

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA – CEFET/RJ

Avaliação da eficiência de um protótipo de geração de água do ar atmosférico com uso do módulo termoelétrico: célula Peltier

**Estudo de caso de viabilidade de segurança hídrica para populações vulneráveis no
semiárido brasileiro e africano**

Jelil Adeleke Salami

Leonardo Campos Gonzalez

Matheus Guilherme Romeiro Barcaro

Prof. Orientador: D.Sc. Carlos Eduardo Guedes Catunda

Rio de Janeiro

Agosto de 2024

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Avaliação da eficiência de um protótipo de geração
de água do ar atmosférico com uso do módulo
termoelétrico: célula Peltier**

**Estudo de caso de viabilidade de segurança hídrica para população vulneráveis no
semiárido brasileiro e africano**

Jelil Adeleke Salami

Leonardo Campos Gonzalez

Matheus Guilherme Romeiro Barcaro

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: D. Sc. Carlos Eduardo Guedes Catunda

Rio de Janeiro

Agosto de 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

- S159 Salami, Jelil Adeleke
Avaliação da eficiência de um protótipo de geração de água do ar atmosférico com uso do módulo termoelétrico: célula Peltier estudo de caso de viabilidade de segurança hídrica para população vulneráveis no semiárido brasileiro e africano / Jelil Adeleke Salami, Leonardo Campos Gonzalez [e] Matheus Guilherme Romeiro Barcaro. — 2024.
xii, 76f. + anexo : il.(algumas color). ; enc.
- Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2024.
Bibliografia : f. 73-76
Orientador: Carlos Eduardo Guedes Catunda
1. Engenharia mecânica. 2. Energia – Análise. 3. Higrometria. 4. Desenvolvimento de recursos hídricos. I. Gonzalez, Leonardo Campos. II. Barcaro, Matheus Guilherme Romeiro. III. Catunda, Carlos Eduardo Guedes (Orient.). IV. Título.
- CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por nos possibilitar chegar até aqui e poder completar mais uma etapa em nossas vidas, passando intactos por um dos momentos mais difíceis dos últimos anos, a pandemia, pois sem a permissão Dele, nada disso seria possível.

Às nossas famílias que foram fundamentais naqueles momentos difíceis em que pensamos em desistir, nos incentivando, ouvindo, compreendendo, dando atenção e base em toda a longa trajetória até a formação, possibilitando a realização do curso.

Aos professores da universidade, pelos ensinamentos que nos permitiram aprender a estudar, pensar de forma crítica e a ser um engenheiro, transmitindo conhecimentos técnicos e principalmente experiências profissionais, em especial ao Prof. Dr. Carlos Catunda pela orientação, conselhos e dicas compartilhados de forma assertiva possibilitando a realização deste trabalho e ao Prof. Amir Venancio Ferreira.

Aos colegas de curso, pela amizade criada, apoio, companheirismo, troca de experiências e união do grupo que nos fizeram persistir a essa caminhada que por vezes parecia ser impossível ou muito longa para ser completada.

RESUMO

Este estudo consistiu no projeto e construção de um aparato experimental (protótipo) de um sistema real de geração e captura hídrica a partir da fase vapor de água presente no ar atmosférico para o consumo humano/animal. Abordou-se o conceito de desumidificação pelo arrefecimento dos gases do ar com análise experimental e metodologias numérico-computacionais de análise energética. O protótipo experimental de captura hídrica possui um módulo termoelétrico/célula Peltier operando como um arranjo de ventiladores para arrefecer uma superfície/placa em contato que estará em contato com o módulo, buscando a condensação de vapor de água presente no ar. O ar atmosférico é insuflado de encontro à superfície trocadora de calor em configuração de corrente cruzada e paralela. O condensado (fase líquida) é capturado em recipiente localizado abaixo do coletor de condensado e o ganho de massa líquida é quantificado logo após cada teste, assim como a energia requerida por esse processo psicrométrico de desumidificação. Complementarmente, foram empregadas simulações computacionais comparativas do fenômeno termodinâmico envolvido para validar o protótipo experimental. O dispositivo foi operado em distintos locais e períodos do ano com condições atmosféricas diferentes, com ampla variabilidade de umidade relativa e temperaturas atmosféricas.

A comparação dos dois modelos mostrou que o modelo numérico prevê um consumo energético por geração de condensado igual a $1,15 \times 10^{-6}$ kWh/ml, enquanto o modelo experimental teve um consumo energético por geração de condensado igual a 5×10^{-5} kWh/ml. Também, observou-se que o modelo numérico opera com uma eficiência de condensação aproximada de 77,15%, enquanto o modelo experimental teve uma eficiência de condensação de água de aproximadamente 9%. Em consequência a geração de água calculada no modelo numérico foi de 1400 ml/h, enquanto o modelo experimental consegue condensar somente 1,7 ml/h.

Essas três (3) comparações, sugerem na sua globalidade que o modelo experimental ainda está longe de ser tão eficiente quanto o modelo numérico nos aspectos de consumo energético por geração de condensado, eficiência de condensação e geração de água.

Esta metodologia pode ser replicada em quaisquer outros locais, como por exemplo, o semiárido brasileiro e africano. Os resultados deste estudo sugerem o potencial de implementação do protótipo em áreas em situação de estresse hídrico. Dessa forma, este estudo busca justamente prospectar alternativas viáveis para a geração e obtenção de recursos hídricos básicos (água) para manutenção da vida e da dignidade humana.

