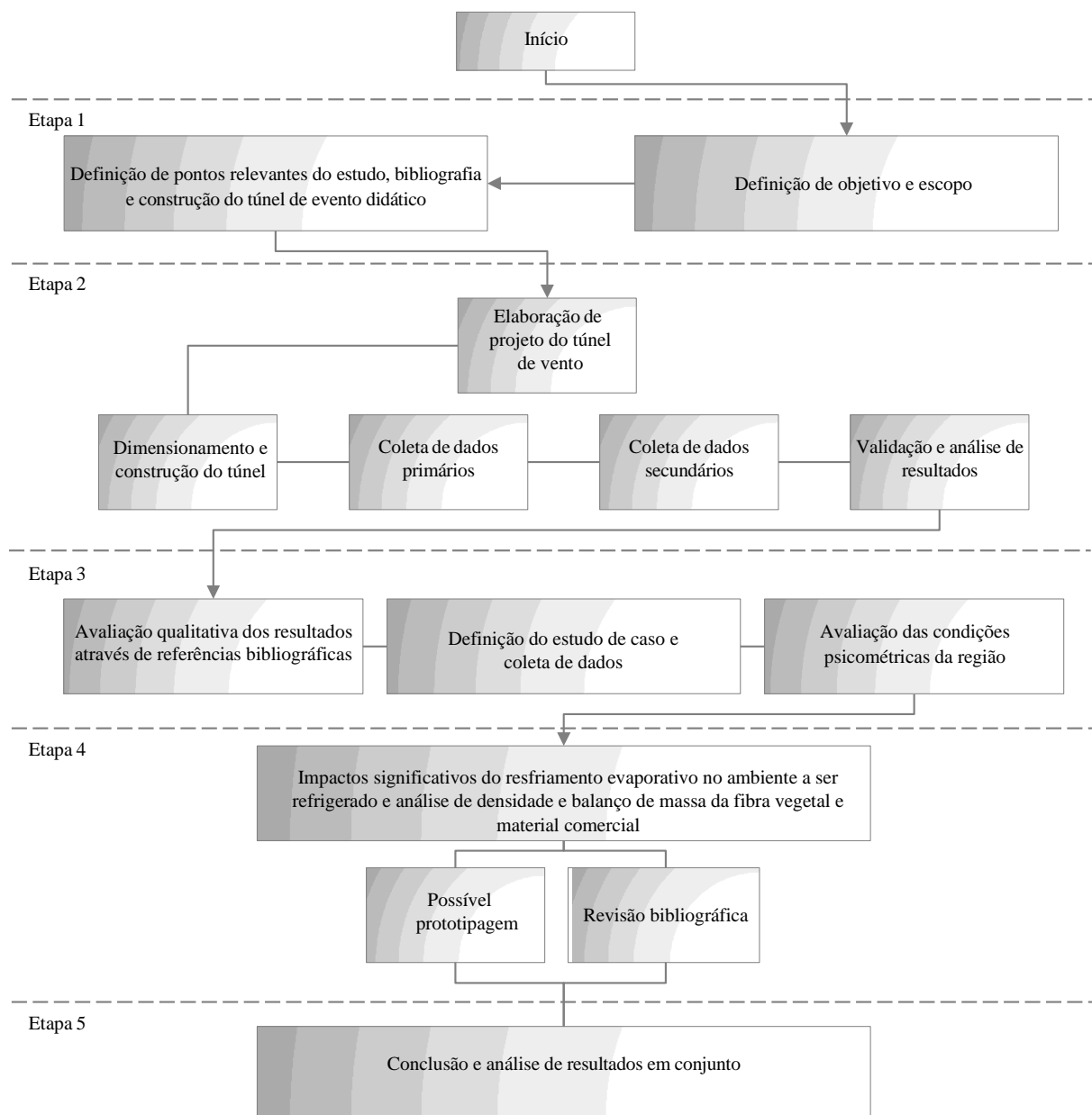
O uso de fibra vegetal de coco como material poroso da placa ou colmeia evaporativa torna-se conveniente quando com dados extraídos do banco de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, que traz dados relevantes para o uso do sistema.

Conforme (Oliveira ET AL., 2012) é evidente que o uso racional da água e o reaproveitamento máximo de energia favorecem não só aspectos econômicos, mas também o lado ambiental, pois as fibras vegetais são biodegradáveis e de baixo custo comercial, tendo como foco principal o desenvolvimento sustentável.

O autor também destaca que como o condicionador evaporativo não tem grande consumo de energia tendo em vista sua simples funcionalidade, este torna-se um eficiente método de se alcançar uma estabilidade térmica do ambiente bem como sem elevar de maneira significativa consumo de energia. Também, devido ao uso de uma rede de abastecimento pluvial, a economia com a água utilizada no sistema evaporativo cresce, induzindo ainda mais para um método eficaz e sustentável.

Espera-se que a colmeia atenda, de acordo com suas características, o esperando quanto ao fenômeno evaporativo. Sendo assim, espera-se atingir o objetivo principal de analisar as trocas térmicas do ambiente externo com o meio, e com isso, através do correto funcionamento do túnel de vento, verificar a renovação do ar e o conforto térmico no ambiente. Com tudo, na Figura 01 são expressas as etapas que deram andamento para este trabalho.

**Figura 1 - Etapas do andamento do trabalho**



**Fonte:** autor (2024)

### 1.1. TEMA

O tema deste estudo abrange o arranjo do estudo da fibra vegetal de coco como membrana de sistema evaporativo.

### 1.2. DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho delimita-se ao dimensionamento e prototipagem de túnel de vento para testes evaporativos, analisando desempenho da fibra vegetal de coco e em comparativo com placa evaporativa comercial de papel kraft, com sucinta coleta de dados em estudo de caso de sistema evaporativo em empresa da região.

### 1.3. PROBLEMA DE PESQUISA

Qual será o comportamento da colmeia vegetal de fibra de coco em relação ao fenômeno evaporativo? E quais serão os resultados encontrados e esperados no que se diz respeito a fluxo e qualidade do ar do ambiente, bem como o conforto térmico do meio e trocas de temperatura, e condições favoráveis de umidade relativa do ar.

- Fluxo de ar:
  - a) A vazão mássica do ar que passa pela placa terá atenção para o controle das trocas de ar existentes que podem ocorrer no ambiente. Caso resultados sejam favoráveis, analisar hipótese de relacionar a uma situação real de trabalho, como o de uma empresa por exemplo.
  - b) Acredita-se que é possível obter-se um melhor resultado de eficiência se a temperatura de bulbo seco do ar for elevada e umidade relativa baixa. Dados de entrada condizentes a região noroeste do Rio Grande do Sul, área a ser efetuado os devidos testes.
- Conforto térmico:

- a) O objetivo principal deste sistema é prover o melhor conforto térmico a certo ambiente determinado analisando trocas térmicas existentes.
  - b) Para que haja de fato conforto térmico, espera-se que o sistema evaporativo funcional reduza a temperatura ambiente e umidifique o ar, sendo comprovada através cálculos como da eficiência da placa evaporativa e de medições de temperatura.
- Túnel de vento:
    - a) Túnel de vento de maneira geral se baseia na transposição de ar de um lado para o outro de maneira forçada, passando pela placa evaporativa em uma posição centralizada.
    - b) A medida do possível em que a funcionalidade básica do túnel de vento estiver em condições de realizar testes, podem surgir e acontecer melhorias. Estas que possam vir a acrescentar ao trabalho e no enriquecimento de dados.

#### 1.4. JUSTIFICATIVA

Visando o bacharelado de engenharia mecânica, este trabalho de final de curso pode ser justificado pela das condições psicrométricas da região noroeste do RS demonstrarem alto potencial para o resfriamento evaporativo. Com isso, o resfriamento evaporativo pode uma alternativa para substituir o ar condicionado de sistemas de compressão de vapor em diversas situações de ambientes fechados. De certa forma, o trabalho tem como intuito alavancar a possibilidade do uso da fibra vegetal de coco como material alternativo para membranas destes sistemas.

#### 1.5. OBJETIVOS

A fins teóricos e práticos que se propõe alcançar resultados favoráveis em relação à fibra vegetal de coco, objetiva-se identificar e analisar de forma coesa a compatibilidade da fibra de coco como membrana evaporativa.

### **1.5.1. OBJETIVOS GERAIS**

- Construir túnel de vento didático de circuito aberto de modo que seu funcionamento realize a função de um refrigerador evaporativo;
- Realizar testes e verificar capacidade de troca evaporativa da fibra de coco;

### **1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Projetar e dimensionar túnel de vento didático;
- Obter a capacidade de retenção de água da fibra;
- Encontrar a efetividade de evaporação da fibra de acordo com a retenção de água encontrada;
- Verificar reais condições de conforto térmico mesmo em escala reduzida;

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

O resfriamento do tipo evaporativo direto, usa princípios básicos da evaporação para se obter conforto térmico. Esse processo é amplamente usado em diferentes áreas de aplicação, basta, com que as condições de entrada sejam ideais e favoráveis. Este fenômeno proporciona uma alternativa viável aos métodos de resfriamento convencionais do ponto de vista ambiental.

### **2.1. RESFRIAMENTO EVAPORATIVO**

O resfriamento evaporativo, pode ser direto ou indireto. Este método é conhecido pela eficiência energética de condicionamento de ar em ambientes áridos ou fabris. Um sistema de resfriamento evaporativo pode ser considerado uma alternativa de sistema de baixo custo de aquisição se torna viável se comparado com outros sistemas de refrigeração, além de um custo de operação baixo.

Estes dispositivos são simples e são regidos pela analogia de Bernoulli, onde se tem vazão de ar e de água ou vapor como fluidos que passam no interior do sistema. Um grande problema ou preocupação nos dias atuais de relevância é o consumo energético e o alto consumo de energia elétrica, seja em determinado setor ou residência. O resfriamento evaporativo desafia algumas condições de conforto térmico de maneira natural, fazendo com que suas próprias características de resfriamento sejam aplicadas em diferentes situações.

Consequente a esta circulação e interação entre fluidos, produz uma certa queda de pressão no interior que a partir disso ocorrerá o fenômeno evaporativo resfriando o ar. O resfriamento acontece devido ao fluxo laminar de ar que tangencia a superfície úmida e com os princípios naturais de retirada do calor sensível e anulação da temperatura atmosférica sob o fluido a ser evaporado pois contam com a água como fluido refrigerante e trocador de calor.

Uma aplicação importante de transferências de calor e de massa é o processo de resfriamento evaporativo, que ocorre quando o ar escoia sobre a superfície de um líquido. A evaporação ocorre diretamente nesta superfície, e a energia associada à mudança de fase é o calor latente de vaporização do líquido.

A evaporação acontece quando as moléculas do líquido próximas à superfície sofrem colisões que aumentam a sua energia para um valor acima daquele necessário para superar a energia de ligação na superfície. A energia necessária para sustentar a evaporação tem que vir da energia interna do líquido, que deve então experimentar uma redução na sua temperatura através do escoamento do ar (o efeito de resfriamento), pois quanto maior a temperatura, maior é a capacidade do ar em reter o vapor d'água sem saturar (condensação).

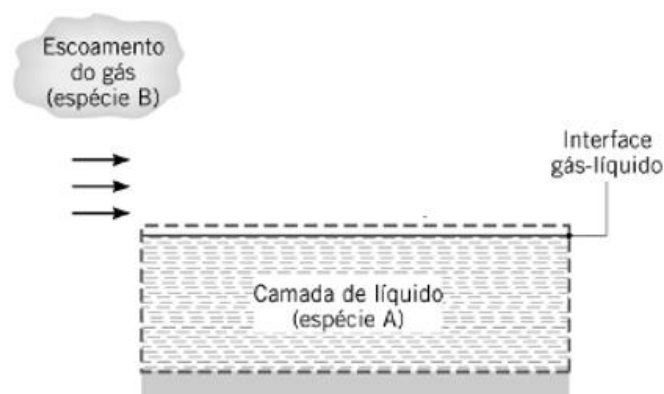
No entanto, se condições de regime estacionário forem mantidas, a energia latente perdida pelo líquido em função da evaporação tem que ser repostada pela transferência de energia para o líquido a partir de sua vizinhança. Desprezando efeitos radiantes, essa transferência pode ser decorrente da convecção de energia sensível a partir do gás ou da adição de calor por outros meios, como, por exemplo, por um aquecedor elétrico submerso no líquido. Aplicando a conservação de energia em uma superfície de controle em torno do líquido, tem-se que, por uma unidade de área superficial. (BERGMAN 2019 p. 242)

A Figura 2 demonstra o fenômeno fisicamente e é possível observar a camada de líquido e sua interface superficial, em que as setas direcionam o escoamento de certo gás tangenciando esta interface. É possível de maneira análoga a hipótese em que o líquido seja água e o gás em escoamento venha a ser o ar e a superfície em questão seja a nossa pele.

A tendência natural desses elementos é uma total difusão, ou seja, eles tendem a se misturar naturalmente e as partículas de água tendem a ser evaporadas. Porém, o que impede tal ação das partículas de água é a pressão atmosférica que retem as partículas presas na superfície em estado líquido.

No entanto, à medida que temos uma passagem de ar, o escoamento do mesmo pela superfície em questão, irá fornecer energia cinética neste contato interfacial. Será nesse fluxo que a pressão atmosférica será vencida e a água somente poderá evaporar à medida que subtrair calor da superfície propriamente dita. Por sua vez, o corpo sendo uma espécie de calorímetro, sente esta perda de calor e temos o efeito de “calafrio”. Que nada mais é que a perda de calor para que essas moléculas de água tenham energia para a evaporação, ou seja, o fenômeno evaporativo.

**Figura 2** – Fenômeno evaporativo em interface líquida



**Fonte:** Bergman, 2019, p. 242

Já quando toma-se como ponto inicial para o uso deste fenômeno para fins de conforto térmico e/ou uma estabilidade da temperatura do ambiente, segundo (Oliveira *ET AL.*, 2012) o resfriamento evaporativo é um método simples e prático de condicionamento de ar, especialmente usado nas regiões mais áridas no mundo, e

em que no Brasil é mais utilizado nas regiões distantes do litoral e em torno da região central do país. Isto nos traz a ideia em que as regiões litorâneas possuem um ar muito úmido pela proximidade da água. Entende-se então, que o fenômeno evaporativo não tenha muita eficiência neste tipo de região.

Ainda segundo (Oliveira *ET AL.*, 2012), o ar atmosférico é uma mistura de ar seco e vapor de água. Para uma dada condição de temperatura e pressão, essa mistura tem a capacidade de conter uma quantidade máxima de vapor de água. Sendo assim, o resfriamento evaporativo aproveita essa capacidade do ar de armazenar água em forma de vapor e opera utilizando a água e o ar como fluidos de trabalho.

O autor deixa claro também que é perceptível que com a passagem de água pelas placas evaporativas e o contato ar-água nelas estabelecido, ocorre também como um processo de filtro de purificação do ar, retendo partículas do ar nas fibras dos painéis juntamente com possível redução de surgimento de problemas respiratórios. Coerente a isso pode-se ter a sensatez de que a evaporação de água através da passagem de um fluxo de ar provoca a redução na temperatura e elevação da umidade específica. Tornando mais eficiente este processo quando a temperatura do ar externo for mais elevada e sua umidade relativa mais baixa.

## 2.2. CARTA PSICROMÉTRICA

A carta psicrométrica, ou carta de Givoni é uma ferramenta em gráfico capaz de trazer entendimento sobre ações nocivas de resfriamento de diferentes aspectos. Nela são atribuídos valores específicos do ar como umidade relativa, temperatura de bulbo seco, entalpia, ente outros.

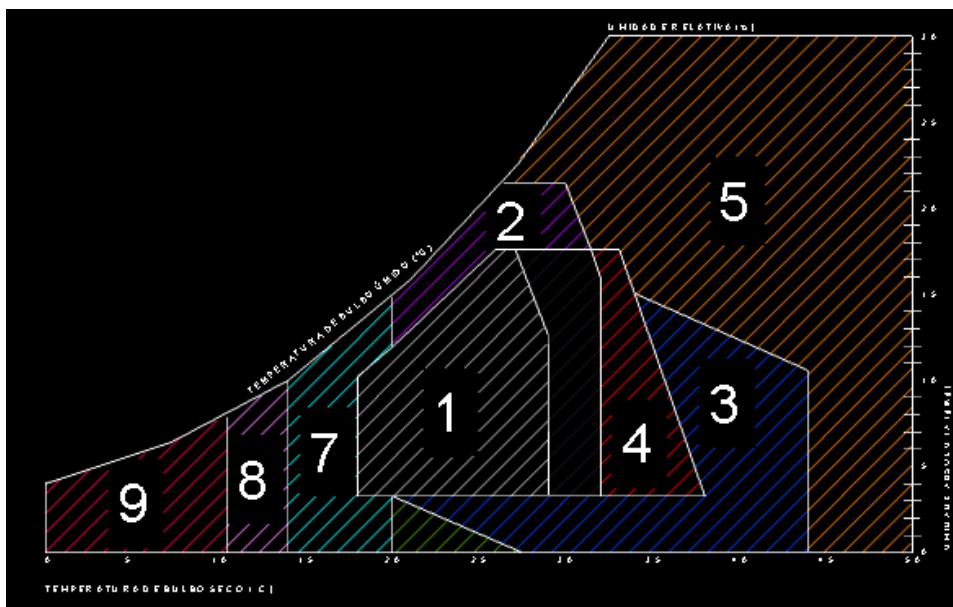
Com a correta leitura e atribuição de dados à relação entre temperatura e umidade. Ela é representada por zonas de resfriamento, onde cada zona possui suas características adversas a outras, e assim sucessivamente. A Figura 03 traz as zonas mencionadas, incluindo a de resfriamento evaporativo núcleo deste trabalho. A lista enumerada termos:

1. Zona de conforto;
2. Zona de ventilação;
3. Zona de resfriamento evaporativo;



4. Zona de massa térmica de resfriamento;
5. Zona de ar-condicionado;
6. Zona de umidificação;
7. Zona de massa térmica para aquecimento;
8. Zona de aquecimento solar passivo;
9. Zona de aquecimento solar artificial;

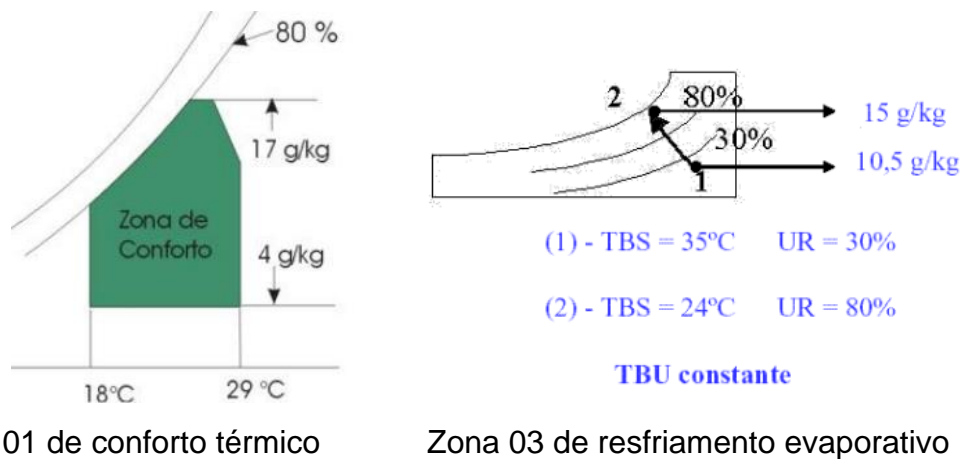
**Figura 3** – Zonas da carta psicrométrica



**Fonte:** Benjamin, 2020

Dando prosseguimento, na Figura 04 estão identificadas limitações das zonas de conforto térmico e de resfriamento evaporativo, zonas 01 e 03 respectivamente. Na zona de conforto pode-se observar que ela se encontra situada entre 18°C e 29°C, com restrições de umidade relativa e absoluta do ar. Já para as condições serem favoráveis ao resfriamento evaporativo, a zona conta com limitações de umidade relativa do ar de 30% a 80% juntamente como temperatura de bulbo seco de entrada entre 24°C e 35°C.

**Figura 4** – Limitações das zonas de conforto térmico e resfriamento evaporativo



Fonte: Esalq, 2013

As especificações das zonas de resfriamento são essenciais para o correto entendimento de cada fenômeno existente. Os processos de climatização são fundamentais em todos os ambientes ou projetos de operação. O aumento da busca do controle eficiente da temperatura ambiente cresce nos diferentes setores. O conforto térmico descreve a sensação subjetiva individual ou de bem estar térmico ao usufruir de um ambiente específico. Para que isso ocorra, uma série de análises deve ser levada em consideração como radiação, características do ar interno e externo do ambiente e até mesmo atividades metabólicas.

### 2.3. CLIMATIZADOR EVAPORATIVO

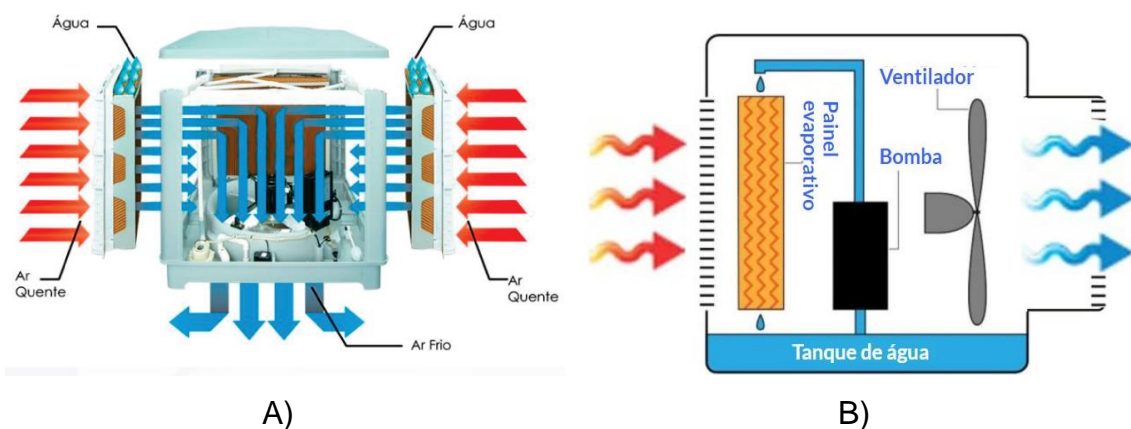
O climatizador evaporativo torna-se impossibilitado de atingir temperaturas baixas como do ar condicionado por usar água como fluido refrigerante. Nele, o ar quente passa pela placa evaporativa ou colmeia, que em sistemas comerciais as colmeias são compostas por um material de papel kraft, que vem a ser um material poroso de celulose rígida corrugada. Estas, permaneceram a maior parte do tempo umedecidas através do fluxo de água do sistema de circulação que proviera de reservatório do sistema pluvial existente.

Estas, que além de promover a evaporação da água através deste fluxo de ar transpassando por seu interior, ou seja, o processo físico do resfriamento evaporativo

baseia-se no processo de evaporação da água que retira calor do ambiente ou do material sobre o qual a evaporação acontece.

Neste sistema, como ocorre um processo adiabático e endotérmico, no processo termodinâmico há trocas de calor existentes, porém, o único meio de troca de energia é através de trabalho e não por trocas de temperatura. O ar transpassando pelas colmeias é então empurrado por um ventilador existente no sistema para fora dele, umidificando o ar e consequentemente reduzindo sua temperatura como exemplificado na Figura 05 (A) e (B).

**Figura 5** – Exemplo do Fenômeno Evaporativo do Sistema



**Fonte:** Rio Clima, 2010

O grau de resfriamento pode ser determinado pela velocidade da evaporação, quanto mais rápido o processo de evaporação maior será a queda da temperatura. A taxa de evaporação e a obtenção de um resultado mais rápido de acordo com o tamanho da área superficial umidificada da placa. Área está, onde de fato está ocorrendo o fenômeno evaporativo. Torna-se evidente que o aproveitamento ideal e desejável deste sistema tem convergência direta com a velocidade de passagem do ar pelas placas evaporativas.

Conforme diagnóstico de manual do climatizador evaporativo comercializado pela empresa Rio Clima climatizadores, vindo a discernir dados dos modelos RC-18, RC-23 e rc-35, mostra que possuem uma redução de temperatura significativa. Os dados da Tabela 01, demonstram tais reduções de temperatura, compreendendo como bases para as medições a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar. O

resultado mais conveniente com o fenômeno evaporativo corresponde ao com maior temperatura de bulbo seco registrada coincidente com a menor umidade relativa registrada.

Os modelos da empresa RIO CLIMA, possuem seus painéis evaporativos constituídos de papel kraft que é um material poroso de celulose rígida corrugada, que traz o conhecimento de que em condições de temperatura de bulbo seco de aproximadamente 37°C e umidade relativa do ar de aproximadamente 30%, os modelos já citados de condicionadores evaporativos chegam a suavizar a temperatura ambiente em até 11,0°C. Bem como, umidificando o ar que passara a ocupar o determinado local e realizando a troca mássica de ar de aproximadamente. De mesmo modo, em um projeto de resfriador, através do conhecimento de desempenho é possível identificar se o resfriamento está de acordo com o esperado em operação e se condiz com as condições de obtenção de carga térmica especificadas.

**Tabela 1**– Redução de Temperatura

<b>Umidade Relativa</b>	<b>Temperatura de bulbo seco 25°C</b>	<b>Temperatura de bulbo seco 32°C</b>	<b>Temperatura de bulbo seco 37°C</b>
30%	8,5°C	9,5°C	11,0°C
40%	7,0°C	8,0°C	8,5°C
50%	5,5°C	6,5°C	7,0°C
60%	4,5°C	5,0°C	5,5°C
70%	2,5°C	2,5°C	3,0°C

**Fonte:** Rio Clima, 2010

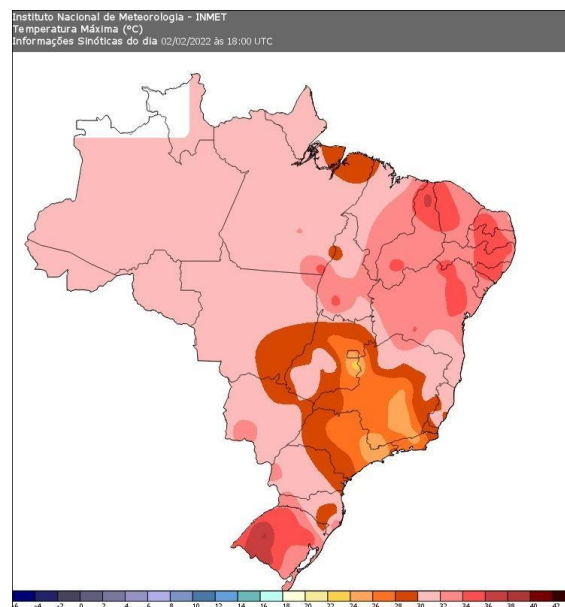
## 2.4. DADOS PSICROMÉTRICOS

Para evidenciar os resultados evaporativos desejados, as condições psicrométricas da região de aplicação devem ser estudadas, uma vez que os dados de entrada não são variáveis de controle. O trabalho de Carossi (2006) é específico na caracterização das regiões brasileiras que possuem potencial de uso do resfriamento evaporativo fornecendo a informação dos meses mais propícios para obter uma

melhor eficiência de resfriamento evaporativo. Esta informação exonera aspectos desnecessários a serem avaliados, como por exemplo dias chuvosos e úmidos, pois refere principalmente à intensidade da temperatura de bulbo seco e umidade relativa obtida na entrada do painel evaporativo.

De forma geral, as temperaturas de acordo com a Figura 6, que apresenta o mapa de temperaturas máximas registradas no dia 02 de fevereiro de 2022, dados coletados às 15 horas (horário de Brasília). Observa-se que temperaturas máximas acima de 40°C foram registradas no Rio Grande do Sul, na região noroeste do estado mais especificamente, as temperaturas giram em torno dos 36°C à 40°C. De acordo com os dados coletados do site do INMET nessa data e hora na estação de santa rosa foi registrada temperatura de bulbo seco de 35,57°C e uma porcentagem de umidade relativa do ar registrada igual a 18,5% com uma velocidade do ar de 2,9 m/s a 4,64 m/s.

**Figura 6** - Temperatura máxima no dia 02 de fevereiro de 2022 – 15:00 horas

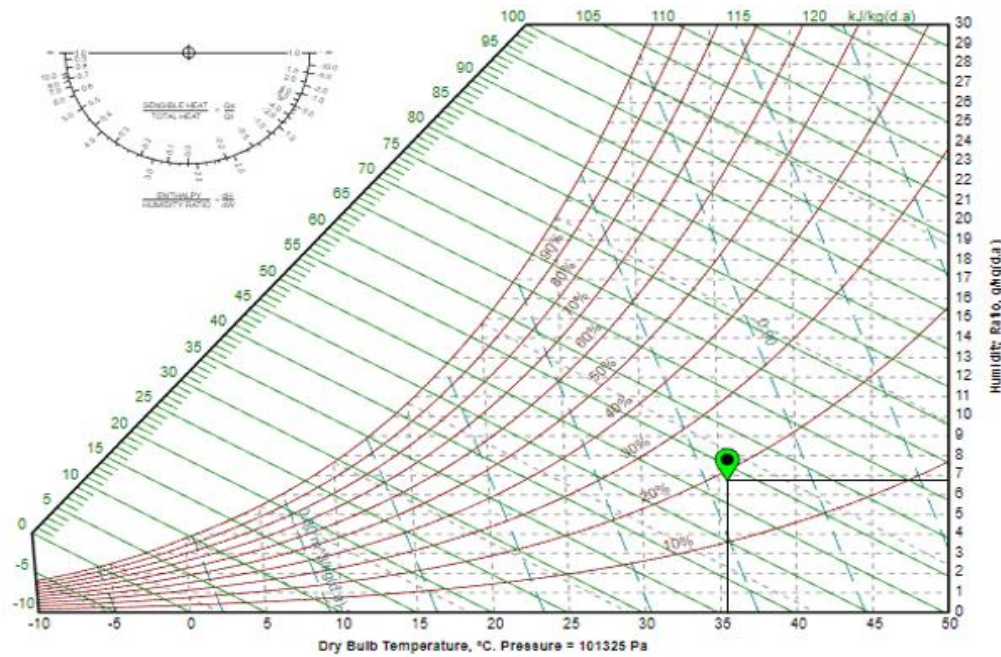


**Fonte:** INMET, 2022

Em condições registradas referente ao dia 02 de fevereiro de 2022 da estação de meteorologia de Santa Rosa RS, temos uma temperatura de bulbo seco de 35,57°C e uma porcentagem de umidade relativa do ar registrada igual a 18,5% com uma velocidade do ar de 2,5 m/s. Na Figura 7 destaca-se tais condições, sendo estas dentro da zona que apresenta condições psicrométricas favoráveis a utilização do

resfriamento evaporativo. Certifica-se que as mesmas correspondem a uma elevada temperatura de bulbo seco e baixa umidade relativa do ar.

**Figura 7 - Carta Psicrométrica**

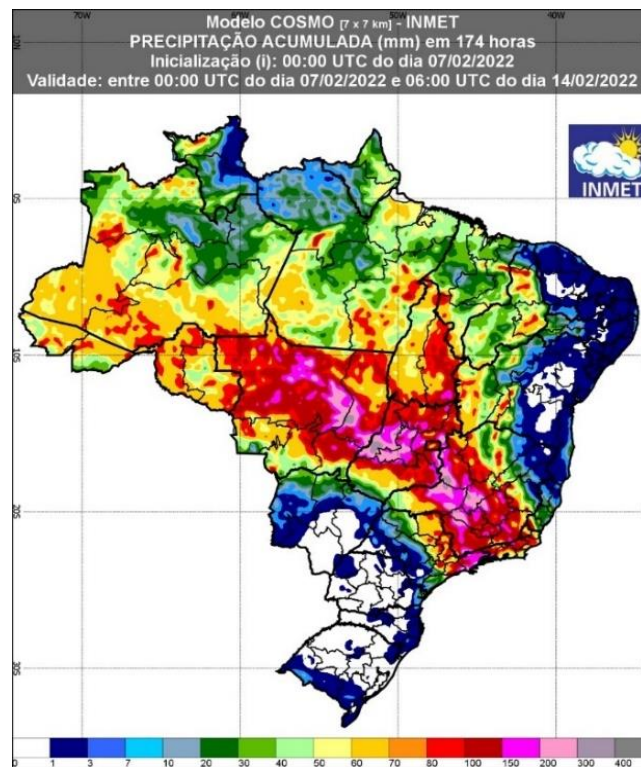


**Fonte:** Carta psicrométrica, 2024

Já na Figura 8, mapa de precipitação de um total de 174 horas postado em um dos informativos do INMET, consta uma precipitação de chuva estimada de 7 dias. É perceptível o acumulo de falta de chuva na região noroeste do Rio Grande do Sul, com isso, torna-se possível dizer que o a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar, se comportam temporariamente durante certos períodos mensais de maneira inerte, ou seja, se comportam de uma maneira constante, sem muitas alterações excessivas.

Deste modo, por conta de analisar dados coletados do INMET onde constam registros diários importantes como temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar, tornou-se necessário restringir os períodos a serem considerados para cálculos, dos dias 10 dezembro a 10 de fevereiro dos últimos anos.

**Figura 8** – Precipitação Acumulada (mm) em 174 horas



Fonte: INMET, 2022

Em um estudo, Hosseini (2007), desenvolveu um sistema de resfriamento evaporativo de pequeno porte e adaptaram numa turbina a gás com ciclo combinado para fazer uma modelagem e avaliação da eficiência de resfriamento evaporativo. No seu modelo proposto, Hosseini (2007) se baseou em diferentes parâmetros, como a velocidade do ar de admissão, forma geométrica, dimensões e espessura média.

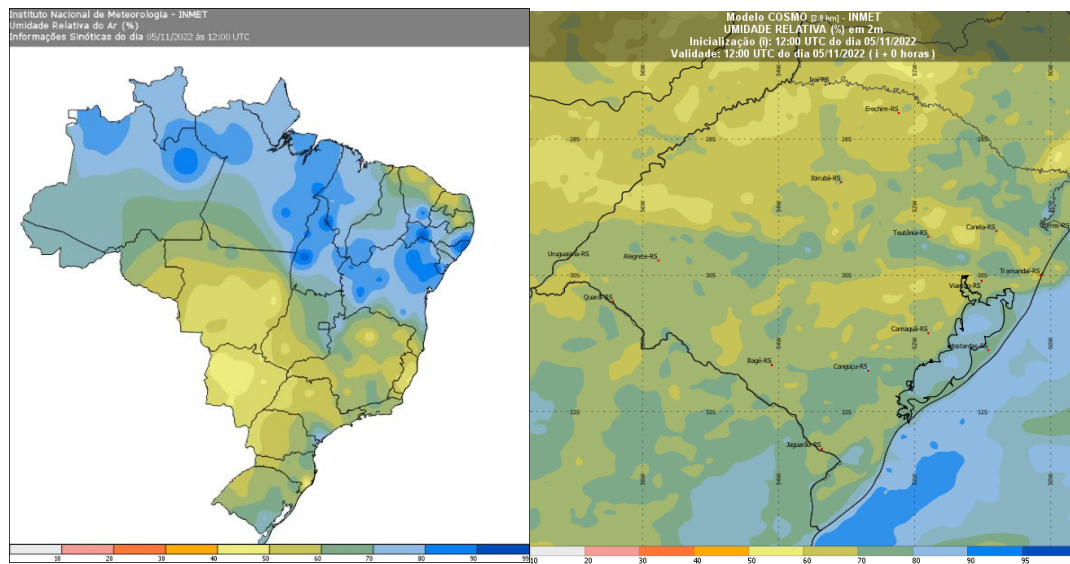
Na sequência, a análise dos resultados de seu experimento, o autor mostrou que a eficiência de resfriamento evaporativo diminuiu quando ocorreu um aumento da perda de pressão e aumento da velocidade do ar. Comprovando assim a influência direta da velocidade do ar na obtenção de resultados considerados ideias, bem como e não menos importante, a baixa umidade relativa do ar para ocorrer o fenômeno, pois quanto mais seco for o clima maior será a aplicabilidade do sistema.

Silva (2002) enfatiza que o ar atmosférico é uma mistura de ar seco e vapor de água e para uma dada condição de temperatura e pressão esta mistura tem capacidade de conter uma quantidade máxima de vapor d'água. Sendo assim, o autor destaca que o resfriamento evaporativo aproveita esta capacidade do ar de armazenar água em forma de vapor e opera utilizando a água e o ar como fluidos de

trabalho, que consiste na utilização da evaporação de água através da passagem de um fluxo de ar, provocando uma redução na temperatura e elevação de sua umidade específica.

É perceptível, através dos repentinos registros apresentados da Figura 12 até a Figura 17, referente dia 05 de novembro de 2022 (um dia com altas temperaturas e baixos índices de umidade relativa do ar), que essa restrição pode ser definida entre 14:00 horas e 21:00 horas, que correspondem ao período ideal e favorável a execução de testes. A inquirição desta restrição pra levantamento de dados iniciar pelas 14:00 horas, pode ser explica por um maior desequilíbrio na umidade relativa entre o registro de 12:00 horas alusivo pela Figura 9, e Figura 10 referente a 14:00 horas.

**Figura 9** – Umidade relativa – 12:00 UTC de 05/11/2022



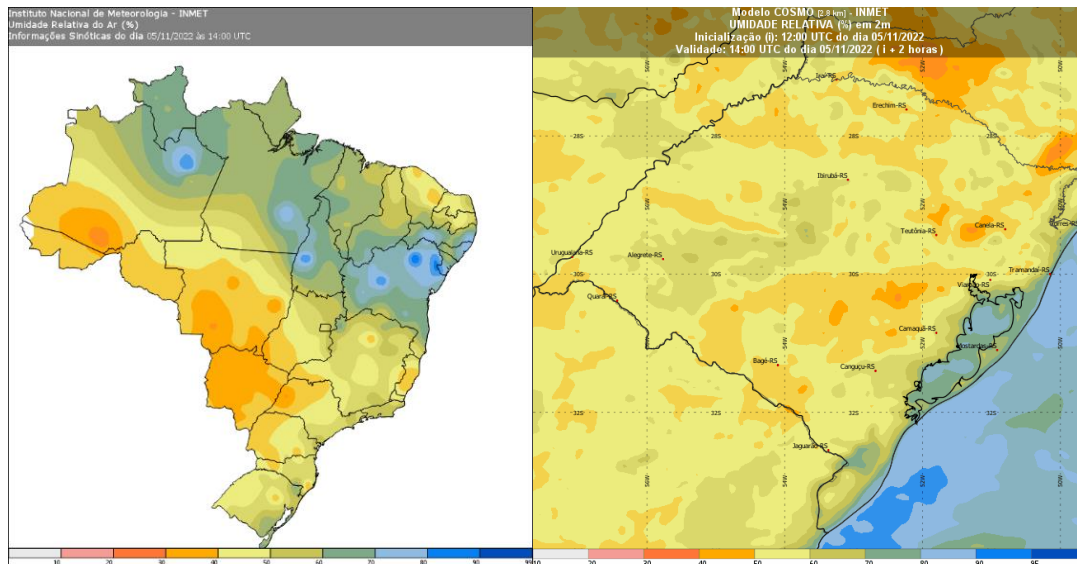
Umidade relativa do ar no país

Umidade relativa do ar no estado do RS

**Fonte:** INMET, 2022



**Figura 10** – Umidade relativa – 14:00 UTC de 05/11/2022



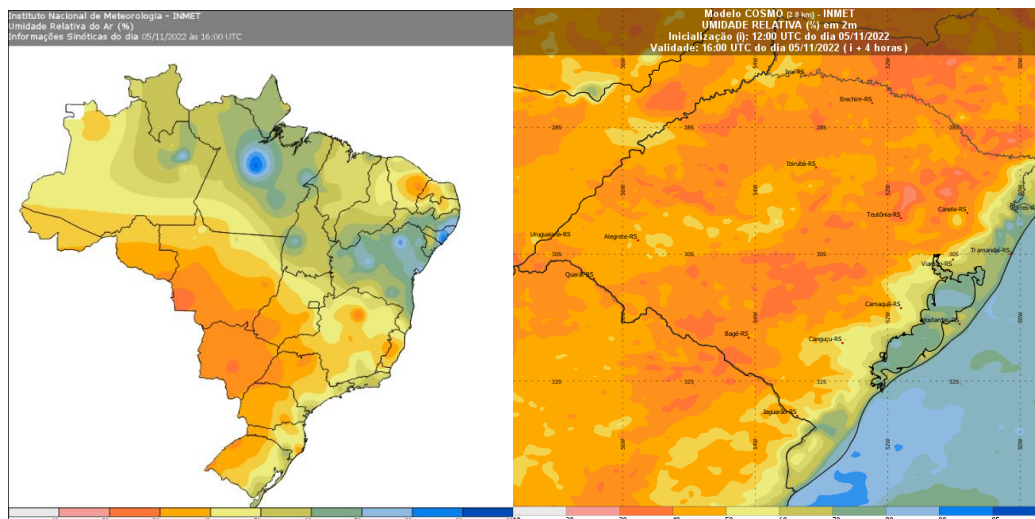
Umidade relativa do ar no país

Umidade relativa do ar no estado do RS

Fonte: INMET, 2022

A Figura 11, registro das 16:00 horas, pode-se se ter uma analogia maior da proporção da baixa umidade relativa do ar.

**Figura 11** – Umidade relativa – 16:00 UTC de 05/11/2022



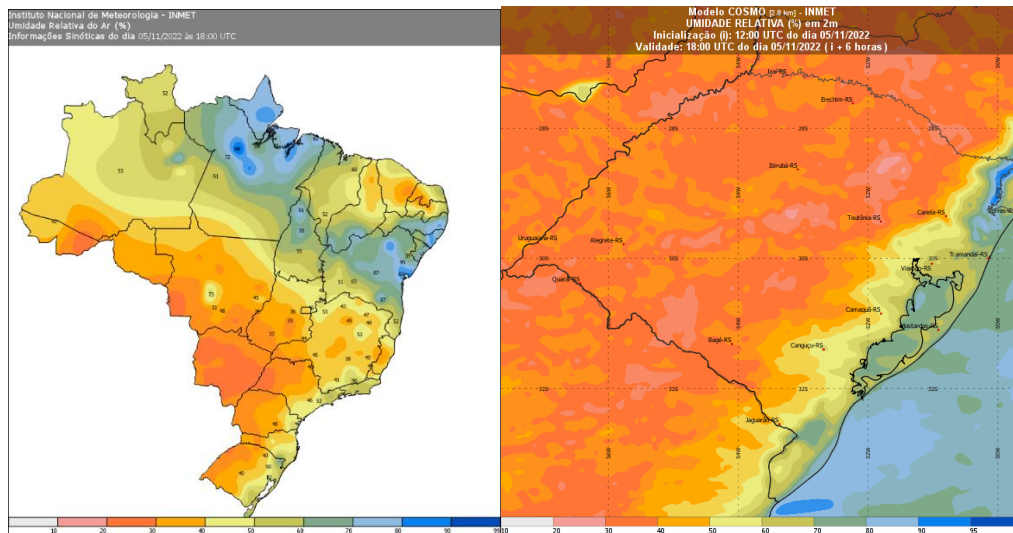
Umidade relativa do ar no país

Umidade relativa do ar no estado do RS

Fonte: INMET, 2022

O período ápice dos registros diários de baixa umidade relativa do ar costuma ser em torno de 18:00 horas, como traz o exemplo da Figura 12 referente ao mesmo dia.

**Figura 12** – Umidade relativa – 18:00 UTC de 05/11/2022



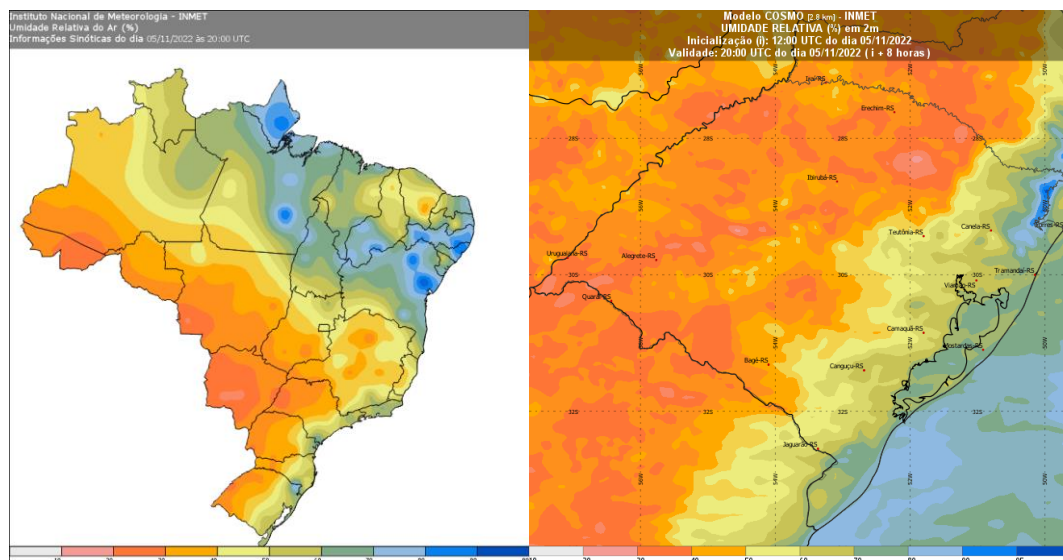
Umidade relativa do ar no país

Umidade relativa do ar no estado do RS

Fonte: INMET, 2022

Mesmo havendo uma harmonia com as Figuras 13 e Figura 14, começa a se iniciar uma desconformidade, e a umidade relativa do ar começa a subir ao decorrer do horário onde se torna claro na figura 15, representando o horário de 20:00 horas.

**Figura 13** – Umidade relativa – 20:00 UTC de 05/11/2022



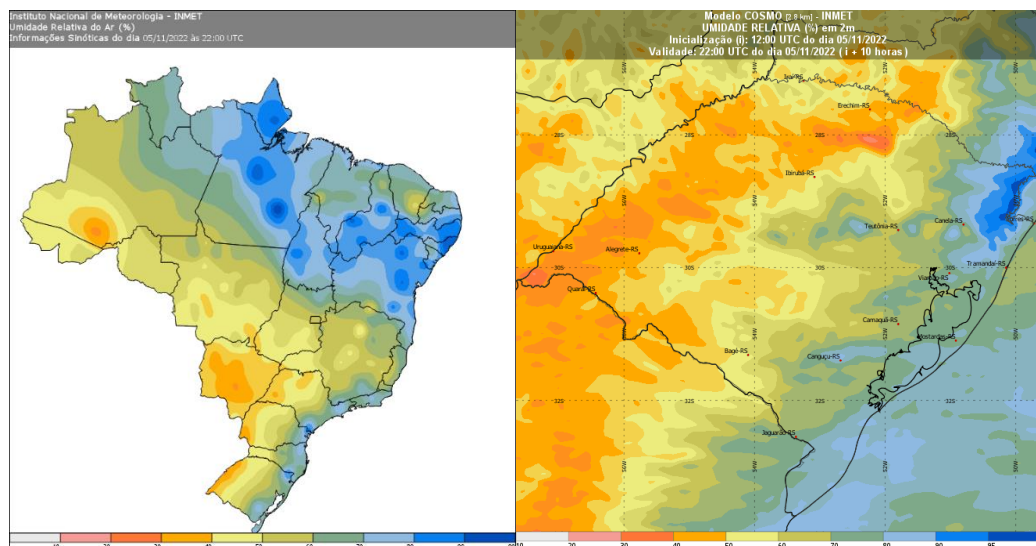
Umidade relativa do ar no país

Umidade relativa do ar no estado do RS

Fonte: INMET, 2022

Já na Figura 14 correspondente ao horário de 22:00 horas, é evidente a disparidade desta umidade relativa, definindo assim o limite do período de até 21:00 horas.

Figura 14 – Umidade relativa – 22:00 UTC de 05/11/2022



Umidade relativa do ar no país

Umidade relativa do ar no estado do RS

Fonte: INMET, 2022

Em virtude da obtenção de dados, o site do INMET também nos traz dados tabelados dos registros da estação de meteorologia de Santa Rosa RS, com datas, horas e informações essenciais para o estudo. A Tabela 2 contém, de acordo com os horários já especificados, os registros de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e velocidade do ar em uma restrição de 10 de dezembro de 2021 a 10 de fevereiro de 2022 representando período mais seco.

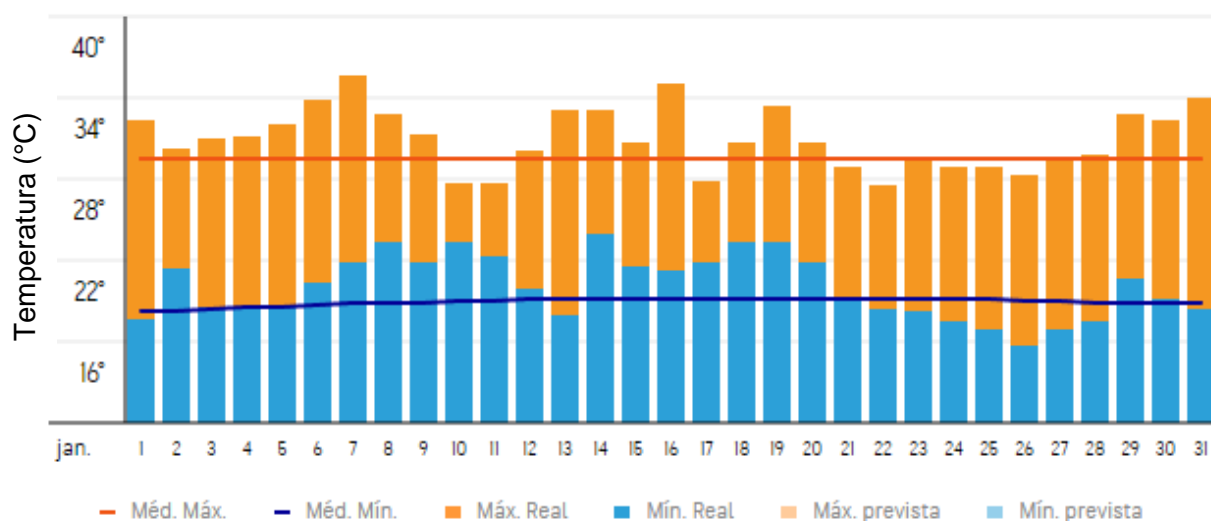
**Tabela 2**– Médias de precipitações secas de 10/12/21 a 10/02/22

Hora	Temperatura de bulbo seco (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do ar (m/s <sup>2</sup> )
14:00	30,3°C	33	2,3
15:00	31,7°C	31	2,4
16:00	33,2°C	31	2,7
17:00	34°C	28	2,7
18:00	33,9°C	24	2,7
19:00	33,6°C	28,5	2,7
20:00	33,6°C	29	3,3
21:00	33,4°C	27,5	2,9

Fonte: INMET, 2022

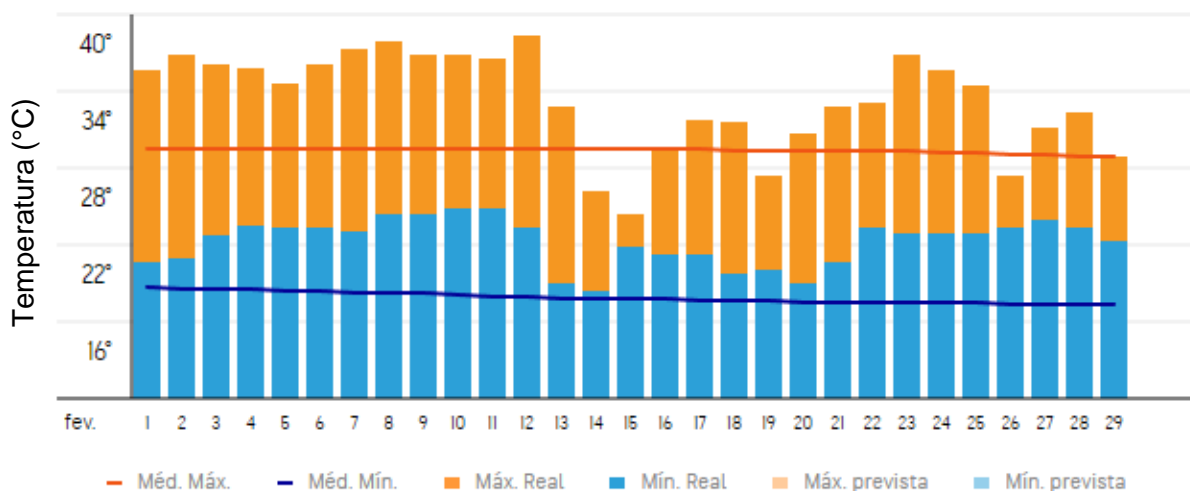
Dando continuidade as temperaturas elevadas no verão mais recente, por conta de uma pane na estação meteorológica, não foi possível extrair dados dos períodos atuais do portal oficial do INMET. Mesmo assim, a Figura 15 e Figura 16, têm-se os registros de temperatura máxima registradas meses de janeiro e fevereiro de 2024 respectivamente. Onde é possível observar que a região noroeste do Rio Grande do Sul por diversos fatores meteorológicos é sobreposta a verões de altas temperaturas.

**Figura 15** – Temperaturas máximas de janeiro de 2024



Fonte: accuweather, 2023

**Figura 16** – Temperaturas máximas de fevereiro de 2024



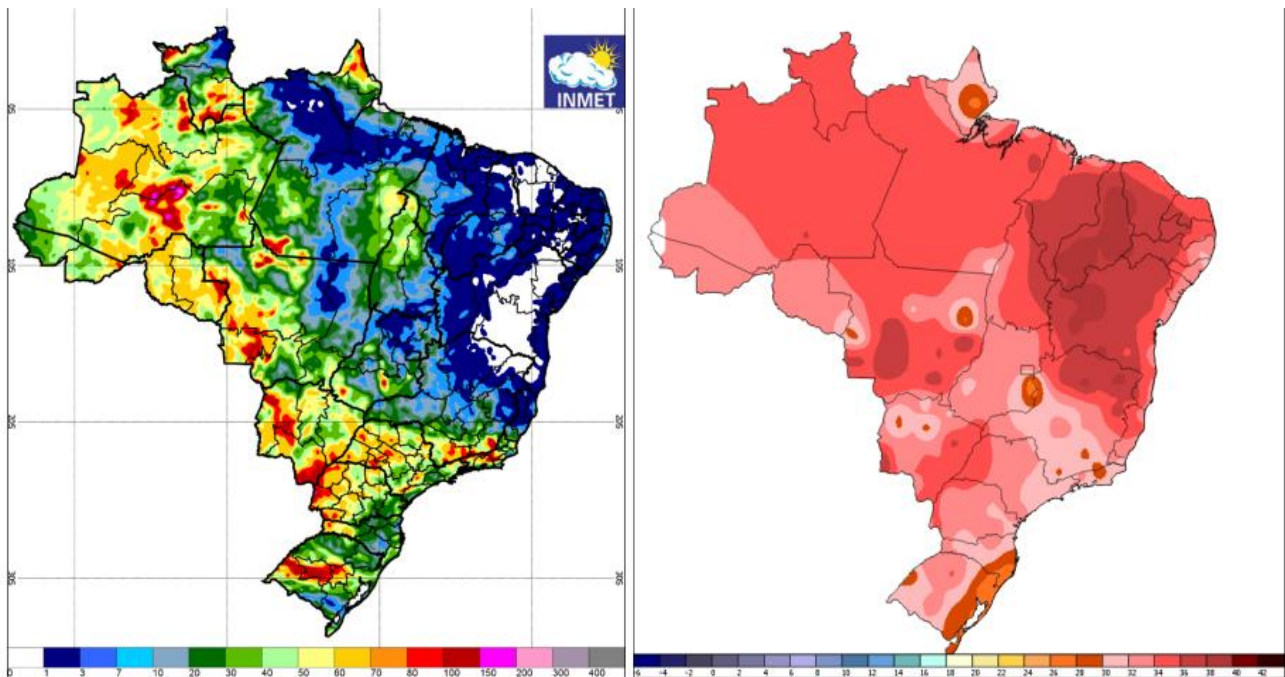
**Fonte:** accuweather, 2024

O INMET juntamente com seus informativos, que desempenha papel fundamental na disponibilização de informações meteorológicas confiáveis. Sendo estes importantes para formulação de estratégias e planejamentos como agricultura, aviação e pesquisas científicas entre outros.

A análise dos dados meteorológicos fornecidos é essencial para compreender as condições climáticas e suas implicações. A região noroeste do Rio Grande do Sul, sujeita a verões de altas temperaturas, e o resfriamento evaporativo é uma estratégia para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e garantir a sustentabilidade das atividades econômicas e sociais.

Os informativos referentes ao mês de dezembro de 2023 trazem informações de ponderada precipitação de chuvas semanais para a região sul de em torno de 30 mm e acúmulos maiores próximos aos 70 mm, e com temporais devido a atuações de massas de ar quente, e temperaturas máximas diárias entre 30°C e 34°C, configurando fenômeno do El Niño. Na Figura 17, gráficos referentes a precipitação de chuvas e temperaturas máximas (A) e (B) respectivamente.

**Figura 17** – Precipitação de chuvas e temperatura máximas



A) Precipitação de chuvas

B) Temperaturas máximas

Fonte: INMET, 2023

## 2.5. FIBRA VEGETAL DE COCO

O atual padrão de consumo da sociedade estabelece uma relação de substituição de bens sem que efetivamente o produto tenha completado o seu ciclo de vida, impondo um verdadeiro processo de obsolescência planejada. Associado a este fato soma-se o valor de compra estabelecido aos produtos, que não reflete com fidedignidade a tecnologia e a escassez dos materiais que os compõem.

Com uma ideologia a confrontar tais aspectos, cresce a importância do uso de materiais e equipamentos voltados a não agredir o meio ambiente e que venham a ser, da melhor maneira possível, mais econômicos, viáveis e de fácil aquisição. A busca por alternativas mais sustentáveis e econômicas tem se intensificado, destacando a importância do uso de materiais e equipamentos que minimizem os danos ao meio ambiente. Nesse contexto, as fibras vegetais surgem como uma

solução promissora para a composição de placas evaporativas em sistemas de resfriamento. Com o propósito de atingir tais personalidades, as fibras vegetais para a composição de placas evaporativas se tornam ideais a ser incidida no sistema evaporativo.

A intensão de uso da fibra de coco vegetal como composição do corpo da placa evaporativa do protótipo deste trabalho, se dá devido às características elevadas da fibra quanto a capacidade de resistência a unidade e da alta variação nas condições climáticas.

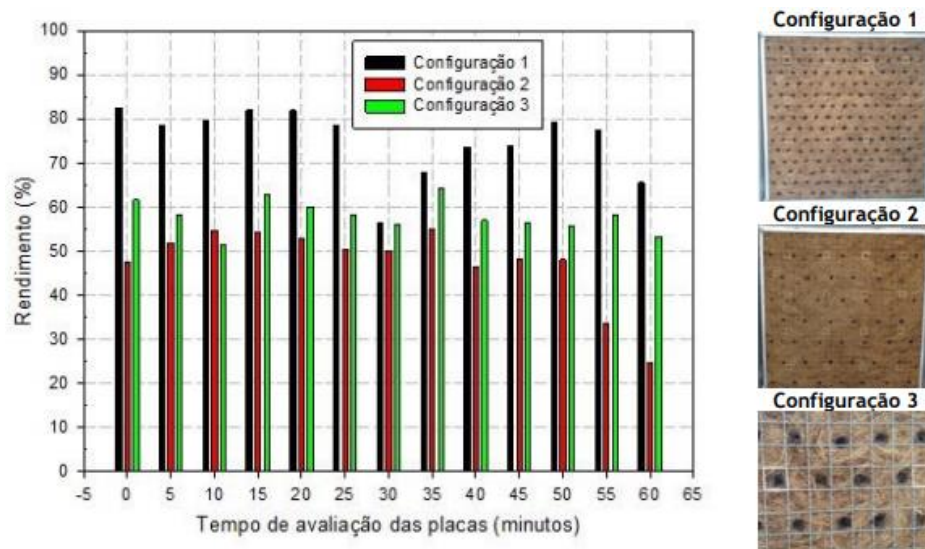
Com isso, o material se adequa de acordo com tais propriedades realizando as trocas de calor desejadas e resistindo de certa forma a umidificação do sistema. As fibras do coco têm basicamente sua composição formada por celulose, que traz a resistência as fibras.

Neiton Silva *et. Al* (2024), construiu túnel de vento reduzido para testes de sistema de resfriamento evaporativo com placas de materiais alternativos disponíveis em diversas regiões do país. Partindo de um princípio de fibras vegetais naturais de coco, de fibra de sisal e de fibra de bucha vegetal como matéria-prima para os painéis de estudo.

Seus estudos foram com três diferentes vazões de ar e três espessuras de placas evaporativas 100 mm, 125 mm e 150 mm. De acordo com o demonstrado em resultados, o estudo obteve um rendimento maior com as placas de maior espessura (150 mm), em torno de 81,37%. O autor ainda menciona outros estudos que obtiveram resultados próximos de 52% e destaca que essa diferenciação se dá pelas configurações de espessura do material e velocidades de entrada do vento.

O autor em seu estudo também alternou as configurações de furação e modelagem das fibras de coco de 150 mm. Com a intenção de analisar a influência das passagens de ar através das molduras. A Figura 18 demonstra as molduras em questão e com um gráfico de rendimento é possível constatar que a configuração de furação 1 como a mais eficiente, cuja qual, usada neste estudo.

**Figura 18** – Perfis de furação de membranas evaporativas



**Fonte:** Machado, 2023

A absorção dos materiais sólidos porosos, com uma grande área de superfície interna por unidade de massa, lembra esponjas rígidas, que vem a ser a intenção do uso da fibra de coco. A água adsorvida é contida por condensação dentro dos capilares formados na própria estrutura material.

A capacidade da fibra de absorver ou atrair umidade depende do tamanho de seus poros e da relação entre a quantidade de água em sua superfície e o conteúdo de umidade do ar. Bem como, depende do comportamento dos filamentos dos seus capilares. Sendo a capacidade de absorção da fibra de extrema importância para o fenômeno evaporativo, influenciando diretamente na eficiência da mesma.

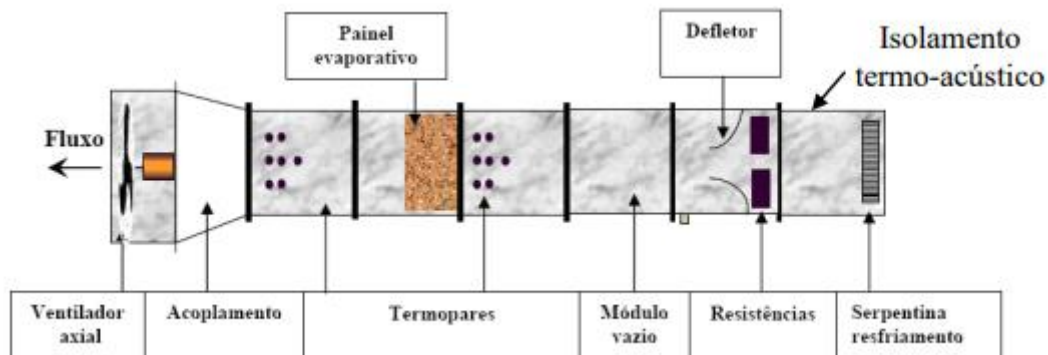
(Oliveira., 2011) fez um estudo onde foi construído um túnel de testes provido de equipamentos e instrumentos específicos para obtenção da eficiência dos painéis. O mesmo usou uma secção de testes dos painéis evaporativos teve dimensões de 0,285m x 0,295 m, que segundo ele permitiu o teste de duas espessuras de painéis: 0,1m e 0,15 m.

De acordo com o autor, foram testadas três condições de vazões de água e de ar através dos painéis. Para caracterizar cada painel, as perdas de cargas, velocidades de ar, vazões de água, absorção de água, gramatura e densidade foram determinadas. O autor construiu e usufruiu de um túnel de vento para exatidão e



consolidação de seus testes. Este, foi construído em módulos de chapa de aço galvanizado e dimensões internas de 0,315 m x 0,315 m, como demonstra a figura 19.

**Figura 19** – Exemplo de túnel de vento 2D



**Fonte:** Oliveira., 2011

Em sua sequência de estudos, Oliveira ET Al. (2012) detalha a importância para cimentar resultados finais. O primeiro módulo o autor denomina como módulo desumidificação de ar. Este módulo possui uma serpentina de resfriamento de um condicionador de ar convencional com capacidade de refrigeração de 18.000 BTU/h. Este módulo tem a finalidade de diminuir a umidade específica do ar de entrada do sistema.

A ação nociva da serpentina de refrigeração nada mais é que retirar a umidade do ar que é incisivo no túnel de vento transformando essa umidade do ar em vapor de água condensado, que posteriormente por sua vez, passa a escoar por tubulação até o reservatório. Aspecto vantajoso para o estudo e resultados lineares. Pois o uso da serpentina diminui a hipótese de instabilidade nos valores de entrada, uma vez que o mesmo pode ser volátil mesmo que de maneira mínima.

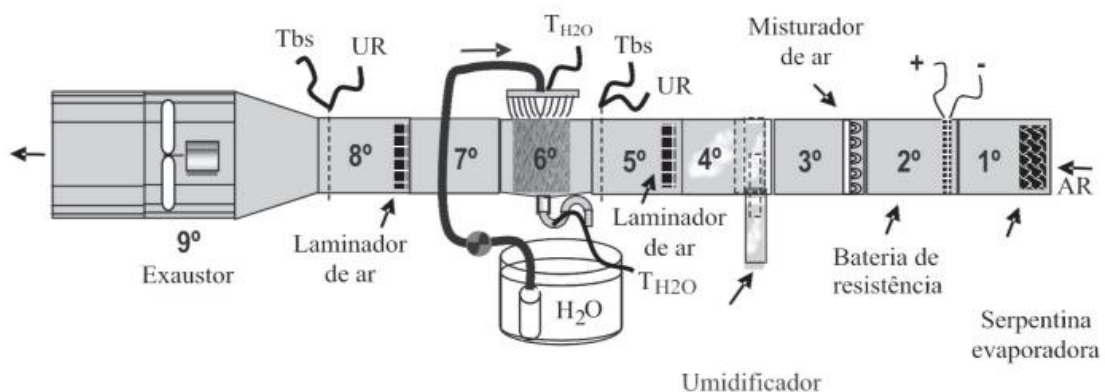
Em um estudo experimental (Oliveira ET Al., 2012), realizou testes de eficiência de diferentes placas evaporativas, com diferentes materiais e placas com diferentes dimensões. No qual salientou painéis de fibra vegetal usando como materiais ecologicamente viáveis a fibra de coco e a luffa (esponja vegetal), ambas sendo

comparadas com um painel evaporativo de papel kraft (material poroso de celulose rígida corrugada usado comercialmente).

Para os devidos fins, o autor, com o intuito de encontrar a eficiência de resfriamento evaporativo dos painéis de contato ar-água em várias condições de entrada e espessura. Foi projetado e construído, um túnel de testes modular em chapa de aço galvanizado, com dimensões internas de 0,315 m x 0,315 m. Este, isolado termicamente e adaptado com equipamentos e acessórios e munido de instrumentos de medição.

O túnel de testes, representado na figura 20, foi construído de forma que fosse possível medir os parâmetros mais importantes no estudo do resfriamento evaporativo, tais como: a umidade relativa e a temperatura de bulbo seco na entrada e saída do painel, a temperatura da água na entrada e saída do painel, a temperatura de bulbo seco do ar ambiente, a velocidade de ar e vazão mássica de água recirculada.

**Figura 20** – Túnel de vento de estudo semelhante

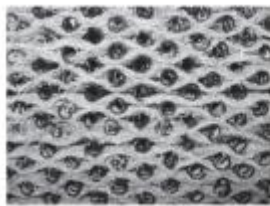


**Fonte:** Oliveira ET Al., 2012

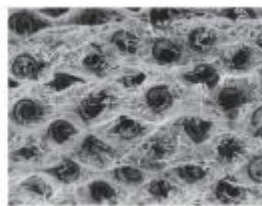
Então, (Oliveira ET Al., 2012) testou vazões de água em painéis de 10 e 15 cm de espessura, detalhados na figura 46, que obteve melhores resultados com placas de 15 cm e uma eficiência de resfriamento de 77,3% (luffa), 79,9% (fibra de coco) e 84,5% (comercial). Resultados referente a mesmas condições para todos os testes, de 89,3 g/s de vazão de água, velocidade do ar entre 2,9m/s e 4,64 m/s e temperatura de 36°C e 24% de umidade relativa do ar.

Nos quais demonstra e enfatiza que afirma uma maior eficiência de resfriamento nos painéis evaporativos de 15 cm. Com uma efetividade e a perspectiva promissora para a as placas evaporativas de fibra vegetal, incluindo a fibra de coco base deste trabalho. Números de (Oliveira ET Al., 2012) com o uso do painel evaporativo constituído pelas fibras de coco e seu rendimento já citado, obteve uma redução de 12,14°C da temperatura ambiente, e 13,01°C para a membrana de papel kraft. Já o painel de luffa com uma redução de 11,87°C, evidenciando um resultado positivo e próximo quanto ao uso de fibra vegetal de coco como material para placa evaporativa.

**Figura 21** – Imagem aproximada das placas testadas



(a) Fibra de Coco



(b) Fibra de Luffa



(c) Papel Kraft

**Fonte:** Oliveira ET Al., 2012

Em sua ideologia, (Oliveira ET Al., 2012) estabeleceu algumas condições para os testes em que os painéis evaporativos foram mergulhados na água por um período mínimo de 12 horas antes de cada teste de eficiência de resfriamento. Assim, o autor garantiu que todos os painéis de contato iniciassem os testes de eficiência de resfriamento com capacidade máxima de água absorvida em toda extensão volumétrica, caso contrário, só com a recirculação de água sobre os painéis seria difícil ser preciso quanto ao tempo suficiente para umidificar todo o painel e iniciar a coleta de dados.

O autor menciona também, que devido à pequena diferença entre elas, a eficiência de resfriamento evaporativo dentro das mesmas condições de entrada praticamente não alterou. Dessa forma, o mesmo optou por fazer os testes com velocidades médias baixas. Além disso, o autor também considerou o valor da

eficiência de resfriamento com uma média de 80 medições dentro de um espaço de tempo correspondente a 20 minutos.

Na sequência, ainda segundo (Oliveira., 2012) o autor salienta que foi possível verificar que o aumento da espessura dos painéis ocasiona menor temperatura de bulbo seco e maior umidade relativa de saída, e conseqüentemente, maior eficiência de resfriamento evaporativo. O mesmo ainda destaca, que enquanto o ar não atingir a condição de saturação de umidade específica, possibilita a evaporação de mais água. Assim, como descreve o próprio autor, com um aumento de área de contato entre o ar e a água e mais espaço de tempo, a temperatura de bulbo seco tende a diminuir e a umidade relativa tende a aumentar.

Melo ET Al (2019) afirma que a agroindústria brasileira vem apresentando inovações na utilização de equipamentos e em suas aplicações de condicionamento térmico e resfriamento evaporativo. Buscando melhores condições psicrométricas e de conforto térmico seja para aviários, gado, suíno ou hortaliças. A eficiência de seu estudo para membrana fibra vegetal de 100mm de espessura atingiu 60,2% com um fluxo de ar de  $0,77 \text{ m.s}^{-1}$

Já Marya ET Al. (2014), para painéis de celulose rígida corrugada obteve uma efetividade de 69,58% para condições de  $T_{BSe}$   $41,2^{\circ}\text{C}$  e 31,1% de UR para o experimento, e para fibras vegetais valores entre 68,15% e 80,99%. Que também a partir de resultados concluiu que as camadas de fibra de coco obtiveram melhor desempenho em taxas de fluxo mássico de ar.

Outra análise a obter resultados com fibras vegetais superior a painéis de celulose foi Djibrilla ET Al. (2021) que em fibra vegetal resultou em uma eficiência entre 68,45% e 92,86%, já para membrana evaporativa de celulose uma faixa de efetividade entre 77,01% e 83,87%. No entanto, com base nos valores observados, no estudo realizado traz que a fibra vegetal usada teve uma eficiência de saturação de 13,06% superior ao material de celulose, ou seja, uma maior umidificação do ar, e conseqüente uma maior capacidade de refrigeração.

Liao ET Al. (2002) construíram um túnel de vento para testes de desempenho de placas evaporativos alternativas, e como material usaram fibra de coco e esponja PVC fina e grossa. E os resultados das esponjas foram de 81,75% a 91,64% para esponjas de PVC, e 89,69% e 92,86% para almofadas de tecido não perorado e fibra de coco na ordem. Nessa hipótese de estudo não houve uma comparação com

material comercial, mas é possível assimilar a este e outros estudos que as fibras vegetais possuem resultados favoráveis ao resfriamento evaporativo.

Kapilan (2023) enfatiza o baixo consumo de energia dos sistemas de resfriamento evaporativo direto se comparado a refrigeração convencional de climatizadores e que o efeito ou fenômeno e ato de resfriamento ocorre de maneira natural, porém de forma forçada através de um ventilador no sistema. O autor traz uma efetividade de 85% para fibra vegetal de coco como material evaporativo. Bem como, outras fibras vegetais como casca de arroz, esponja de caule, palma e aspen (tipo de fibra de madeira com absorção de água).

Alam ET Al. (2017), em um estudo experimental visando identificar materiais alternativos e uma adequação ao sistema de resfriamento evaporativo utilizando diferentes materiais provenientes de áreas indígenas.

Suas placas para testes eram de 12' x 8' x 8' mm, contando com três padrões de espessura, 50, 75 e 100mm, bem como três configurações de velocidades de ar diferente, 3,6 m.s<sup>-1</sup>, 4,6 m.s<sup>-1</sup> e 5,6 m.s<sup>-1</sup>. O experimento para fibra vegetal de coco resultou em 85% de eficiência.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

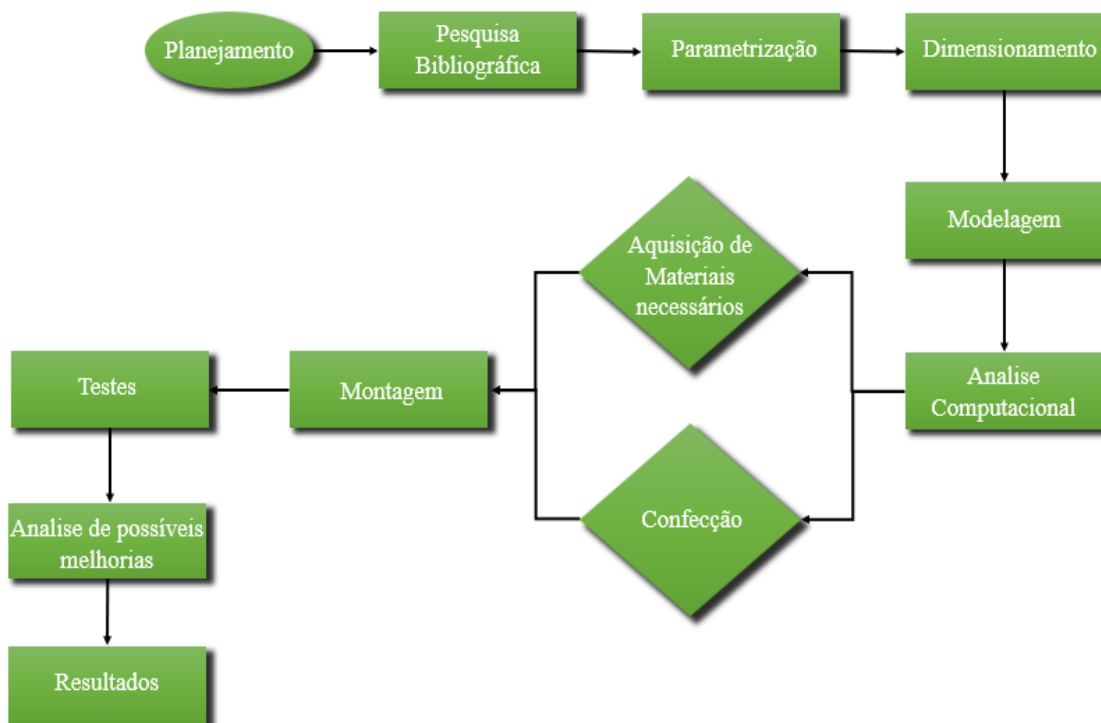
Com o intuito então de analisar a eficiência de saturação da fibra vegetal de coco como material alternativo, e posteriormente comparar estes resultados aos resultados de um material comercial. Para os devidos testes foi dimensionado e construído um túnel de vento em que viesse atender as condições necessárias e exigidas pelo processo.

O sequenciamento de atividades é uma etapa muito importante para o bom andamento seja de um projeto, trabalho, ou atividade a que se está pertinente para a obtenção de pontos críticos possíveis. Tal seguimento, mostrado na Figura 22, foi fundamental para elencar os pontos críticos e principais das atividades em relação ao propósito do túnel de vento com o estudo. Em resumo, o sequenciamento desempenha um papel fundamental para garantir os objetos.

O túnel de vento é uma ferramenta essencial em estudos de aerodinâmica e transferência de calor. No contexto deste estudo, ele serve para simular as condições reais nas quais os materiais serão utilizados, permitindo uma análise precisa e

controlada da eficiência de saturação da fibra de coco. A capacidade de controlar variáveis como velocidade do vento, umidade e temperatura dentro do túnel é crucial para obter resultados confiáveis e comparáveis.

**Figura 22** - Fluxograma de etapas do túnel de vento



**Fonte:** autor, 2024

### 3.1. TÚNEL DE VENTO

#### 3.1.1. MATERIAIS E RECURSOS

O dimensionamento do túnel de vento e os devidos testes realizados em software CAD, foram com o uso do solidworks. Um software muito reconhecido e usado no ramo da engenharia pelos seus recursos e praticidade de designers. Juntamente com sua ferramenta flow simulation, que permite uma análise dinâmica de fluidos e gases de um sistema complexo ou simples.

Com os dimensionamentos já concluídos, tem-se uma visão ampla dos objetivos e funcionalidades referente ao túnel, e parte-se para um esboço de lista de materiais.

A Tabela 3 traz todos os componentes adquiridos para o presente estudo. No corpo do túnel de vento foi constituído por madeira mdf de 12mm de espessura, contando com uma janela de visualização na parte frontal, protegida por uma chapa de poliestireno de 2,5mm. As placas evaporativas para a realização de testes foram ambas conformadas com as dimensões de 350x350 mm e 150 mm de espessura.

**Tabela 3** - Tabela de gastos e de Materiais

<b>Materiais e Equipamentos</b>	<b>Quantidade (und)</b>	<b>Recursos (R\$)</b>
Chapa Madeira mdf	6 m <sup>2</sup>	390,00
Parafuso (medida)	40	15,00
Parafuso (medida)	40	12,00
Dobradiça	2	8,00
Bomba D'água	1	190,00
Fita Led	1	45,00
Motor elgin	1	137,00
Barra UHMW (50cm)	2	30,00
Chapa UHMW	1,5 m <sup>2</sup>	43,00
Mangueira	1	32,00
Abraçadeira	6	9,00
Fibra de coco	6	270,00
Placas de papel Kraft	2	210,00
Anemômetro	1	140,00
Higrômetro	4	135,00

Chapa Poliestireno	2	72,00
Cano PVC	1	18,00
Curva	4	12,00
T-extensão	2	6,00
Canudos	3	30,00
Cola	1	8,00
Silicone	1	24,00
Potenciômetro	1	110,00
<b>Total</b>	<b>-</b>	<b>2018,00</b>

Fonte: autor 2024

### 3.1.1.1. Bomba d'água

As bombas d'água submersas são dispositivos ímpares, projetadas para operar submersas ao fluido e com boa capacidade de empurrar o fluido para cima. Além disso, as bombas submersas tendem a ser mais silenciosas, mantendo eficiência em termos de energia.

Por conta de tais características, tornou-se necessária a aquisição de uma bomba submersa análoga com a Figura 23, pela praticidade de espaço e fixação. Uma bomba presa ao lado externo do reservatório elevaria riscos e vazamento indesejado, uma vez que o material do túnel possui enorme fragilidade com umidades.

Características da bomba:

- Vazão: 1000 l/h
- Potência: 15W
- Elevação máxima: 1,6 m



**Figura 23** - Bomba d'água submersa



**Fonte:** <bomba de agua submersa fundo branco - Pesquisar (bing.com)>

### **3.1.1.2. Motor e ventilador**

O motor usado é um de marca Elgin, representado na Figura 24, muito usado em refrigeradores ou aplicações residenciais. É compacto, leve e robusto e de fácil instalação para a finalidade desejada.

Características do ventilador:

- Potência: 59 W
- Frequência: 60 Hz
- RPM: 1550

**Figura 24** - Moto-ventilador Elgin



**Fonte:** <motor elgin ventilador fundo branco - Pesquisar Imagens (bing.com)>

### 3.1.1.3. Placas evaporativas

A fibra de coco, descrita na Figura 25, vem a ser o material alternativo foco deste trabalho. A mesma é vendida em rolos como matéria-prima de diversas finalidades como artesanato, compostagem, isolamento acústico e preenchimento.

**Figura 25** - Fibra de coco



**Fonte:** <Fibra de coco vegetal fundo branco - Pesquisar (bing.com)>

A placa evaporativa de papel Kraft (Figura 26), é composta por um material poroso de celulose rígida corrugada. Seus filamentos são primordiais para facilitar o escoamento da água no interior da placa, de mesmo modo auxiliando na umidificação uniforme.

Essa placa comercial de resfriadores evaporativos, em sua grande maioria, é completamente modificada pelo sistema antes de um início de ciclo, ou seja, ao ligar-se o resfriador ele irá por período de tempo, acionará apenas a bomba com essa finalidade.

Após isso, ocorre o acionamento do ventilador principal dando início a refrigeração. O intuito do uso da placa de papel Kraft é de averiguação e comparação dos resultados obtidos com a fibra vegetal de coco com um material comercial.

**Figura 26** - Painel evaporativa comercial



**Fonte:** <Placas Evaporativas marrom fundo branco - Pesquisar Imagens (bing.com)>

#### **3.1.1.4. Anemômetro**

Caracterizado na Figura 27, e também muito usado por estudiosos da meteorologia, o anemômetro usado se tornou de suma importância na coleta de dados no interior da estrutura, mais precisamente no corpo de testes do túnel.

De mesma finalidade, o tubo de pitot seria claramente uma opção mais cognitiva se tratando de custos. Porém, como faz parte do projeto e da funcionalidade do túnel, a necessidade de utilização de um reservatório de água (localizado na parte inferior do túnel, feito de UHMW), tornou-se inviável.

**Figura 27** - Anemômetro



**Fonte:** <higrometro fundo branco - Pesquisar (bing.com)>

### 3.1.1.5. Higrômetro

Os higrômetros adquiridos para o trabalho possuem um fio de extensão com seu medidor para melhor captação de temperatura e umidade relativa do ar. Na Figura 28 está demonstrado o modelo de higrômetro usado. Estes aparelhos são usados para diversas finalidades onde as variáveis de controle de temperatura e umidade relativa.

**Figura 28** - Higrômetro



**Fonte:** <higrometro fundo branco - Pesquisar (bing.com)>

A Tabela 04 identifica serviços de terceiros para a construção do túnel. Foram necessários cortes nas chapas de UHMW para construção do reservatório de água e um recorte detalhado para encaixe das partes em um dos estabilizadores internos do túnel. Bem como, após o dimensionamento desejado dos componentes e peças em 2D do túnel. Para melhor exatidão e conformidade das peças, os recortes foram feitos em uma marcenaria de móveis sob medida.

**Tabela 4** - Serviços de terceiros

<b>Gastos com MDO (terceiros)</b>	<b>Valor (R\$)</b>
Corte do UHMW (estabilizador)	35,00
Marcenaria	170,00
<b>Total</b>	<b>205,00</b>

**Fonte:** autor 2024

### 3.1.2. Considerações

Um material a ser usado como membrana evaporativa tende a ser poroso. A colmeia de uso comercial por exemplo, com diferentes ângulos de inclinação e possui uma disposição que garante uma grande área de contato ar-água, conforme mostrado na figura tal aumentando a troca de calor entre os fluidos. É possível assimilar também que um resfriador possui um ventilador que gera um fluxo de ar do ambiente externo para ambiente a ser refrigerado, proporcionando uma distribuição homogênea do ar em toda a área do painel, evitando a formação de áreas preferenciais, que diminuiria a eficiência do sistema.

Na passagem pelo painel o ar cede energia a água, e ganha umidade devido à troca de calor e massa com a superfície molhada. Assim, para dado efeito de resfriamento, menos água é consumida e mais umidade o ar ganha. Entretanto, na prática, a água geralmente ganha calor sensível externo através da reposição de água evaporada do atrito com bomba e com tubulação.

A água é coletada pela ação da gravidade no reservatório do resfriador, sendo circulada para os aspersores pela ação de uma bomba de potência conhecida. Logo, é possível a associação das semelhanças funcionais e características do fenômeno natural existente, do túnel de vento para testes e de uma torre de resfriamento.

Então, passa-se a atribuir ternas de uma torre de resfriamento evaporativo. Com isso, podemos estabelecer uma relação ao aplicar os princípios observados ao comportamento e observar e prever seu desempenho. Podendo então adentrar em situações de eficiência, otimizar, recursos e até mesmo economia.

Por fim, é importante no estudo de escoamento de fluidos, a conceituação básica no regime de escoamento. Nas simulações realizadas foram considerados os regimes laminar e turbulento. Pode-se afirmar, que o túnel está sujeito ao regime laminar por definição teórica da velocidade na seção de testes do túnel por se tratar de um túnel em escala reduzida e considerando um ventilador de pequeno porte cuja suas velocidades após a montagem e testes foram devidamente medidas com anemômetro.

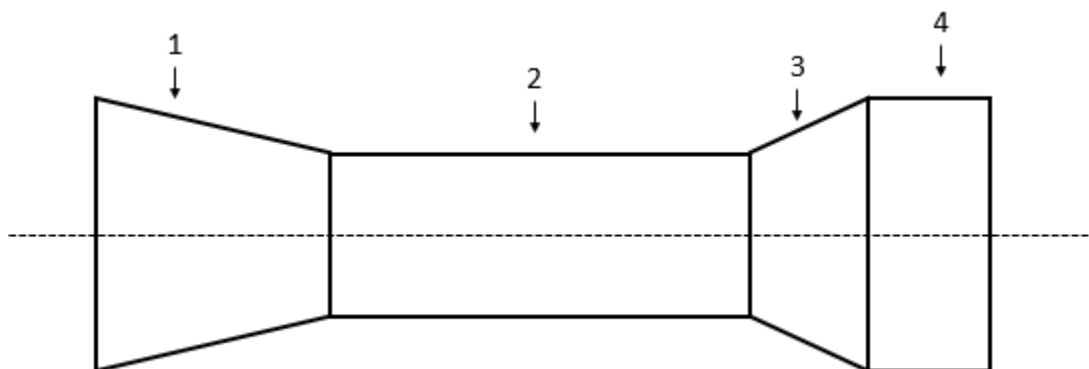
No entanto, mesmo com a teoria indicando um regime laminar de escoamento devido às condições do túnel, em simulações de software podem ocorrer variações e pequenos regimes turbulentos devido a alguns vetores de direção de velocidade. Isso faz com que o software reconheça um aspecto de turbulência ou vórtice. Seja por

pequenas irregularidades ou transições inesperadas, que podem ou não influenciar nos resultados.

### 3.1.3. Conjunto e componentes

O túnel é constituído por quatro seções principais, o difusor de entrada e saída do ar, um corpo central para realização de testes, e um corpo para fixação da ventilação forçada. Sob o mesmo ponto de vista das partes principais, pode-se dizer que um túnel de vento possui três partes principais. Muitos modelos e dimensionamentos não atribuem um corpo para fixação de um ventilador, aspecto a ser levado em consideração na hora de modelagem. Para isso, foi criado um esboço, identificado na Figura 29 para visualização inicial.

**Figura 29** - Esboço do túnel de vento

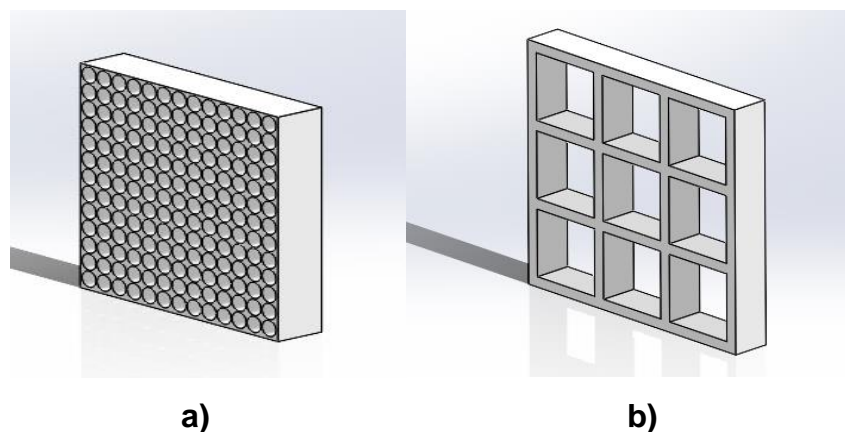


**Fonte:** autor 2024

Partindo para outra perspectiva, a função dos estabilizadores de ar, principalmente o de entrada de fluxo de ar que recebe diretamente o ar do ventilador, é manter um fluxo laminar do ar dentro do túnel. De forma que seja proporcional e suficiente para que isso venha a desacelerar e amortecer o ar, evitando turbulências indesejáveis e consequentemente favoráveis a resultados e obtenção de dados. Ambos, representados na Figura 30, sendo A estabilizador de entrada e B de saída.

O estabilizador de entrada tem uma maior influência na dinamicidade e fluidez do ar no interior do túnel. Por sua vez, ele recebe a ventilação forçada em suas paredes desobstruídas, e a intenção é que o ar ao transpassá-lo toma caminho uniforme em direção à placa evaporativa. Neste trabalho, as passagens do ar foram feitas de canudos de plástico, passado por serviços de corte, colagem e montagem.

**Figura 30** - Estabilizadores

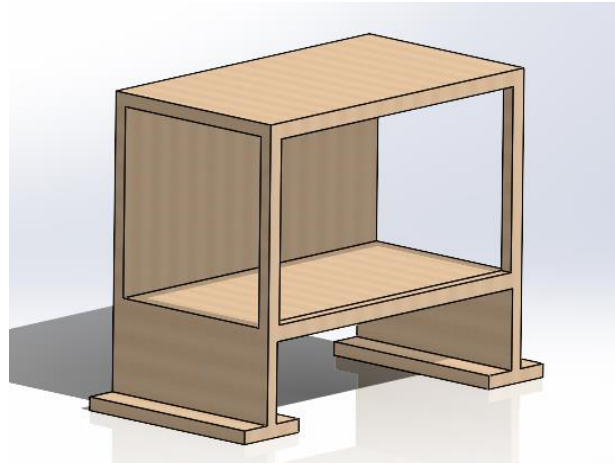


**Fonte:** autor 2024

Por sua vez o estabilizador de saída, possui como função apenas manter esse dinamismo na saída do túnel. Tal qual, feito de chapas finas de UHMW, passando por serviços de corte, encaixe e fixação. Com isso tem-se então, a devida observação e atenção para este corpo de testes, cuja representatividade ocorre na Figura 31.

Para um túnel de vento didático a possibilidade de instalações de equipamentos de medição ou acessórios posteriores ao estudo, ou durante o mesmo, devem ser levadas em consideração na hora de escolha do material, dimensionamento, fabricação e montagem. Junto a estas possibilidades, o ideal é que a seção de testes conte com uma seção de material transparente como acrílico ou vidro, para melhor visualização da funcionalidade e de fenômenos que ocorrem no centro. Seu volume interno é de 0,0857 m<sup>3</sup>.

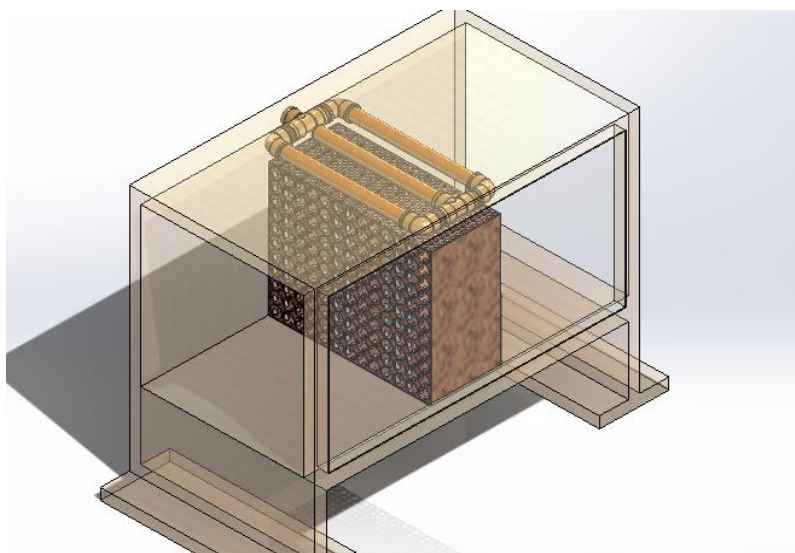
**Figura 31** - Corpo de testes



**Fonte:** autor 2024

Sob o mesmo domínio de assunto, em seu estado físico, o corpo de testes deve contar com vedação e impermeabilização ideal, tendo em vista a circulação de água no sistema. Por sua vez, o mesmo corpo consta tubulação para circulação de água em seu meio, podendo ser observada na Figura 32, a tubulação centralizada em uma posição superior a placa evaporativa a ser testada, de modo que o painel evaporativo seja umidificado de forma homogênea.

**Figura 32** - Vista interna do Corpo de testes

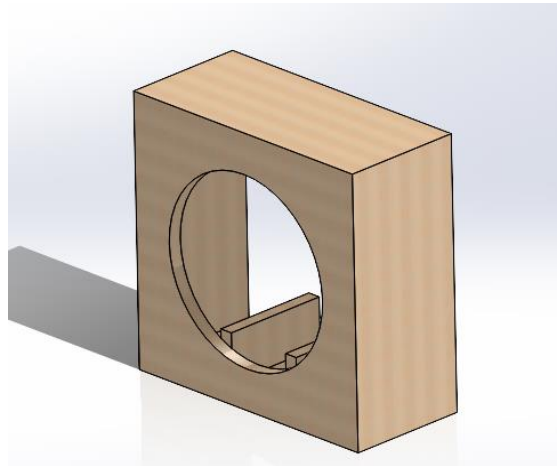


**Fonte:** autor 2024



Não menos importante, o corpo de fixação do ventilador, visual na Figura 33, possui abertura ideal para o mesmo, bem como uma abertura para sucção de ar desse ventilador que empurra o ar para o difusor e para o estabilizador.

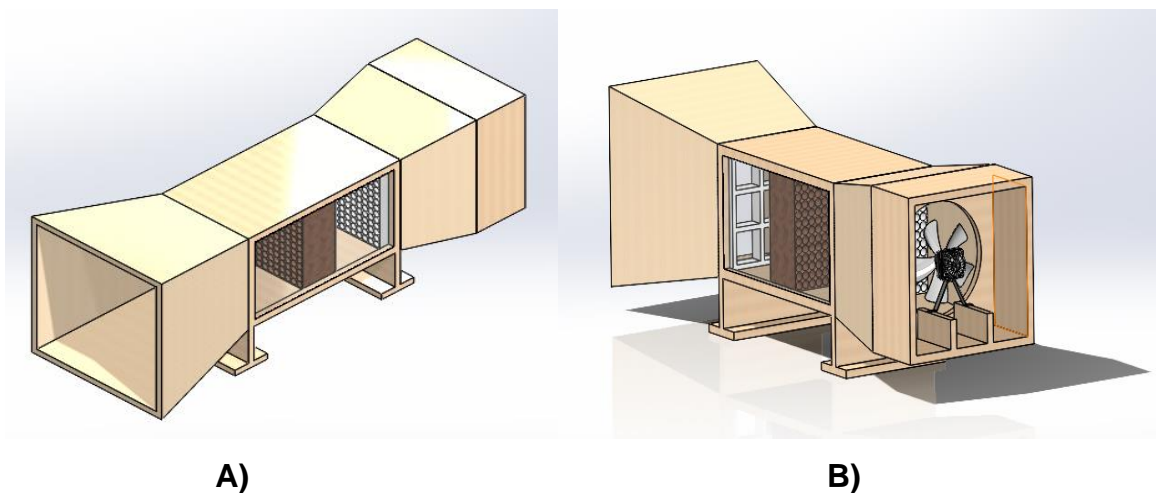
**Figura 33** - Suporte do ventilador



**Fonte:** autor 2024

O dimensionamento voltado a prototipagem do túnel foi desde início voltada para favorecer a montagem, manuseio e aquisição de materiais sem perder o foco didático e colapsar resultados. O túnel por sua vez com todos os componentes em sua montagem em software pode ser observado na Figura 34 em um ângulo A e um ângulo B para facilitar melhor absorção de detalhes na imagem.

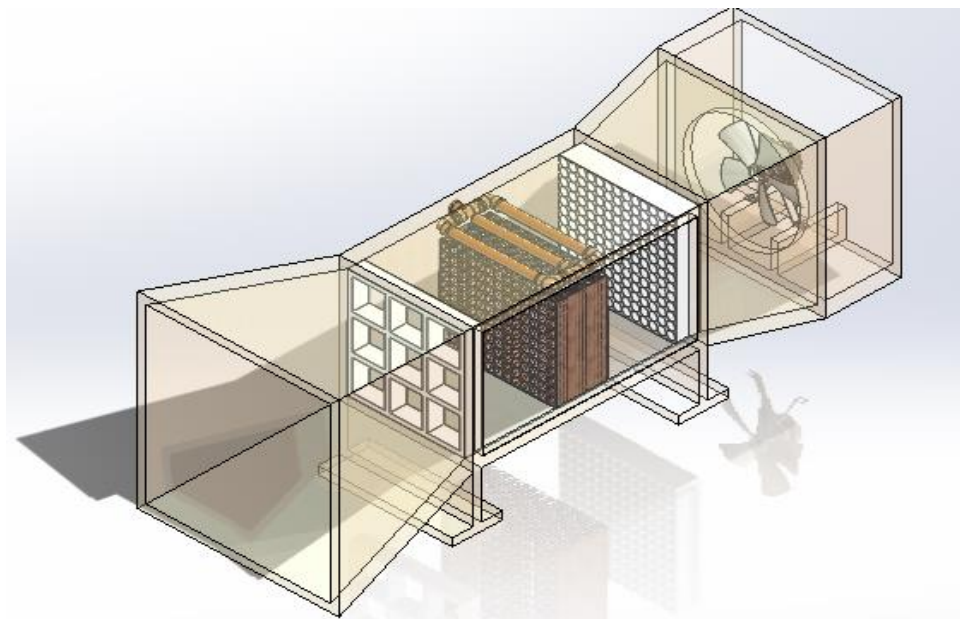
**Figura 34** - Túnel de vento



**Fonte:** autor 2024

A sua construção, partindo do detalhamento feito em software busca que o comportamento seja de acordo com esperado uma vez que o túnel possui suas finalidades e características específicas. Permitindo que o seu comportamento possa ser acompanhado, mantendo seu mecanismo de abertura superior para fácil acesso funcionando como tampa. Com tudo, na Figura 35 é possível ter uma visão ainda maior do interior do túnel e seus componentes.

**Figura 35** - Vista interna do Túnel de vento



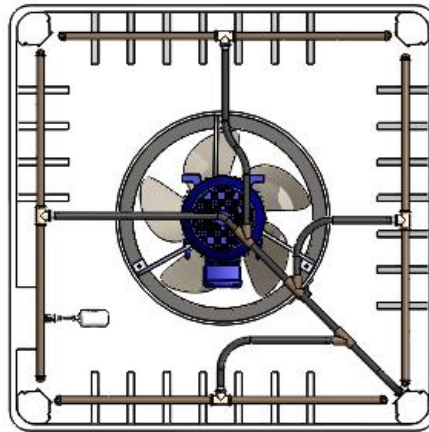
**Fonte:** autor 2024

### **3.1.4. Desenvolvimento e projeto**

#### **3.1.4.1. Prototipagem em andamento**

Se torna relevante arquitetar um sistema adequado e funcional de equipamento ou protótipo futuro de resfriamento evaporativo. O dimensionamento se encontra em fase inicial e ainda não conclusa, portanto, cresce de importância a continuidade nos estudos e posteriormente uma possível construção de um protótipo. Na Figura 36 retrata a distribuição de água do sistema, onde a água passa por mangueiras e canos até umidificar por completo as fibras de coco.

**Figura 36** – Distribuição de água do sistema



**Fonte:** Autor 2024

A Figura 37 já traz um breve aspecto da parte externa do sistema, onde suas colunas, partes laterais e tampa superior se encaixam para uma melhor desmontagem e limpeza do sistema.

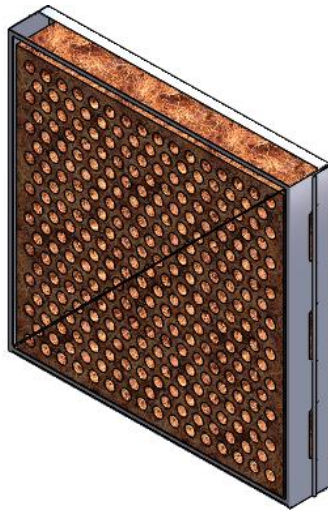
**Figura 37** – Corrente de Ar no Sistema



**Fonte:** Autor 2024

A fibra de coco deve ser conformada como na Figura 38, de modo que os sulcos criados facilitem uma vazão de ar apropriada para o fenômeno e para o sistema. Por conta deste fator, a modelagem correta das fibras terá influência direta no fluxo mássico do ar e na abordagem de resultados.

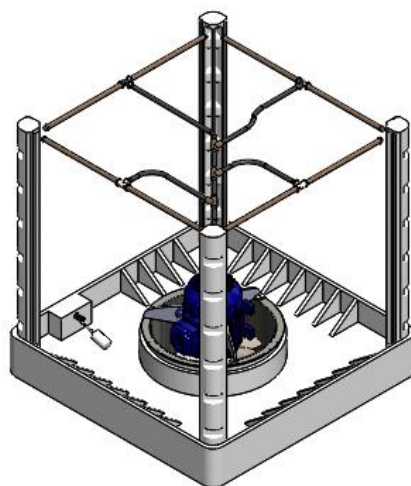
**Figura 38** – Placa evaporativa de fibra de coco



**Fonte:** Autor 2024

Consolidando um possível uso de água proveniente de reservatório de água pluvial na tentativa de um sistema ainda mais econômico, torna-se preciso o dimensionamento correto contando com o uso de uma boia para controle da admissão de água. O fundo do condicionador evaporativo funciona como reservatório de água do sistema, como pode ser observado na imagem da estrutura aberta na Figura 39.

**Figura 39** – Interior do Sistema



**Fonte:** Autor 2024

### 3.1.4.2. Montagem e fabricação do túnel

A montagem transcorreu de acordo com o esperado no que se diz respeito ao encaixe e cortes da madeira. Posterior a isso facilitando a montagem do conjunto como um todo. Com a montagem e componentes foi possível ter uma percepção e entendimento maior em relação às funcionalidades e características de um túnel de vento.

Inicialmente com as partes cortadas em seus tamanhos ideais, a montagem foi realizada individualmente conforme as partes, e posterior a isso a montagem e fixação do conjunto como um todo.

O túnel de vento montado e em funcionamento pode ser observado na Figura 40. Vale ressaltar, que com objetivo de melhor obtenção de resultados, sem influência e troca térmica com o meio externo, seja por ventilação, radiação ou até mesmo convecção, no difusor de saída do túnel foi utilizado uma caixa de isopor de 1,2x1x1 metros com uma massa de ar de 1,530kg.

**Figura 40** - Túnel de vento montado



**Fonte:** autor 2024

Com o propósito de dar ênfase ao interior do túnel de vento, como também ampliar a visibilidade deste interior e acompanhamento da funcionalidade das partes independentes, a instalação de uma fita led ao término do processo. Onde é possível observar a Figura 41, lado A e lado B.

**Figura 41** - Instalação de fita led



**Fonte:** autor 2024

Tendo em vista a situação abordada de um sistema de circulação de água no interior do túnel. É correto afirmar que a fibra de coco por ser um material vegetal tende, ao ser umidificado por completo, fica mais flácido.

Para evitar todo e qualquer tipo de situação indesejada, foi possível preparar uma moldura, demonstrada na Figura 42, centralizada para e de espessura desejada. Isso fará com que a fibra não se desloque durante o processo, e fará com que a fibra mantenha o seu posicionamento em relação ao sistema de circulação de água.

**Figura 42** - Moldura centralizada



**Fonte:** autor 2024

## **4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS**

### **4.1. CONTRUÇÃO**

Para uma analogia e entendimento completo do fenômeno, os princípios básicos da psicometria permitem compreender o comportamento do ar e sua saturação e umidificação.

Suas unidades de controle fazem com que o processo psicrométrico existente seja conhecido e modificado se necessário, sendo possível determinar parâmetros essenciais para garantir o conforto térmico e as condições existentes. Uma vez que a objetividade em obter êxito com a fibra vegetal como matéria-prima de confecção do painel evaporativo, tona-se pertinente a aplicação de testes desde sistema.

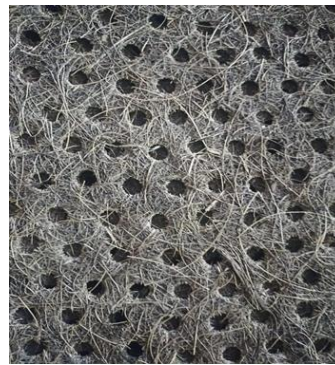
No presente trabalho o túnel de vento é voltado para fins acadêmicos mantendo os aspectos e características principais para a extração de dados necessária. As placas evaporativas deste estudo seguiram de acordo com estudos de melhor efetividade do autor de 150 mm de espessura e 350 mm x 350 mm, e o túnel de vento não conta com uma serpentina de entrada.

Os painéis evaporativos antes de inicialização de testes foram mergulhados na água por um período mínimo de 2 horas. A fibra de coco por ser um material conservado em forma de rolos de 3 mm de espessura, foi recordado com as dimensões desejadas e perfilado até desejar a espessura total desejada. A Figura 43 traz uma visualização aproximada das membranas de coco (A) e de papel Kraft (B).

**Figura 43** – Vista aproximada dos painéis evaporativos usados



**A)**



**B)**

**Fonte:** autor 2024

Na montagem e execução de testes foi possível constatar um leve amolecimento da fibra de coco ao ficar totalmente umedecida. A assertividade do suporte para mantê-la posicionada foi de suma importância para o andamento do processo e dos resultados obtidos. Tal situação, pode ser evidenciada na figura 44. Pode-se afirmar que, isso ocorre por conta das variadas camadas finas do material de aproximadamente 3mm de espessura. O material foi cortado de acordo com as medidas internas do túnel, e posteriormente furadas individualmente.



**Figura 44** - Vista da flambagem fibra de coco

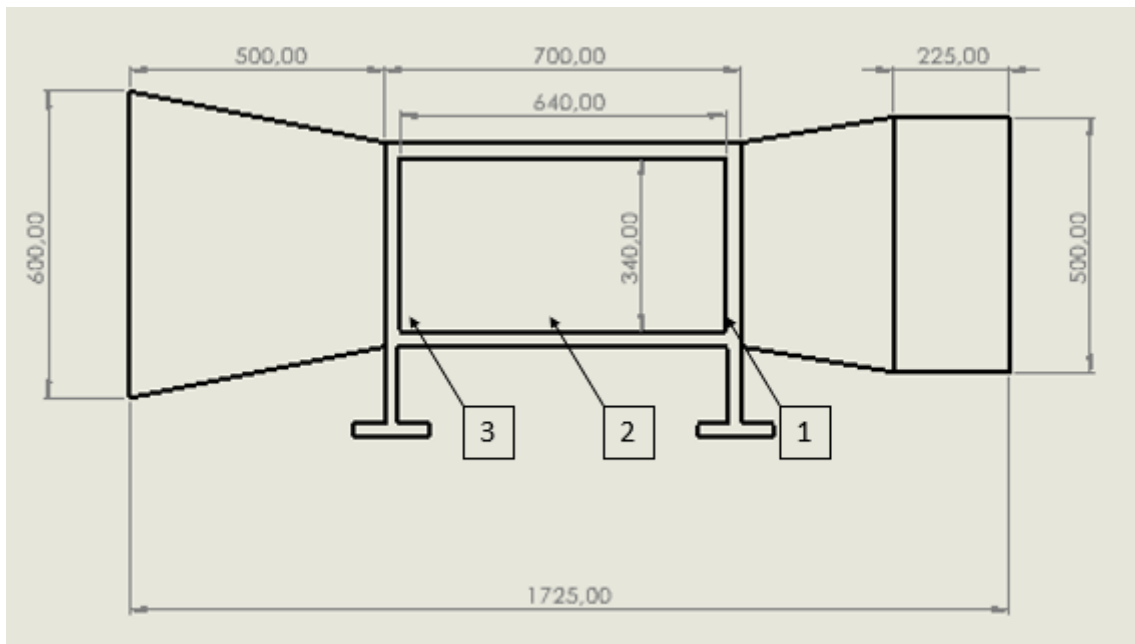


**Fonte:** autor 2024

De acordo com (Oliveira ET AL., 2012), a velocidade ideal para este estudo de resfriamento evaporativo com uso da fibra vegetal de coco fica entre 2,9m/s e 4,64 m/s. Seu complexo e bem estruturado estudo, contou com desenvolvimento e projeto de túnel de vento em que permitiu testes como diferentes materiais para membrana evaporativa, diferentes velocidades de fluxo de ar e diferentes espessuras.

A Figura 45 retrata as principais dimensões em milímetros do túnel de vento montado. Também é possível observar marcações de um a três representando as velocidades internas do fluxo de ar forçado proposto pelo ventilador. Essas velocidades  $v_1$ ,  $v_2$ , e  $v_3$ , correspondem a 3,6 m/s, 3,1 m/s e 2,7 m/s respectivamente. Sendo  $v_1$  na entrada da seção de testes,  $v_2$  centralizado, e  $v_3$  na saída da seção.

**Figura 45** - Cotas e posicionamento das velocidades internas



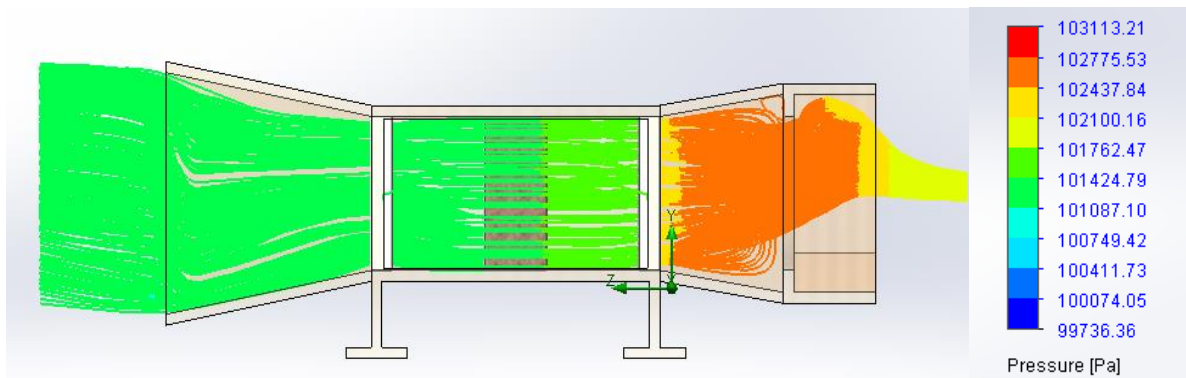
Fonte: autor 2024

## 4.2. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

No estudo de escoamento de fluidos, vários aspectos devem ser levados em consideração. Aspectos como definição correta de material, velocidade do vento, especificar umidades e temperaturas, entre outros fatores. Nas simulações computacionais, foram considerados os regimes de escoamento laminar e turbulento. O regime laminar foi constatado através de análise gráfica de modo que se tem a velocidade do ar dentro dos parâmetros aceitáveis.

Uma vez que esta velocidade é elevada a fins de provar situações adversas, é possível observar na Figura 46 que a pressão interna também possui certa variação quando a velocidade de entrada do vento atinge níveis superiores a 20 m/s. Com esse valor elevado de velocidade de entrada é possível observar que o fluxo passa pelo estabilizador e de certa forma mantendo sua funcionalidade ao estabilizar o fluxo no interior do sistema e conseqüentemente estabilizando a pressão interna do túnel. Em tais condições, teríamos uma variação de pressão de em torno de 1,68 Kpa ou 0,0165 atm.

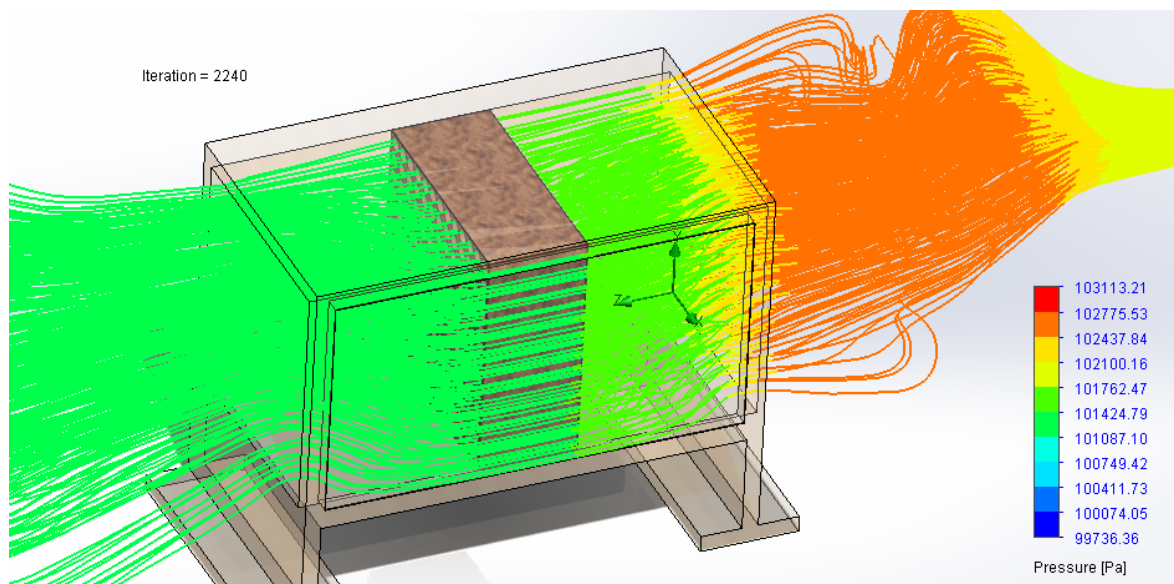
**Figura 46** - Variação de pressão com velocidade de entrada de 20 m/s



Fonte: autor 2024

A Figura 47, pertence a mesma análise demonstrada anteriormente, porém em ângulo diferente e com componentes extraídos, permanecendo o corpo de testes e a placa evaporativa, para melhor visualização de detalhes internos. Onde também é possível observar o comportamento da pressão no interior do sistema.

**Figura 47** - Vista interna da análise de pressão no sistema

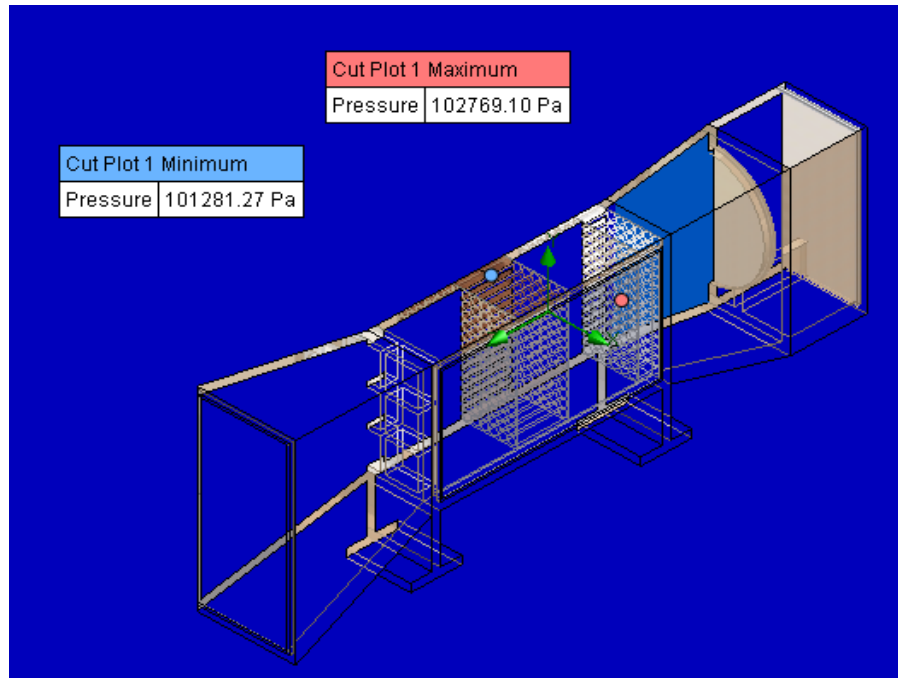


Fonte: autor 2024

Com seguimento às pressões internas, na Figura 48 têm-se os pontos de pressões máximas e mínimas do sistema em uma vista em corte. Com a análise do

software foi possível encontrar as extremidades de pressão. Sendo o ápice igual a 102769,10 Pa (1,014 atm) e ponto mínimo de 101281,27 Pa (0,999 atm). Ocasionalmente em uma perda de pressão de 1487,83 Pa (0,0146 atm), equivalente a 2,36%.

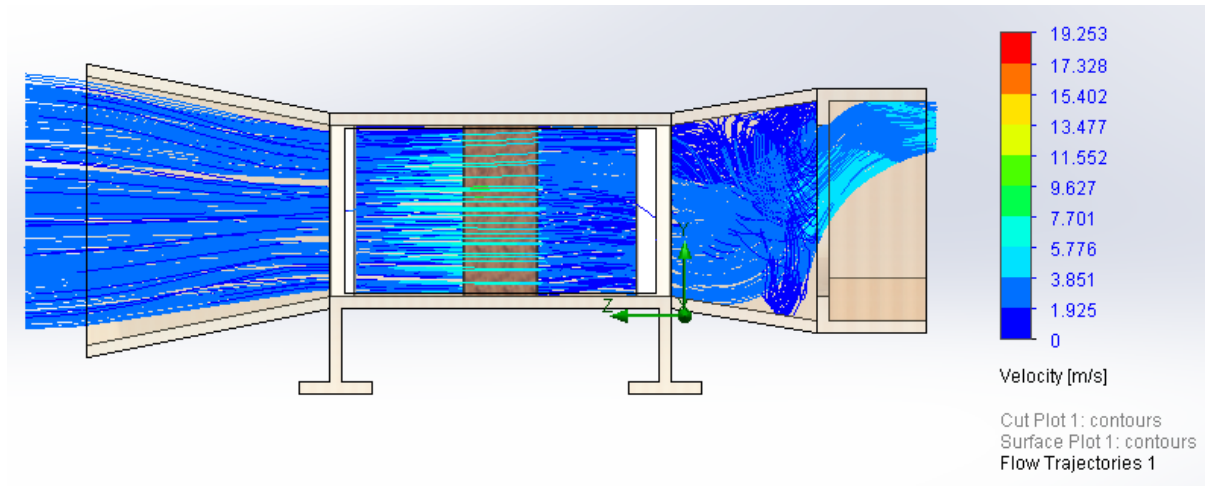
**Figura 48** - Vista em corte do interno da análise de pressão no sistema



**Fonte:** autor 2024

A velocidade do fluxo mássico de ar interno de acordo com análise gráfica, foram encontradas como alguns pontos mínimos de velocidade igual a zero, onde as correntes de ar entram em vórtice ou refluxo ou até mesmo um princípio de regime turbulento, que se corrige com a continuidade do fluxo. É possível assimilar de acordo com a Figura 49 pontos mais elevados de velocidade entre 3,7 m/s e 5,77 m/s. No entanto, de mesmo modo, a análise através do flow simulation nos traz um ápice permitido no interior do túnel de 19,253 m/s. Representando a velocidade máxima permitida ao sistema.

Figura 49 - Fluxo de velocidade do ar



Fonte: autor 2024

### 4.3. VALIDAÇÃO DE QUEDA DE PRESSÃO

A Equação 1, equação geral dos gases, faz com que seja possível encontrar o valor de queda de pressão do ar úmido no interior do sistema. Para isso, deve-se admitir a constante dos gases ideais no valor de  $8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ .

$$PV = nRT \quad (1)$$

Em qual as variáveis descrevem:

- $P$  é a pressão do gás em Pascal;
- $V$  é o volume ocupado pelo gás em  $\text{m}^3$ ;
- $n$  é a quantidade de substância do gás em mols;
- $R$  é a constante geral dos gases ideais igual a  $8,314 \text{ J}/\text{mol} \cdot \text{K}$ ;
- $T$  é a temperatura em Kelvin;

Bem como, é necessário encontrar o número de mols existe através da Equação 2 que nada mais é que uma adaptação e reorganização da Equação 1.

$$n = \frac{PV}{RT} \quad (2)$$

Para a resolução da equação temos:

$$n = \frac{PV}{RT}$$

$$n = \frac{985hPa \cdot 1,2 m^3}{8,314 \frac{J}{mol} \cdot K \cdot 301,2K}$$

$$n = 47,2 mols$$

Com isso, para encontrar a pressão pós-resfriamento temos o desenvolvimento da equação 1.

$$PV = nRT$$

$$P \cdot 1,2m^3 = 47,2 mols \cdot 8,314 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot 293,05 K$$

$$P = 95703,93 Pa$$

A queda de pressão pode ser determinada através da resolução da equação 3, portanto:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (3)$$

Resultando em uma queda de pressão igual a:

$$\Delta P = 98500 Pa - 95703,93 Pa$$

$$\Delta P = 2796,06 Pa$$

A perda de pressão do túnel de vento encontrada em situação real se deu maior que a variação encontrada no interior do túnel através de software. Isso ocorre por conta das considerações feitas da caixa térmica no final do túnel de vento que não se torna possível pela ferramenta do Solidworks.

O software reconhece apenas um dimensionamento de volume para o estudo, aberto ou fechado. Entretanto, se avaliamos a queda de pressão encontrada em porcentagem, em ambos são aproximadas. Em software uma queda de 2,36% e a queda de pressão de 2796,06 Pa encontrada, corresponde a 2,84%.

Na sequência, com a equação 2, para determinar a queda de pressão existente com o uso do papel Kraft. E de mesmo modo, é necessário encontrar o número de mols existe através da equação 8 que nada mais é que uma adaptação da equação 1, para as resoluções temos:

$$n = \frac{PV}{RT}$$

$$n = \frac{980,4hPa \cdot 1,2 m^3}{8,314 \frac{J}{mol} \cdot K \cdot 300,65K}$$

$$n = 47,066 mols$$

Com isso, para encontrar a pressão pós resfriamento temos:

$$PV = nRT$$

$$P \cdot 1,2m^3 = 47,066 mols \cdot 8,314 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot 292,65 K$$

$$P = 95431,25 Pa$$

Prosseguindo, foi encontrado a queda de pressão para o uso do material comercial com a equação 3.

$$\Delta P = 98040 Pa - 95431,25 Pa$$

$$\Delta P = 2608,74 Pa$$

A perda de pressão do túnel de vento encontrada em situação real nesta situação se deu uma porcentagem igual à encontrada no interior do túnel através de software, um valor de 2,66%. Claro que, as considerações feitas da caixa térmica já mencionadas ainda existem, porém, demonstra a proximidade dos estudos.

#### 4.4. ANÁLISE PSICROMÉTRICA

##### 4.4.1. FIBRA DE COCO

Como comprovação de resultados obtidos através da fibra de coco como painel evaporativo. A tabela 05, posteriormente comprovada pelo Anexo VI, trazem leituras de A à F que correspondem a horários de leitura de 15:00 horas a 20:00 horas respectivamente para um período de leitura de pressão igual a 985 hPa. que foram encontrados de temperatura e umidade relativa do ar. Os higrômetros superiores posicionados na parte de entrada do túnel e inferiores na saída. É possível observar variações, porém uma média de aproximadamente 7,7°C de resfriamento, variações entre 28% e 37% de elevação da umidade relativa do ar. Tornando os resultados favoráveis e condizentes com o esperado.

Na Tabela 05, dados referentes ao Anexo VI e através da Equação 4 e da Equação 5, tem-se através da membrana evaporativa testada a diferença e aumento de umidade do ar, e queda de temperatura respectivamente.

$$\Delta UR = UR_e - UR_s \quad (4)$$

$$\Delta TBS = TBS_e - TBS_s \quad (5)$$



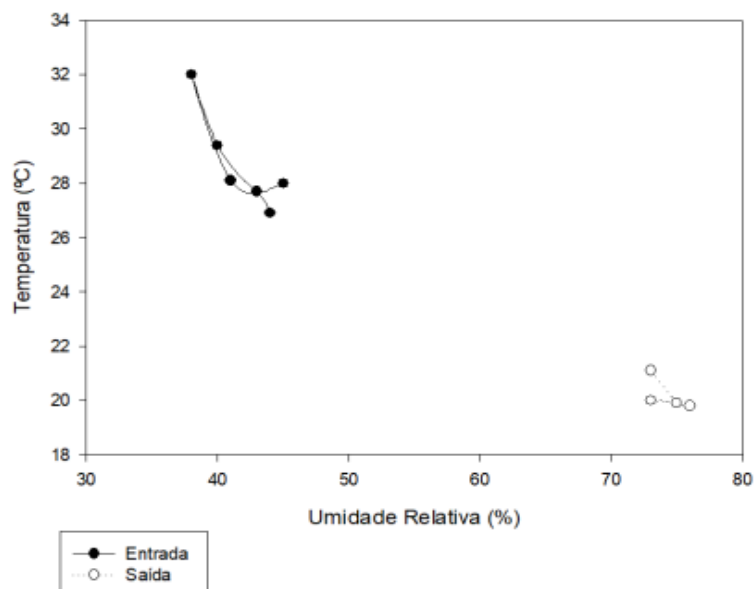
**Tabela 5 –** Dados da fibra de coco

Leitura	Umidade Relativa (%)			Temperatura (°C)		
	Entrada	Saída	Dif	Entrada	Saída	Dif
A -	44	76	32	26,9	19,8	7,1
B -	43	75	32	27,7	19,9	7,2
C -	40	73	33	29,4	20	9,4
D -	38	75	37	32	19,9	12,1
E -	41	75	34	28,1	19,9	8,2
F -	45	73	28	28	21,1	6,9

Fonte: autor 2024

Através do gráfico da Figura 50 é possível se ter o entendimento da distinção das leituras de entrada e saída, em relação à umidade relativa e temperatura. É possível também observar a concentração dos resultados de saída, tanto de temperatura quanto porcentagem de umidade relativa do ar. Dessa forma entende-se que uma vez que o sistema atinge a sua efetividade de acordo com as características do material e outros fatores, a temperatura e umidificação do ar se tornam próximo de constantes. É notório no gráfico, de acordo com dados de entrada, as características e diferenciação entre dados de entrada e saída.

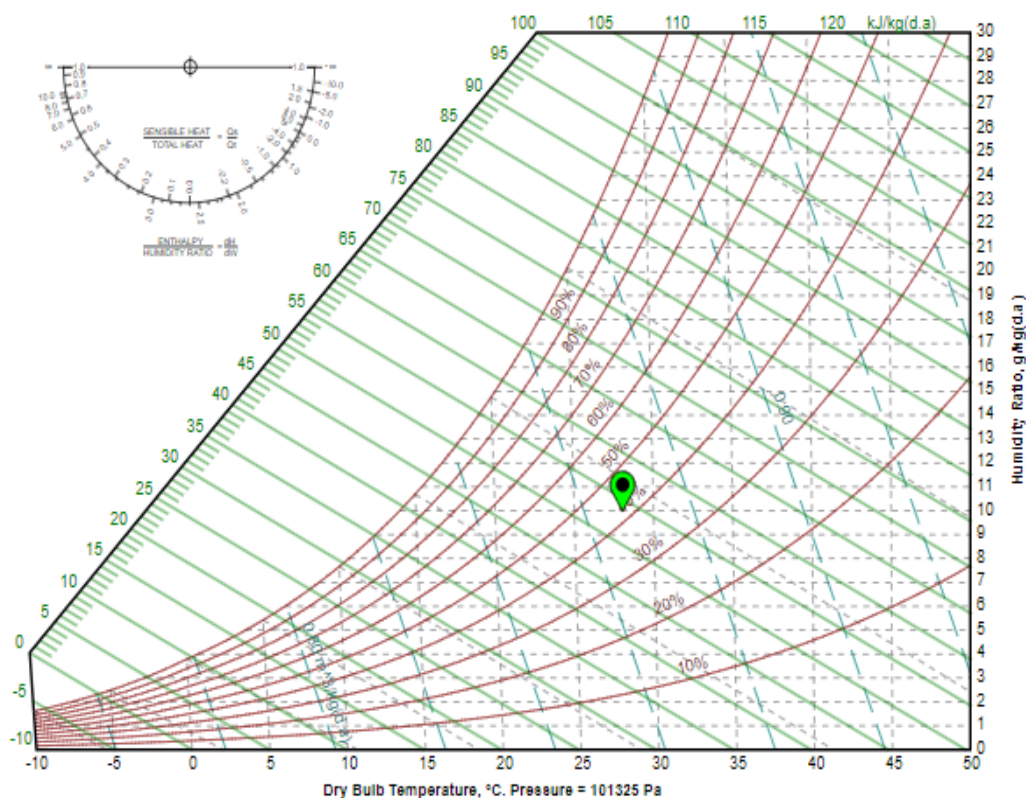
**Figura 50 –** Gráfico de dados de entrada e saída do túnel para fibra de coco



Fonte: autor 2024

Consequente a isso, é possível consolidar uma média através dos dados de entrada coletados. Atribuídos a carta psicrométrica, demonstrado na Figura 51, valores de média de  $TBS_e$  igual a  $28,5^{\circ}\text{C}$  e UR de 42%. Faz com que se tenha um enquadramento adequado dos dados de entrada com a fibra de coco para o resfriamento evaporativo.

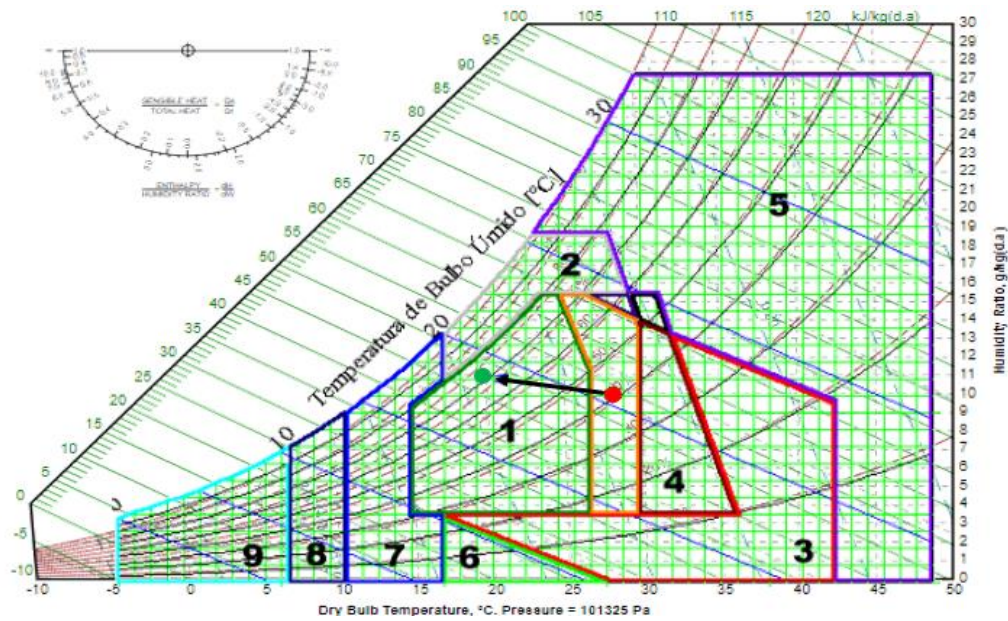
Figura 51 – Gráfico de dados de entrada e saída do túnel



Fonte: Carta psicrométrica, 2024

Sucessivo a isso, a Figura 52 mostra a passagem destes pontos próximos dentro da zona favorável ao resfriamento evaporativo no ponto inicial em vermelho para a zona de conforto térmico no ponto verde, se tornando um resultado satisfatório com o levantamento de dados extraídos da fibra de coco com o uso do túnel de vento didático.

**Figura 52** – Evolução e passagem dos pontos dentro da carta psicrométrica



Fonte: autor 2024

Com os dados obtidos pelo processo, os dados de entrada de  $TBS_e$  e  $UR_e$  são inseridos na carta psicrométrica, e subsequente a isso, são extraídos dados de  $TBU_e$  o uso da Equação 6 para obtenção dos resultados encontrados da efetividade da fibra de coco como material evaporativo são demonstrados na tabela 06.

$$\varepsilon = \frac{TBS_e - TBS_s}{TBS_e - TBU_e} \quad (6)$$

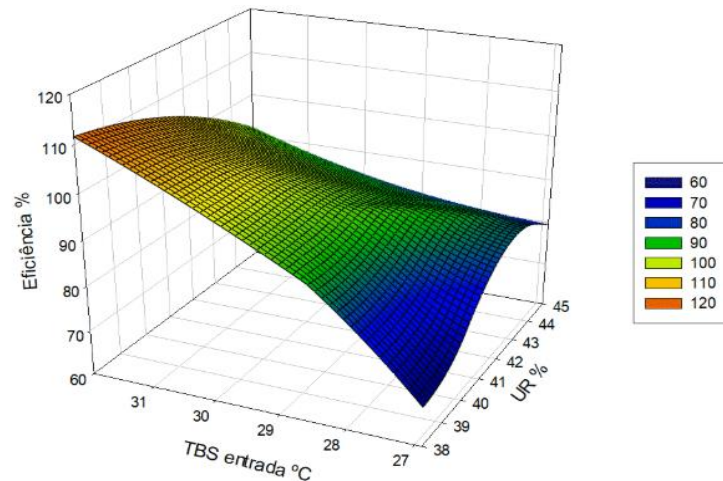
**Tabela 6** – Eficiência de saturação da fibra de coco

Leituras	$TBS_e$	$TBS_s$	$TBU_e$	$UR_e$	Efetividade
A -	25,9°C	<b>19,8°C</b>	18,38 °C	44%	83,33%
B -	27,7 °C	<b>19,9 °C</b>	18,83 °C	43%	87,94%
C -	29,4 °C	<b>20°C</b>	19,58 °C	40%	95,72%
D -	32 °C	<b>19,9°C</b>	21,16 °C	38%	111,62%
E -	28,1 °C	<b>19,9°C</b>	18,77 °C	41%	87,89%
F -	28 °C	<b>21,1°C</b>	19,44 °C	45%	80,61%
<b>Média</b>	<b>28,05 °C</b>	<b>19,9°C</b>	<b>19,13 °C</b>	<b>42%</b>	<b>87,91%</b>

Fonte: autor 2024

A Figura 53 nos traz a correlação entre a influência direta da  $TBS_e$  e  $UR_e$  na efetividade da fibra de coco como membrana evaporativa. O comportamento da superfície do gráfico indica a intervenção desses fatores, podendo ser correspondidos como principais fatores emergentes dos resultados de rendimento de saturação.

**Figura 53** – Gráfico de efetividade de saturação a fibra de coco



**Fonte:** autor 2024

Resultados considerado satisfatório se comparado a estudos como o de Machado Et. Al. (2024) que obteve em torno de 81% de eficiência com fibra de coco no resfriamento evaporativo. Os resultados também se equiparam aos de Oliveira (2012), que em suas condições de valores de entrada encontrou uma efetividade para a fibra de coco de 80%. Onde fica evidente o progresso das fibras vegetais no uso destes sistemas.

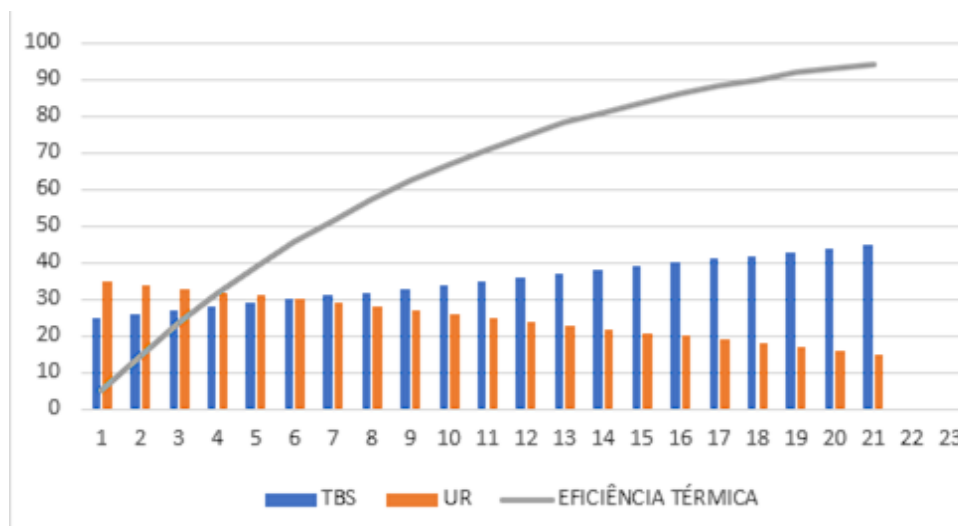
No entanto, em contrapartida, a evidência de que uma maior  $TBS_e$  e menor índice de  $UR$  resultam em uma maior eficiência, vale ressaltar que podemos se atribuímos um valor fixo de temperatura de bulbo seco de saída, para verificarmos a real influência no resultado da temperatura de bulbo seco e umidade relativa de entrada como na Tabela 07, temos uma reta ascendente de acordo com figura 54. Onde se é possível incluir um maior número de leituras e para melhor entendimento do gráfico que representa variações de temperaturas relacionadas a porcentagens de umidade baixas e altas.

**Tabela 7** – Tabela de admissão de valores de entrada

UR	TBS e	TBS s	Efetividade
35%	25°C	24,5°C	5,16%
25%	30°C	24,5°C	41,79%
20%	35°C	24,5°C	64,99%
18%	40°C	24,5°C	83,09%

Fonte: autor 2024

**Figura 54** – Influência da TBSe e UR na efetividade



Fonte: autor 2024

Esta analogia da equação mostra que quanto maior a temperatura e menor a umidade relativa do ar temos uma maior eficiência. Porém pode-se observar em uma das coletas de dados que se a temperatura for muito elevada, o resfriamento não atinge uma eficiência elevada por conta de que pode se distanciar da área efetiva ao resfriamento evaporativo, demonstrado na Figura 04. Saindo da zona adequada, o resfriamento evaporativo não se torna mais eficiente. Podemos afirmar essa informação de acordo com uma leitura (figura 55) realizada que corresponde a uma zona fora do resfriamento evaporativo.

**Figura 55** – Leitura adversa

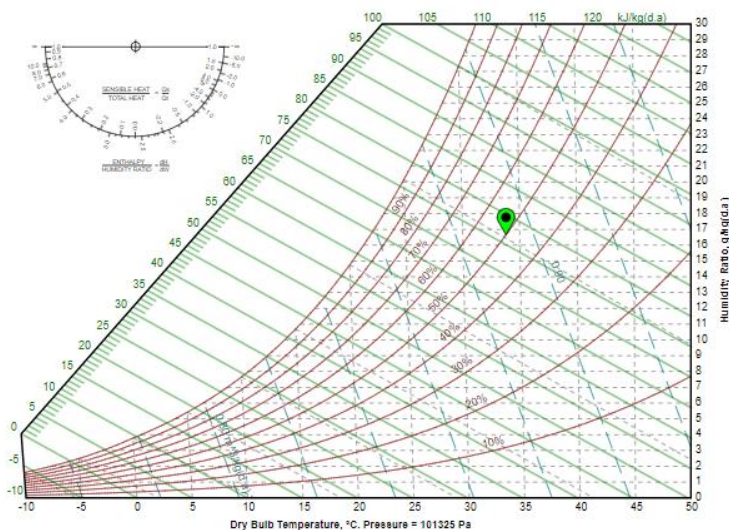


	Dados		
	TBU e (°C)	TBS e (°C)	TBS s (°C)
Eficiência Evaporativa	18,42	33,8	26,5
47,46%	UR (%)		
	Entrada	Saída	
	47	72	

Fonte: autor 2024

Com a carta psicrométrica da Figura 56 é possível verificar visualmente o distanciamento das condições psicrométricas da zona favorável ao resfriamento evaporativo. De acordo com a carta psicrométrica, podemos ter a caracterização do fenômeno evaporativo de que quanto maior a temperatura do ar, maior a capacidade do ar em reter o vapor d'água sem saturar ou condensar. É possível ter o entendimento de que para condições de 47% de umidade relativa do ar para uma temperatura de bulbo seco de 33,8°C, pelas condições elevadas de temperatura espera-se uma umidade relativa ainda menor. Porém, mesmo com tal caracterização, tais atribuições permanecem fora do estado e zona favoráveis ao fenômeno.

**Figura 56** – Leitura adversa fora da zona favorável na carta psicrométrica



Fonte: Carta psicrométrica, 2024

Rauf (2023), compara a carta psicrométrica a um gráfico de propriedades físicas e termodinâmicas do ar como umidade, temperatura e pressão constante que se relacionam entre si. O autor traz em seu capítulo de psicometria uma análise psicrométrica mais detalhada onde consiste em encontrar valores de:

- a. Umidade específica inicial e final;
- b. Quantidade total de calor removido;
- c. Quantidade de calor sensível removido;
- d. Quantidade de calor latente removido;
- e. Temperatura final de bulbo úmido;
- f. Ponto de orvalho inicial e final;
- g. Taxa de evaporação da água;

Dando continuidade à conceituação de estudos em cima da fibra de coco, o fluxo volumétrico do interior do sistema é descrito pela Equação 7 em que pode ser encontrado da relação entre a velocidade linear  $v_1$  e área da seção transversal da hélice do ventilador do sistema assumindo um fluxo laminar. Obtendo o fluxo volumétrico do sistema para dado de entrada da equação 04 de fluxo mássico.

$$V = A \cdot v_1 \quad (7)$$

Sendo assim, tem-se:

$$V_{ar} = A \cdot v_1$$

$$V = 0,0324m^2 \cdot 3,6 m/s$$

$$V = 0,1167 m^3/s$$

Sucessivo a isto, pode ser encontrado o fluxo mássico desejado relacionando fluxo volumétrico com volume específico através da Equação 8.

$$m_a = \frac{V_{ar}}{ve} \quad (8)$$

Em que:

$$m_a = \frac{V}{ve}$$

$$m_a = \frac{0,1167 \text{ m}^3/\text{s}}{0,867 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}(\text{da})}}$$

$$m_a = 0,1347 \text{ kg}(\text{da})/\text{s}$$

Com isso, segundo GONZALES (2021), alguns autores de estudos comparam e relacionam a UR<sub>s</sub> com condições de entrada do ar. Multiplicando a equação de variação de umidade específica ou razão úmida do ar com o fluxo mássico de ar para se obter a taxa de evaporação da água de acordo com a Equação 9.

$$T_{evap \text{ água}} = m_a \cdot \Delta w \quad (9)$$

Onde:

$$T_{evap \text{ água}} = m_a \cdot \Delta w$$

$$T_{evap \text{ água}} = 0,1347 \text{ kg}(\text{da})/\text{s} \cdot 0,956 \text{ g/kg}(\text{da})$$

$$T_{evap \text{ água}} = 0,128 \text{ g/s} \text{ ou, } T_{evap \text{ água}} = 0,463 \text{ L/h}$$



A quantidade total de calor removido pode ser encontrada através da identificação das entalpias, inicial e final de cada análise na carta psicrométrica, onde com Equação 10 é possível encontrar a variação de entalpia.

$$\Delta h = h_f - h_i \quad (10)$$

Com a equação temos as entalpias correspondentes:

$$\Delta h_{coco} = h_f - h_i$$

$$\Delta h_{coco} = -5,918 \text{ kJ/kg}(da)$$

$$\Delta h_{kraft} = h_f - h_i$$

$$\Delta h_{kraft} = -3,786 \text{ kJ/kg}(da)$$

Avançando no método, a Equação 11 multiplica a variação de entalpia pela massa de ar do ambiente, que neste caso vem a ser a quantidade de calor removido do sistema, contando com caixa no final do túnel com uma massa de ar de 1,530kg.

$$\Delta Q_{total} = \Delta h \cdot m_{ar} \quad (11)$$

$$\Delta Q_{total \text{ coco}} = -5,918 \text{ kJ/kg}(da) \cdot 1,53 \text{ kg}$$

$$\Delta Q_{total \text{ coco}} = -9,054 \text{ kJ}$$

$$\Delta Q_{total \text{ Kraft}} = -3,786 \text{ kJ/kg}(da) \cdot 1,53 \text{ kg}$$

$$\Delta Q_{total \text{ Kraft}} = -5,792 \text{ kJ}$$

Vale frisar a respeito sobre o sinal negativo de ambos os resultados acima se dá pelo fato de se tratar de uma perda de calor do sistema, ou seja, calor extraído pelo processo no ambiente em questão. Para determinar o calor sensível removido através do resfriamento, segundo o autor é preciso encontrar a razão de calor sensível através da Equação 12.

$$R_{calor\ sensível} = \frac{Q_{total}}{Q_{sensível}} \quad (12)$$

Outra forma de chegar ao objetivo proposto é através da Equação 13, onde ocorre a relação entre as variações de entalpia e temperatura de bulbo seco de entrada.

$$R_{calor\ sensível} = \frac{\Delta h}{\Delta TBS_e} \quad (13)$$

Através da Equação 13, para a aplicação d fibra de coco e material comercial como membrana evaporativas temos:

$$R_{calor\ sensível\ coco} = \frac{-5,918\ kJ/kg(da)}{-8,15^{\circ}C}$$

$$R_{calor\ sensível\ coco} = 0,726$$

$$R_{calor\ sensível\ Kraft} = \frac{-3,786\ kJ/kg(da)}{-8^{\circ}C}$$

$$R_{calor\ sensível\ Kraft} = 0,473$$

Dando continuidade, matematicamente, obtenção do calor sensível se dá pela multiplicação da razão de calor sensível pelo calor total, onde temos:

$$Q_{\text{sensível coco}} = 0,726 \cdot -9,054 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{sensível coco}} = -6,574 \text{ kJ}$$

Já para papel kraft temos:

$$Q_{\text{sensível Kraft}} = 0,473 \cdot -5,792 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{sensível Kraft}} = -2,741 \text{ kJ}$$

Com os devidos fins matemáticos, através da Equação 14 e com os dados já existentes, podemos encontrar a diminuição de calor sensível do ar cedido para a água através do fenômeno evaporativo.

$$Q_{\text{Latente}} = Q_{\text{total}} - Q_{\text{sensível}} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{Latente coco}} &= Q_{\text{total}} - Q_{\text{sensível}} \\ Q_{\text{Latente coco}} &= -9,054 \text{ kJ} - (-6,574 \text{ kJ}) \\ Q_{\text{Latente coco}} &= -2,479 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{Latente Kraft}} &= Q_{\text{total}} - Q_{\text{sensível}} \\ Q_{\text{Latente Kraft}} &= -5,792 \text{ kJ} - (-2,741 \text{ kJ}) \\ Q_{\text{Latente Kraft}} &= -3,051 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Em comparativo a estudos de Haruana ET. Al (2014), González ET Al (2022), Maurya ET Al (2014), trazem métodos semelhantes e próximos de análise psicrométrica, porém contando com capacidade de refrigeração, que é determinada pela equação 15 em que  $C_{p \text{ ar}}$  corresponde ao calor específico do ar a pressão constante igual a  $1,005 \frac{\text{KJ}}{\text{kg.K}}$ , e posteriormente o cálculo do coeficiente de desempenho para sistemas de resfriamento evaporativo COP.

$$CC = m_a \cdot C_{p \text{ ar}} (T_1 - T_2) \cdot 3,6 \frac{KJ}{h} \quad (15)$$

Então a resolução:

$$CC = m_a \cdot C_{p \text{ ar}} (T_1 - T_2) \cdot 3,6 \frac{KJ}{h}$$

$$CC = 1,53 \text{ kg} \cdot 1,005 \frac{KJ}{\text{kg} \cdot K} (301,2 \text{ K} - 293,05 \text{ K}) \cdot 3,6 \frac{KJ}{h}$$

$$CC = 47,328 \frac{KJ}{h}$$

Sucessivo a isto, o coeficiente de desempenho COP, pode determinar informações sobre a capacidade de refrigeração, além de ser fundamental para comparações de consumo energético. COP é apresentado na resolução da equação 16, me que  $W_p$  e  $W_f$  correspondem as potências da bomba e do ventilador respectivamente realizando as devidas conversões de energia e potência.

$$COP = \frac{CC}{W_p + W_f} \quad (16)$$

$$COP = \frac{47,328 \frac{KJ}{h}}{5,4 \frac{KJ}{h} + 212,4 \frac{KJ}{h}}$$

$$COP = 0,2173$$

Alguns autores alcançaram COP maiores, porém isso está relacionado a espessuras das almofadas e também variações de velocidades do ar de entrada, fazendo que oscile encontrando um maior desempenho e eficiência de saturação.

#### 4.4.2. PAPEL KRAFT

Com fins comparativos, a placa evaporativa de papel kraft por ser um material poroso e seus filamentos favorecerem o escoamento uniforme da água bem como proporcionando maior número de áreas de contato para troca térmica. O Anexo VII junto a Tabela 09 traz resultados de A à F (15:00 horas a 20:00 horas respectivamente), para um período de leitura com pressão igual a 980,4 hPa. É possível observar variações, porém uma média de aproximadamente 7,2°C de resfriamento, e variações médias de 35% de elevação da umidade relativa do ar.

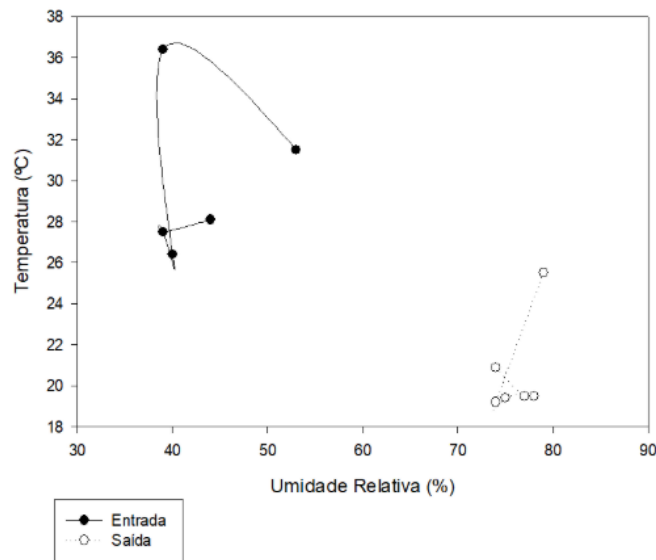
**Tabela 8** – Dados tabelados de entrada e saída da membrana de papel Kraft

Leitura	Umidade Relativa (%)			Temperatura (°C)		
	Entrada	Saída	Dif	Entrada	Saída	Dif
A -	53	79	26	31,5	25,5	6
B -	39	74	35	26,4	19,2	7,2
C -	40	75	35	26,4	19,4	7
D -	39	78	39	27,5	19,5	8
E -	39	77	38	27,5	19,5	8
F -	44	74	30	28,1	20,9	7,2

**Fonte:** autor 2024

A Figura 57 nos mostra os dados de entrada e saída em gráfico para comparação. Esse tipo de análise é essencial para entender o desempenho do papel kraft em condições climáticas variadas, o que é crucial para a otimização de sistemas de resfriamento evaporativo. A análise detalhada desses parâmetros pode contribuir significativamente para a implementação de soluções de resfriamento mais ecológicas e eficientes, alinhando-se com os objetivos de sustentabilidade e economia de recursos.

**Figura 57** – Gráfico de dados de entrada e saída do túnel para painel de celulose



**Fonte:** autor 2024

Na Tabela 08, valores encontrados através da carta psicrométrica com os dados de entrada e saída da fibra de coco do material comercial.

**Tabela 9** – Dados da carta psicrométrica

Dados	Fibra de coco		Papel Kraft	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
<i>TBS</i> (°C)	28,05	19,9	27,5	19,5
<i>TBU</i> (°C)	18,92	16,97	18,03	16,72
<i>UR</i> (%)	42	75	39,5	76
<i>h</i> (kJ/kg(da))	53,668	47,750	50,801	47,015
<i>w</i> (g/kg(da))	9,976	10,932	9,072	10,804
<i>Po</i> (°C)	18,83	16,94	17,93	16,69

**Fonte:** autor 2024

Dando continuidade ao andamento do processo de dados, tem-se a tabela 10 atribuindo os valores de entrada na carta psicrométrica para então validar dados de

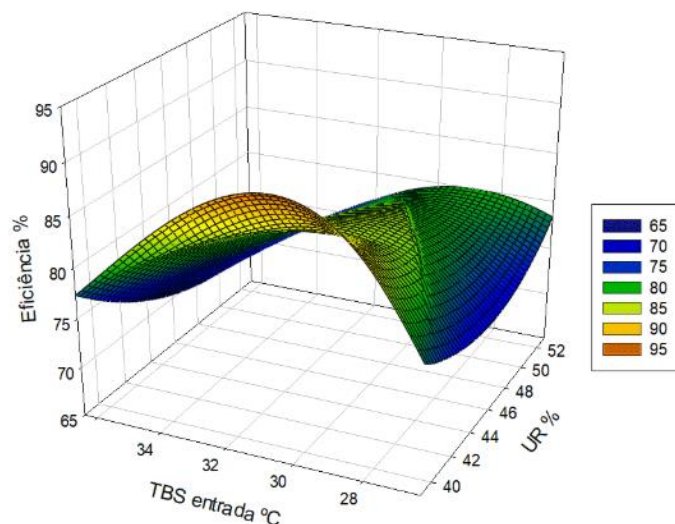
entrada para a equação 3 também presentes na tabela e então obter a eficiência da membrana evaporativa de papel kraft para comparação com a fibra de coco.

**Tabela 10** – Eficiência de saturação do papel Kraft

Leituras	TBS <sub>e</sub>	TBS <sub>s</sub>	TBU <sub>e</sub>	UR <sub>e</sub>	Efetividade
A -	31,5°C	25,5°C	23,8°C	53%	77,92%
B -	26,4°C	19,2°C	17,09°C	39%	77,34%
C -	26,4°C	19,4°C	17,27°C	40%	76,67%
D -	27,5°C	19,5°C	17,93°C	39%	83,59%
E -	27,5 °C	19,5°C	17,93°C	39%	83,59%
F -	28,1°C	20,9°C	19,33°C	44%	82,10%
<b>Média</b>	<b>27,5°C</b>	<b>19,5°C</b>	<b>17,93°C</b>	<b>39,5%</b>	<b>80,01%</b>

Fonte: autor 2024

**Figura 58** – Gráfico de efetividade de saturação o material comercial



Fonte: autor 2024

Dando continuidade à conceituação de estudos e comparação em relação a fibra de coco com a membrana comercial de papel kraft de celulose, podemos levar em

consideração alguns termos já calculados, como fluxo volumétrico, fluxo mássico de ar no interior do sistema.

Onde com a resolução da Equação 6 tem-se:

$$T_{evap\ água} = m_a \cdot \Delta w$$

$$T_{evap\ água} = 0,1347\text{ kg}(da)/s \cdot 1,732\text{ g/kg}(da)$$

$$T_{evap\ água} = 0,233\text{ g/s}$$

$$T_{evap\ água} = 0,839\text{ L/h}$$

Seguindo a mesma ideologia de análise psicrométrica dos autores citados usada na fibra vegetal de coco, e com os temas da Tabela 8, encontrados através da carta psicrométrica com os dados de entrada de ambos os materiais, temos a equação da capacidade de refrigeração.

$$CC = m_a \cdot C_{p\ ar} (T_1 - T_2) \cdot 3,6 \frac{KJ}{h}$$

$$CC = 1,53\text{ kg} \cdot 1,005 \frac{KJ}{kg \cdot K} (300,65\text{ K} - 292,65\text{ K}) \cdot 3,6 \frac{KJ}{h}$$

$$CC = 44,284 \frac{KJ}{h}$$

Sucessivo a isto, o coeficiente de desempenho COP, para a célula evaporativa comercial é igual a:

$$COP = \frac{CC}{W_p + W_f}$$

$$COP = \frac{44,284 \frac{KJ}{h}}{5,4 \frac{KJ}{h} + 212,4 \frac{KJ}{h}}$$

$$COP = 0,2033$$



Os resultados superiores e o intervalo de medições da fibra de coco em relação à placa evaporativa de papel Kraft podem ser explicados por conta de que as medições foram realizadas em diferentes dias com condições de entrada similares. Isso faz com que as condições climáticas também oscilem sob influência do El Niño.

Mas é correto observar nas cartas psicrométricas das medias de duas leituras, a umidade absoluta varia consideravelmente, ou seja, a capacidade do ar de reter umidade é menor para a coleta de dados da membrana de papel Kraft se comparado a de fibra de coco. Consequente a isso, com uma menor absorção de água do ar, o condicionamento térmico se torna menor.

#### 4.5. BALANÇO DE MASSA

Uma análise de balanço de massa foi realizada em laboratório para o conhecimento da retenção de água dos painéis evaporativos. Inicialmente, as amostras foram separadas e conformadas em 5 unidades de cada material para cada finalidade desejada. Antes de iniciar os processos, todas as amostras foram postas em estufa para secagem a 90°C por um tempo próximo a duas horas. Buscando a total ou máxima inexistência inicial de água para os próximos passos. Com isso, ocorreram as devidas pesagens das 5 amostras de cada material. As pesagens das amostras secas de acordo com as Figuras 59 e 60, fibra de coco e papel kraft na ordem de 1 a 5 aferindo suas massas.

**Figura 59** – Amostras de fibra de coco secas



Amostra 1

Amostra 2

Amostra 3



Amostra 4

Amostra 5

Fonte: autor 2024

Na sequência, a Figura 60 traz a pesagem das amostras de papel Kraft.

Figura 60 – Amostras de papel Kraft secas



Amostra 1

Amostra 2

Amostra 3



Amostra 4

Amostra 5

Fonte: autor 2024

As cinco amostras de cada membrana para a absorção de água, foram separadas e postas em imersão em água em um recipiente de vidro por uma hora e mantidas em repouso como demonstra a Figura 61.

Figura 61 – Amostras em repouso para saturação



Fonte: autor 2024

Com isso, com as amostras já saturadas, retira-se o excesso de águas das amostras e então a pesagem das 5 amostras saturadas de cada material. As pesagens das amostras secas de acordo com as figuras 62 e 63, fibra de coco e papel kraft na ordem de 1 a 5.

**Figura 62** – Amostras de fibra de coco saturadas



Amostra 1

Amostra 2

Amostra 3



Amostra 4

Amostra 5

Fonte: autor 2024

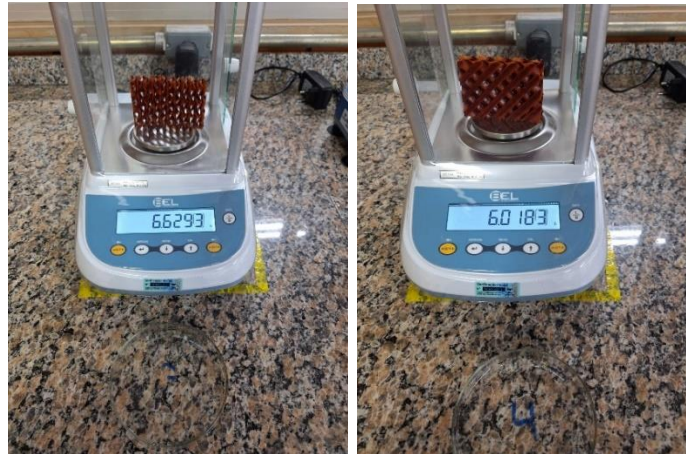
**Figura 63** – Amostras de papel Kraft saturadas



Amostra 1

Amostra 2

Amostra 3



Amostra 4

Amostra 5

Fonte: autor 2024

Entende-se, que por este método de balanço de massa, é possível chegar à capacidade de retenção de água de um material esponjoso onde o teste de absorção de água do material vem a ser um meio de procedimento simples e básico, porém eficaz e preciso. Por esses fatos as amostras consistem em 5 unidades para uma boa estimativa mantendo as mesmas condições de testes, onde foi possível alcançar a análise de resultados através da Equação 17 onde se pode calcular esta capacidade de retenção de água em cada amostra, e através da Equação 18 a retenção de água das amostras por unidade de massa.

$$j = m_2 - m_1 \quad (17)$$

$$j = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (18)$$

Que com os resultados obtidos em suas resoluções matemáticas formulam a Tabela 11 de acordo com as amostras.

**Tabela 11** – Absorção de água das amostras

Amostra	Quantidade de		Absorção por	
	água absorvida (ml)		unidade de massa (ml/g)	
	Fibra de coco	Papel Kraft	Fibra de coco	Papel Kraft
1 -	4,0502	3,3822	1,1188	1,0613
2 -	3,688	1,9867	1,0579	0,5626
3 -	2,9135	2,3408	0,9356	0,6403
4 -	3,1056	3,0549	0,9544	0,8546
5 -	3,0059	2,1263	0,8642	0,5463

**Fonte:** autor 2024

Com os resultados obtidos através das equações, fica perceptível uma maior absorção de água da fibra vegetal de coco em comparação com papel Kraft de celulose rígida corrugada. Essa maior absorção tem efeito direto no resfriamento evaporativo, e conseqüente a isto uma maior eficiência de saturação e refrigeração térmica.

#### 4.6. ANÁLISE DE DENSIDADE

Simultâneo a isto, seguindo a mesma analogia de absorção de água dos materiais porosos por unidade de massa, foi realizado o procedimento foram pesadas outras cinco amostras de cada material demonstradas as amostras de 1 a 5 de fibra de coco e papel Kraft respectivamente e na ordem, como apresentado na Figura 64 e 65.

**Figura 64** – Amostras de fibra de coco secas para obtenção da densidade



Amostra 1

Amostra 2

Amostra 3



Amostra 4

Amostra 5

Fonte: autor 2024

**Figura 65** – Amostras de papel Kraft secas para obtenção da densidade



Amostra 1

Amostra 2

Amostra 3



Amostra 4

Amostra 5

Fonte: autor 2024

Com intuito de encontrar volume de cada amostra e posteriormente a densidade de cada material através da Equação 23. Prosseguindo a mesma metodologia, as amostras passaram pelo mesmo tempo próximo a duas horas de estufa para secagem. Seguindo o procedimento, as amostras foram postas uma a uma imergidas em água em uma proveta graduada.

Através desta ação é possível observar o deslocamento do líquido no recipiente, onde por conta da porosidade da fibra de coco e do papel kraft de celulose, ocorre a máxima absorção de água e expulsão do ar pelos espaços que podem ser preenchidos pelo líquido. Com a graduação do recipiente dos resultados obtidos do deslocamento do líquido é possível ter conhecimento da água de cada amostra e seu volume, ou seja, para cada unidade de amostra o seu volume corresponde a quantidade de líquido deslocado. Na Tabela 12 encontram-se os resultados obtidos com o método.

$$D = \frac{m}{V} \quad (19)$$



**Tabela 12** – Análise de densidade

Amostra	Fibra de Coco			Papel Kraft		
	Massa (g)	Volume (ml)	Densidade (g/ml)	Massa (g)	Volume (ml)	Densidade (g/ml)
1 -	1,2289	1	1,2289	0,8068	2	0,4034
2 -	1,6458	3	0,5486	1,0506	1	1,0506
3 -	1,4933	2	0,7466	1,2444	1	1,2444
4 -	0,9896	1	0,9896	1,2413	2	0,6206
5 -	0,9919	2	0,4959	1,1395	3	0,3798

**Fonte:** autor 2024

Através dos resultados atingidos e demonstrados, é correto dizer que o material de enchimento da célula de fibra de coco possui uma maior densidade que o papel kraft, explicando uma maior absorção de água e com isso uma maior efetividade de saturação. Que, portanto, com maior retenção de água ocorre uma maior evaporação e perda de energia térmica do ar que é resfriado pelo processo.

## 5. CONCLUSÃO

Em virtude dos conhecimentos abordados é correto afirmar que o túnel de vento é um sistema consideravelmente capaz de trazer resultados favoráveis a estudos e análises de diferentes áreas da engenharia. Claro que, em virtude disso, melhorias contínuas vêm sendo desenvolvidas, bem como a correção e identificação de possíveis erros.

Com o estudo, foi perceptível o fluxo laminar no interior do corpo de testes de túnel, uma vez que o mesmo se distribui uniformemente. Conclui-se também que a ferramenta flow simulation do Solidworks é extremamente importante para testes com fluxo mássico de ar ou trabalhar com outros fluidos e trocas térmicas. E com isso, se faz necessário de todo e qualquer engenheiro adquirir maiores conhecimentos ao uso da ferramenta.

No que se diz respeito ao fluxo laminar presente no interior do túnel, é possível uma analogia de que para todo e qualquer túnel de vento, é necessário e indispensável o uso de ambos estabilizadores de ar, localizados na entrada e saída do túnel. Com relação a tal argumento, seria de certa forma aceitável que o corpo da parte de testes do túnel fosse mais prolongado em seu eixo. Dessa forma, seria possível também prolongar os estabilizadores garantindo ainda mais uma estabilidade do fluxo de ar interno.

Levando em conta os aspectos e figuras da simulação demonstrada, foi possível observar na figura 23 uma pequena perda de ar que passa pela placa evaporativa. Perda está localizada entre a placa evaporativa e o acrílico da janela de visualização do túnel. Entende-se que para fins acadêmicos e consolidação de dados e do fenômeno evaporativo, tais perdas foram consideradas desprezíveis.

Como resultado no protótipo do túnel, nas perdas com as paredes laterais do corpo de testes do túnel, as perdas foram consideradas desprezíveis por conta de não ser um grande volume de ar, são apenas por não se tratar de sistema totalmente isolante e totalmente vedado. Logo, a fibra de coco por ser um material vegetal, em seu estado úmido se torna mais flácida e amolecida, causando pequenas perdas, como demonstrado na figura 18.

Já na parte superior, a perda é um pouco maior se comparado com as laterais, porém também foi considerada desprezível por ser um espaçamento necessário para o funcionamento do sistema, uma vez que essas placas devem ser umidificadas com sistema circulatório ativo, há a necessidade do espaçamento dos canos de água. Portanto, também foi considerado uma perda desprezível.

Fatos estes que se tornam ainda mais desprezíveis com a placa evaporativa de papel kraft. Como é um material rígido, ele mantém a sua forma mesmo umedecido, portanto, se tornou mais fácil de conformá-la com uma medida de vedação mais precisa evitando perdas.

Dando continuidade ao que tange a materiais, como mencionado anteriormente o túnel de vento e toda sua estruturação e dimensionamento voltada para fins acadêmicos bem como a escolha de um túnel por circuito aberto e não fechado para evitar custo elevado. Deve-se mencionar a chapa de madeira mdf. Em sua maioria, os túneis de vento possuem objetivos aerodinâmicos e perfis de objetos, ou seja, com fluxo de apenas um elemento, o ar.

Neste caso, se tratando de dois fluxos ativos de dois elementos em circulação e que interagem entre si no fenômeno evaporativo, a escolha da madeira mdf como material principal dos componentes do túnel talvez não tenha sido a mais apropriada. Porém, tal aspecto, já era uma indagação no início do projeto. Devidamente, os cuidados necessários foram de fato providenciados como isolamentos laterais e vedações do corpo de testes, bem como o fundo de chapa de UHMW.

O trabalho apresentou um bom desenvolvimento demonstrando resultados de processo termo fluido que ocorre em torres de resfriamento, com um propósito de aplicação e inserção da fibra vegetal de coco. E os resultados apontaram boa redução percentual de temperatura e elevação da umidade relativa. O fenômeno evaporativo em suas condições ideais é mais significativo e notável, onde a região também se mostrou favorável do ponto de vista psicrométrico para o fenômeno.

A não comercialização do material pode estar atrelado a diversos fatores como melhor fabricação e comercialização do papel kraft por ser um material industrializado, e a fibra vegetal deve passar por processamentos como plantio, produção, extração e possível tratamento, dificultando a aplicação do mesmo.

Por termino, este trabalho não só desperta como engrandece a vivacidade de um próximo estudo. Seja como continuidade ou ênfase na efetividade das placas evaporativas com resultado aplicado em um túnel de vento. Também, facilmente, adentrando em áreas de conforto térmico e psicometria, bem como dados meteorológicos, otimização do sistema e aplicação mais eficazes de sistemas evaporativos. Desde já, pelo levantamento de dados obtidos e funcionalidade adequada do túnel de vento, é possível um estudo promissor.

Diante dos dados demonstrados e obtidos em trabalho experimental, e até mesmo dos autores de referência, fica evidente que as fibras vegetais possuem um grande potencial de aproveitamento como painel em sistema de resfriamento evaporativo do tipo direto. Com o propósito de obter êxito referente as diferentes objetividades de trabalho, bem como, responder a problemática e persuadir as hipóteses existentes como alternância de velocidade do ar, espessura do material poroso, fica como perspectiva futura uma provável continuidade no estudo, seja com outro material alternativo, métodos de aplicação entre outros.

## 5.1. Sugestões para trabalhos futuros

- Estudar outros materiais alternativos como PET, luffa (esponja vegetal), e outros possíveis materiais vegetais com potencial para resfriamento evaporativo;
- Testar geometrias e espessuras maiores de membranas com velocidades de ar de entrada maiores;
- Estudar a degradação e vida útil de cada material por quantidade de ciclos de uso e/ou condições de armazenamento e secagem;
- Atribuir água de reservatório proveniente de sistema pluvial visando maior economia de sistema;
- Uma possível análise e estudo computacional através de ferramenta CFD (Computational Fluid Dynamics), encontrando taxas de evaporação e efetividade através do dimensionamento e características do projeto;
- Possível prototipagem de sistema de resfriamento evaporativo;

## **6. ANEXO I – Conceitos fundamentais**

### **Psicometria**

A psicometria pode ser descrita como o apropriado estudo das propriedades do ar, tais como temperatura, vapor de água, umidades relativa e absoluta e entalpias. Os métodos psicrométricos são muito usados para análises de conforto térmico ou condicionamento de ambientes, ou até mesmo para misturas de ar e trocas térmicas. Os cálculos psicrométricos são aplicados a cargas térmicas, resfriamento e aquecimento do ar, umidificação e desumidificação.

### **Temperatura de bulbo seco**

Esta temperatura do ar pode ser medida com termômetros comuns, é a temperatura conhecida do ar presente no ambiente sem considerar sua umidade. A temperatura de bulbo seco é a temperatura que geralmente é registrada e levadas em maior consideração em previsões meteorológicas.

### **Temperatura de bulbo úmido**

É a temperatura do ar que pode ser medida também com termômetros comuns, porém com uma gaze ou algodão umedecidos em sua extremidade, refletindo assim o efeito da umidade do ar na temperatura.

### **Entalpia**

Pode ser descrita como uma grandeza termodinâmica que representa a quantidade de energia interna em relação a um ponto de referência de um sistema termodinâmico. Pode sofrer influência por conta de variações de pressão, volume e temperatura.

## **Umidade relativa**

A umidade relativa pode ser encontrada através da razão entre a quantidade de umidade do ar e a quantidade máxima que ele pode conter na mesma temperatura.

## **Umidade absoluta**

É encontrada através da razão entre as massas de vapor de água e de ar seco presentes na mistura. Pode ser descrita como umidade específica.

## **Ponto de orvalho**

A temperatura de ponto de orvalho é a temperatura que corresponde ao ponto inicial de condensação do vapor de água contida no ar umidificado a pressão constante.

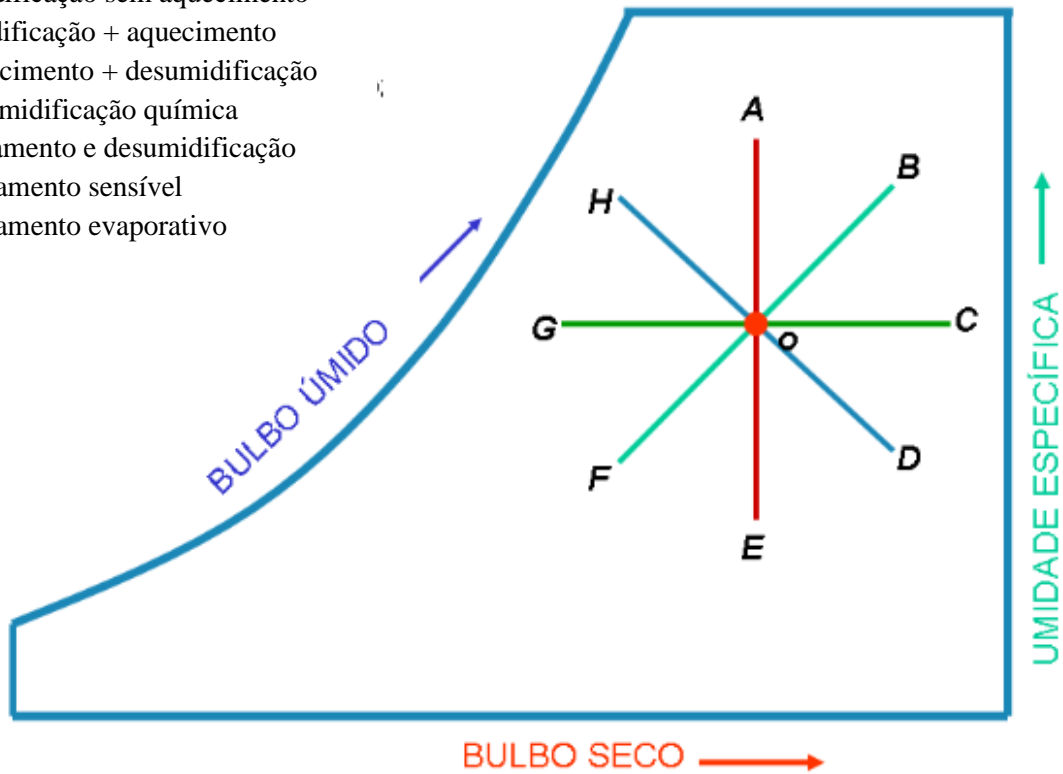
## **Carta psicrométrica**

A carta psicrométrica para a psicometria é uma ferramenta ágil para representar graficamente as propriedades termodinâmicas do ar úmido em forma de diagrama. Através de suas linhas é possível fazer a correta leitura, bem como, chegar a outros valores desejados correspondentes as mesmas condições. A figura do ANEXO II traz orientações de leitura para o entendimento de fenômenos entre dois pontos.

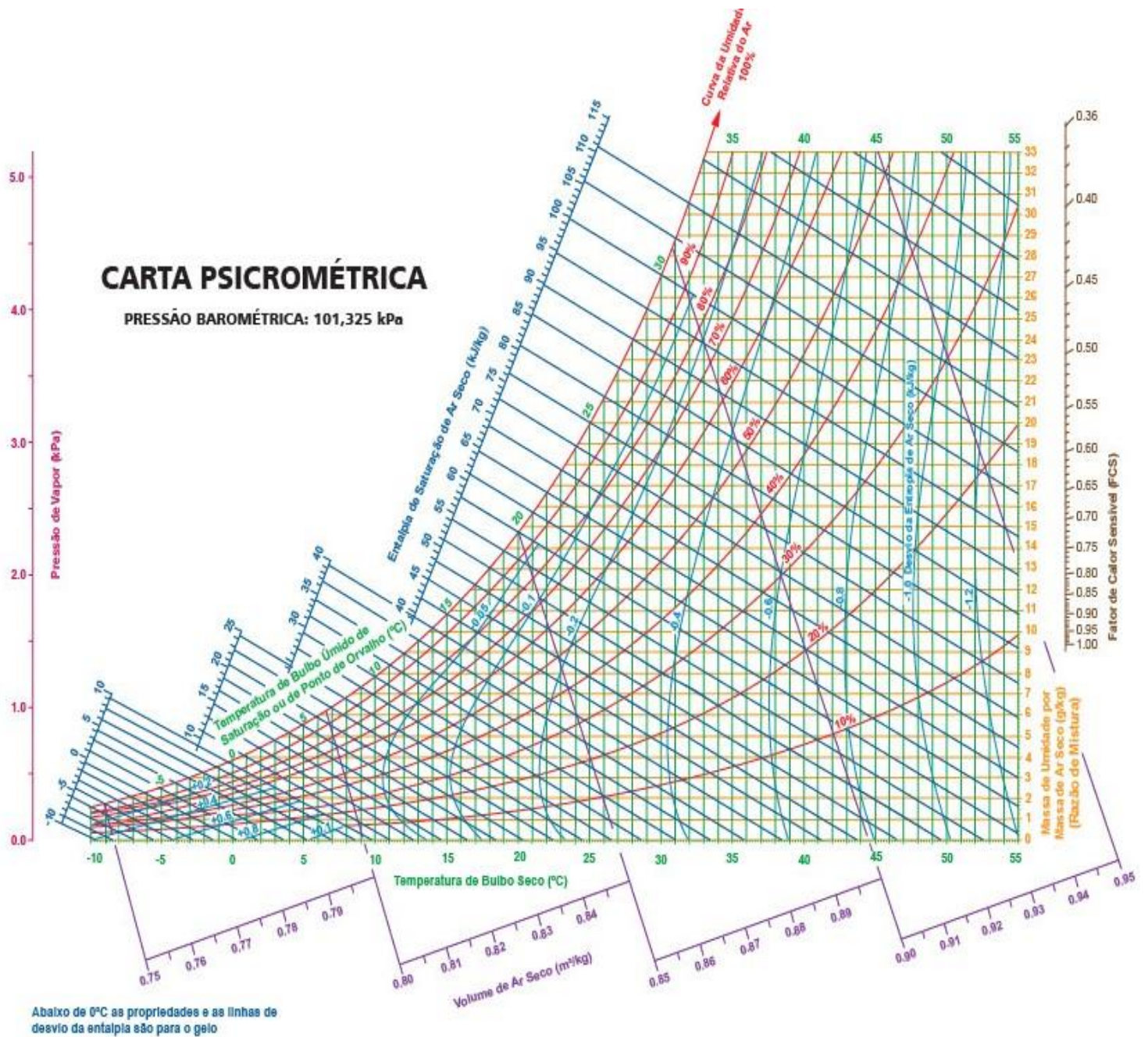
Já na figura ANEXOIII é possível ter o entendimento da representatividade das linhas e informações completas do diagrama. Em algumas situações as cartas psicrométricas são remanejadas para conter informações resumidas, ou seja, são mais básicas de acordo com a finalidade ou necessidade.

## 7. ANEXO II – Orientações de leitura

- AO – Umidificação sem aquecimento
- OB – Umidificação + aquecimento
- OC – Aquecimento + desumidificação
- OD – Desumidificação química
- OF – Esfriamento e desumidificação
- OG – Esfriamento sensível
- OH – Esfriamento evaporativo



## 8. ANEXO III – Carta psicrométrica completa



- TBS, TBU E TPO
- Curva da Umidade Relativa do Ar
- Razão de Mistura
- Entalpia de Saturação de Ar Seco
- Volume de Ar Seco
- Pressão de Vapor
- Fator de Calor Sensível
- Desvio da Entropia



## 9. ANEXO IV – Propriedade dos gases

**TABELA A-2**

Calores específicos de gás ideal para diversos gases comuns

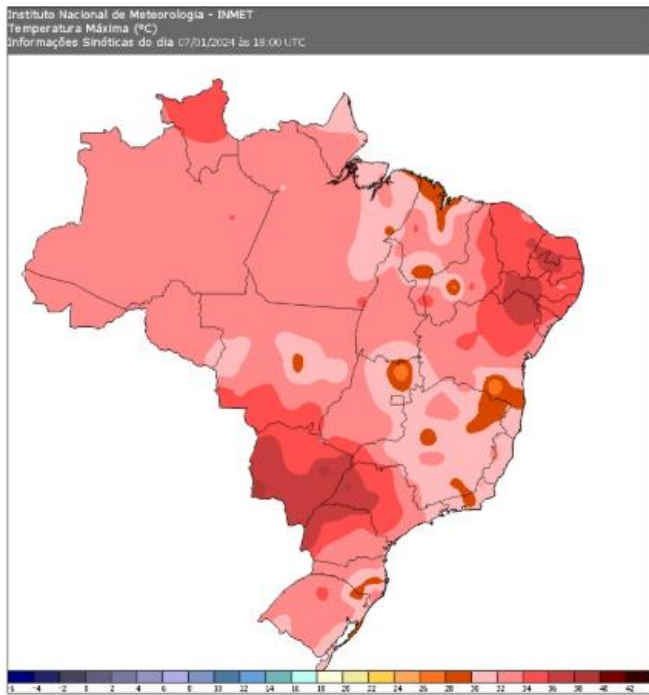
(a) A 300K

Gás	Fórmula	Constante do gás, $R$ kJ/kg·K	$c_p$ kJ/kg·K	$c_v$ kJ/kg·K	$k$
Ar	—	0,2870	1,005	0,718	1,400
Argônio	Ar	0,2081	0,5203	0,3122	1,667
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,1433	1,7164	1,5734	1,091
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0,1889	0,846	0,657	1,289
Monóxido de carbono	CO	0,2968	1,040	0,744	1,400
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,2765	1,7662	1,4897	1,186
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,2964	1,5482	1,2518	1,237
Hélio	He	2,0769	5,1926	3,1156	1,667
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	4,1240	14,307	10,183	1,405
Metano	CH <sub>4</sub>	0,5182	2,2537	1,7354	1,299
Neônio	Ne	0,4119	1,0299	0,6179	1,667
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	0,2968	1,039	0,743	1,400
Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	0,0729	1,7113	1,6385	1,044
Oxigênio	O <sub>2</sub>	0,2598	0,918	0,658	1,395
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,1885	1,6794	1,4909	1,126
Vapor de água	H <sub>2</sub> O	0,4615	1,8723	1,4108	1,327

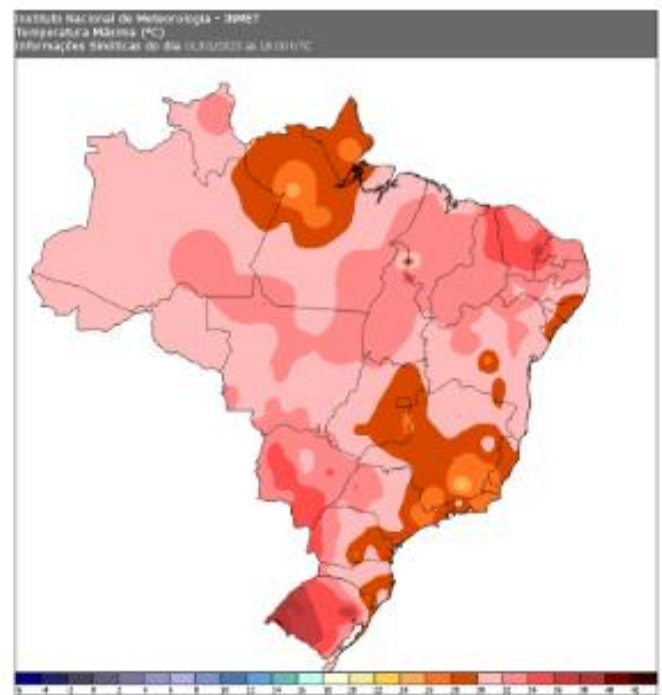
Nota: A unidade kJ/kg·K é equivalente a kJ/kg·°C.

Fonte: Kyle, B. G., *Chemical and Process Thermodynamics* 3/E by Kyle, B. G. © 2000. Adaptado com a permissão de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.

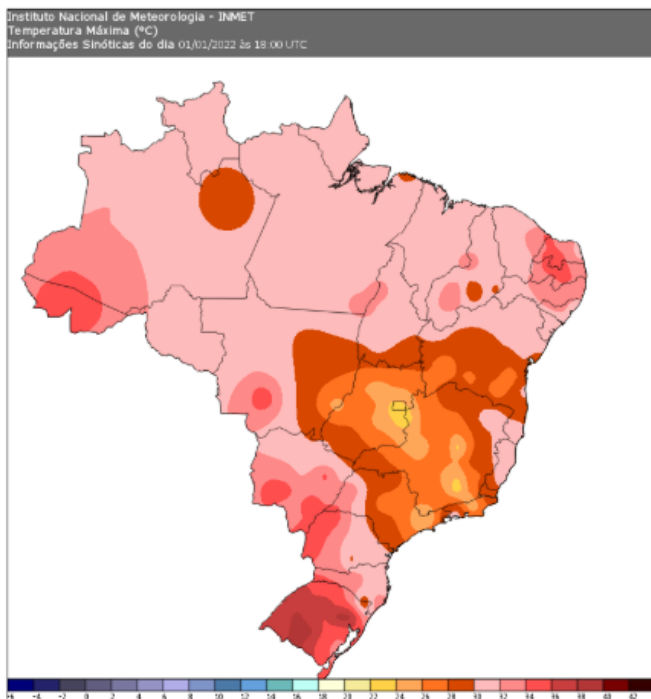
## 10. ANEXO V – Temperaturas máximas dos meses de janeiro



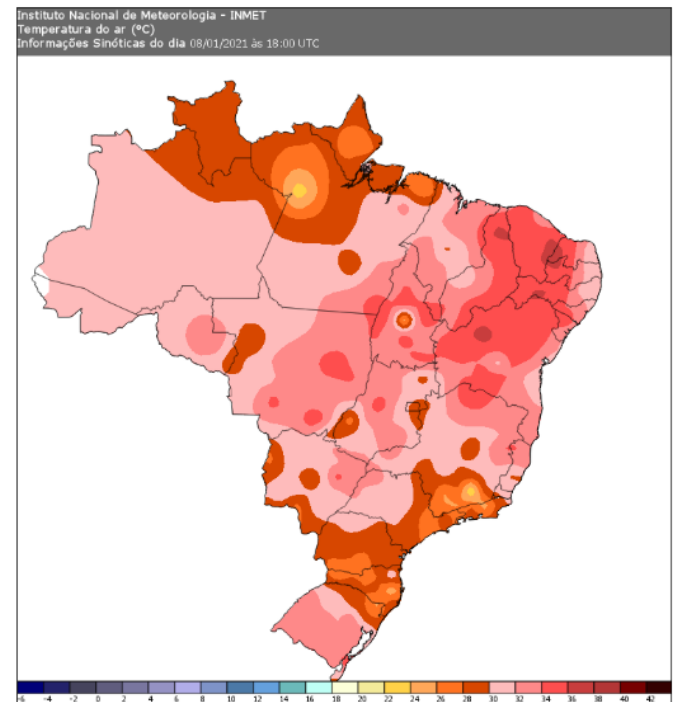
**Janeiro 2024**



**Janeiro 2023**



**Janeiro 2022**



**Janeiro 2021**

## 11. ANEXO VI – Registros de higrômetros para fibra de coco

- Higrômetros superiores de cada figura representam as leituras de temperatura e umidade relativa de entrada, e inferiores as leituras de saída.



A)

B)

C)



D)

E)

F)

Fonte: autor 2024

## 12. ANEXO VII – Registros de higrômetros para papel Kraft

- Higrômetros superiores de cada figura representam as leituras de temperatura e umidade relativa de entrada, e inferiores as leituras de saída.



A)



B)



C)



D)



E)



F)

Fonte: autor 2024

### 13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alam, MD Ferdous, et al. "Um estudo experimental sobre o projeto, desempenho e adequação do sistema de resfriamento evaporativo utilizando diferentes materiais indígenas." *Anais da conferência AIP* . Vol. 1851. Nº 1. Publicação AIP, 2017.

Alodan, Mohammed A., and Abdulelah A. Al-Faraj. "Design and evaluation of galvanized metal sheets as evaporative cooling pads." *J. King Saud Univ* 18 (2005): 9-18.

ASHRAE. Green Guide American Society of Heating, Refrigerating and AirConditioning Engineers. Editora Butterworth-Heinemann, 2006.<  
[https://www.academia.edu/38149795/ASHRAE\\_Green\\_Guide\\_pdf](https://www.academia.edu/38149795/ASHRAE_Green_Guide_pdf)>

Bitencourt, Vagner Fidelis. "Simulação computacional do escoamento na seção de testes de um túnel de vento." *Revista Interdisciplinar Pensamento Científico* 7.2 (2021).

CAMARGO, José Rui. "Resfriamento evaporativo: climatização ecológica." *Rio de Janeiro: Editora Moderna* (2009).

Carossi, G. A. B., Resfriamento evaporativo: Estudo do potencial de sua aplicação no Brasil [Dissertação de mestrado]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Minas Gerais. 2006.

COSTA, José Ângelo Peixoto da. *Utilização de materiais alternativos como enchimento de torres de resfriamento*. MS thesis. Universidade Federal de Pernambuco, 2006.

CAMPANHONI, A. Implantação dos edifícios Águas Claras – DF: Influência no desempenho térmico ambiental dos espaços abertos. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, 2011.

Carminatti, Luiz Jyonathan, and Rodrigo Konrath. "Desenvolvimento de um túnel de vento subsônico com foco no ensino didático." *Anais da Engenharia Mecânica/ISSN 2594-4649* 4.1 (2019): 17-33.

de Melo Júnior, Júlio César Ferreira, et al. "Eficiência de resfriamento evaporativo de almofadas compostas de bucha vegetal." *Comunicata Scientiae* 10.1 (2019): 38-44.

Martins, Ana Vitória C., Lara Rebecca GP Delgado, and Polliana Cândida. "Projeto e construção de túnel de vento didático." *Semana Nacional de Ciência e Tecnologia* (2018): 34-36.

de Oliveira, Reginaldo Soares. "Eficiência de painéis de fibras vegetais utilizados para sistemas de resfriamento evaporativo direto: um estudo experimental." *Revista Tecnologia* 33.1 (2012): 32-4

de Oliveira, Reginaldo Soares. "Análise experimental e numérica da eficiência de resfriamento de painéis de fibras vegetais utilizados em sistemas de resfriamento evaporativo." (2011)

Djibrilla, Alio Sanda M., et al. "Investigation of evaporative cooling pad material from *Hyphaene thebaica* fibers." (2021).

GONZÁLEZ-CRUZ, E. M., EL KRÜGER, and Dominique E. GIORDANO. "Estudo da aplicabilidade de um sistema de resfriamento evaporativo indireto para otimização do conforto térmico em residências no território brasileiro." *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO* 15 (2014).

Haruna, Ibrahim U., et al. "Análise teórica de desempenho de resfriador evaporativo direto em climas quentes e secos." *Internacional J. Ciência. Tecnologia. Res* 3.4 (2014): 193-197.

Hosseini, R., A. Beshkani e M. Soltani. "Melhoria de desempenho das turbinas a gás da usina de ciclo combinado de Fars (Irã) por meio do resfriamento do ar de admissão usando um resfriador evaporativo de mídia." *Conversão e Gestão de Energia* 48.4 (2007): 1055-1064.

Jain, JK e DA Hindoliya. "Desempenho experimental de novos materiais de almofadas de resfriamento evaporativo." *Cidades e Sociedade Sustentáveis* 1.4 (2011): 252-256

Kapilan, N., Arun M. Isloor e Shashikantha Karinka. "Uma revisão abrangente sobre sistemas de resfriamento evaporativo." *Resultados em Engenharia* (2023): 101059.

Liao, Chung-Min e Kun-Hung Chiu. "Túnel de vento modelando o desempenho do sistema de placas de resfriamento evaporativo alternativas na região de Taiwan." *Construção e meio ambiente* 37.2 (2002): 177-187.

Liao, Chung-Min, Sher Singh e Tin-Sen Wang. "Caracterizando o desempenho de meios alternativos de resfriamento evaporativo em aplicações de controle térmico ambiental." *Jornal de Ciência Ambiental e Saúde Parte A* 33.7 (1998): 1391-1417.

Machado, Neiton Silva, et al. "Desenvolvimento e avaliação de painéis evaporativos constituídos a partir de bucha vegetal (*Luffa cylindrica*), fibras de coco (*Cocos nucifera*) e fibras de sisal (*Agave sisalana*)." *Revista Semiárido De Visu* 12.1 (2024).

Malli, Abdollah, et al. "Investigando o desempenho de almofadas de resfriamento evaporativo celulósico." *Conversão e Gestão de Energia* 52.7 (2011): 2598-2603.

Maurya, Rajesh, Nitin Shrivastava e Vipin Shrivastava. "Avaliação de desempenho de meios alternativos de resfriamento evaporativo." *Jornal Internacional de Pesquisa Científica e de Engenharia* 5.10 (2014): 676-684.

Mioralli, Paulo Cesar, and Elson Avallone. "Construção de um túnel de vento didático com aplicação pedagógica no ensino técnico." *Educação em Revista* 39 (2023): e39236.

Mola, Andrea, Luca Heltai, and Antonio De Simone. "Nonlinear free surface potential flow simulations for hulls with a transom stern operating in dry and wet

conditions." *18th International Conference on Ships and Shipping Research, NAV 2015*. The European Marine Energy Centre Ltd, 2015.

Rauf, S.Bobby. *Termodinâmica simplificada para engenheiros de energia: e engenheiros em outras disciplinas* . Editoras Rio, 2023.

Rauf, S.Bobby. *Termodinâmica simplificada para engenheiros de energia* . Editoras Rio, 2021.

Rawangkul, Ratanakorn, et al. "Análise de desempenho de uma nova almofada de resfriamento evaporativo sustentável feita de fibra de coco." *Revista Internacional de Engenharia Sustentável* 1.2 (2008): 117-131

Santos, Marco Antonio Medeiros dos. "Análise técnica e econômica para utilização de insumos alternativos em um sistema de resfriamento evaporativo-adsortivo aplicado ao condicionamento de ar." (2005).

Sartori, Luciano Wotikoski, Daivid de Castro Soeiro, and Harerton Oliveira Dourado. "Construção de um Túnel de Vento Didático." *Jornada de Iniciação Científica da FAACZ. Aracruz: FAACZ* (2017).

Tejero-González, Ana e Antonio Franco-Salas. "Resfriamento evaporativo direto de superfícies molhadas: Desafios para uma solução de ar condicionado limpa." *Revisões Interdisciplinares Wiley: Energia e Meio Ambiente* 11.3 (2022): e423.

Tejero-González, Ana, and Antonio Franco-Salas. "Optimal operation of evaporative cooling pads: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151 (2021): 111632.

Vieira, Rômulo Valente Custódio. "Análise da eficiência energética e conforto térmico do Instituto de Biologia." (2014)

Vigoderis, Ricardo Brauer, et al. "Construção de túnel de vento reduzido, visando à avaliação de argila expandida em sistemas de resfriamento adiabático evaporativo



para arrefecimento térmico em galpões de produção animal." *Engenharia na Agricultura* 15.3 (2007): 191-199.

Yan, Mingxuan, et al. "Investigação experimental sobre um novo arranjo de meio úmido para resfriamento evaporativo do ar." *Jornal Internacional de Refrigeração* 124 (2021): 64-74.