Palavras chaves: Análise Energética, Psicrometria, Geração Hídrica, AWG, Módulos Termelétrico/Célula Peltier.

ABSTRACT

This study consisted of the design and construction of an experimental apparatus (prototype) of a real system for generating and capturing water from the water vapor phase present in atmospheric air for human/animal consumption. The concept of dehumidification by cooling air gases was addressed with experimental analysis and numerical-computational methodologies for energy analysis. The experimental prototype for water capture has a thermoelectric module/Peltier cell operating as an arrangement of fans to cool a surface/plate in contact with the former, seeking the condensation of water vapor present in the air. The atmospheric air is blown against the heat exchanger surface in a cross-current and parallel configuration. The condensate (liquid phase) is captured in a container located below the condensate collector and the gain in liquid mass is quantified immediately after each test, as well as the energy required by this psychrometric dehumidification process. In addition, comparative computer simulations of the thermodynamic phenomenon involved were used to compare to the experimental prototype. The device was operated in different locations and periods of the year with different atmospheric conditions with wide variability of relative humidity and atmospheric temperatures.

The comparison of the two models showed that the numerical model had an energy consumption per condensate generation equal to 1.15×10^{-6} kWh/ml, while the experimental model had an energy consumption per condensate generation equal to 5×10^{-5} kWh/ml. It was also observed that the numerical model operates with an approximate condensation efficiency of 77.15%, while the experimental model had a water condensation efficiency of approximately 9%. Finally, the water generation in the numerical model was 1400 ml/h, while the experimental model can condense 1.7 ml/h.

These three (3) comparisons suggest that the experimental model is still far from being as efficient as the numerical model in terms of energy consumption per condensate generation, condensation efficiency and water generation.

This methodology can be replicated in any other location, such as the Brazilian and African semi-arid regions. The results of this study suggest the potential for implementing the prototype in areas under water stress. Thus, this study seeks to prospect viable alternatives for the generation and obtaining of basic water resources (water) for the maintenance of life and human dignity.

Keywords: Energy Analysis, Psychrometry, Water Generation, AWG, Thermoelectric/Peltier Cell Modules.

Sumário

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT.....	vi
Lista de figuras.....	x
Lista de tabelas.....	xii
Lista de abreviaturas e símbolos	13
Capítulo 1.....	15
1. Introdução	15
1.1. Justificativa	16
1.2. Objetivo.....	18
1.2.1. Objetivos Específicos.....	18
1.3. Organização do Trabalho	19
Capítulo 2.....	20
2. Revisão Bibliográfica.....	20
Capítulo 3.....	24
3. Revisão Teórica.....	24
3.1. Efeito Peltier.....	24
3.2. Psicometria.....	25
3.2.1. Ar úmido	25
3.2.2. Propriedades Termodinâmicas	27
3.2.3. Carta Psicrométrica	32
3.2.4. Processos Psicrométricos	33
3.3. Interactive Thermodynamics.....	37
3.3.1. Primeira lei da termodinâmica	38

Capítulo 4.....	40
4. Metodologia	40
4.1. Construção do protótipo	40
4.2. Métodos.....	46
4.2.1. Limitações do experimento	47
4.2.2. Tratamentos dos dados de testes experimentais.....	48
4.3. Simulação numérica	48
4.3.1. Análise paramétrica.....	49
4.3.2. Método de avaliação da eficiência do protótipo	50
4.3.2.1. Consumo energético	50
4.3.2.1.1. Medição de corrente e de tensão requeridas pelo módulo Peltier.....	50
4.3.2.2. Eficiência de condensação de água	51
4.3.2.3. Geração de água	52
Capítulo 5.....	53
5. Análise e discussão de resultados	53
5.1. Resultados do modelo experimental	53
5.1.1. Impacto da temperatura média do dissipador frio sobre o volume de condensado gerado	53
5.1.2. Impacto da temperatura média do ambiente sobre o volume de condensado gerado	55
5.1.3. Impacto da umidade relativa média sobre o volume de condensado gerado	56
5.1.4. Impacto da variação da pressão atmosférica média sobre o volume de condensado gerado	57
5.1.5. Relação entre o volume de condensado gerado e a temperatura de ponto de orvalho média.....	58
5.1.6. Variação de volume de condensado gerado e umidade relativa média com a relação temperatura do dissipador frio / temperatura do ambiente média	59
5.1.7. Avaliação do consumo energético por geração de condensado	60

5.1.8.	Avaliação da eficiência de condensação de água.....	61
5.1.9.	Avaliação de geração de água	62
5.2.	Resultados do modelo numérico	62
5.2.1.	Impacto da temperatura do ar atmosférico sobre o volume de condensado gerado 62	
5.2.2.	Impacto da temperatura do ar de saída sobre o volume de condensado gerado ..	63
5.2.3.	Impacto da umidade relativa do ar atmosférico de entrada sobre o volume de condensado gerado	64
5.2.4.	Avaliação do consumo energético por geração de condensado	65
5.2.5.	Avaliação da eficiência de condensação de água.....	66
5.2.6.	Avaliação de geração de água	66
Capítulo 6	.....	68
6.	Estudo de caso de implementação do protótipo em regiões semiáridas africanas	68
Capítulo 7	.....	71
7.	Conclusão	71
Bibliografia	.....	73
Anexo 1	.....	77
Anexo 2	.....	78
Anexo 3	.....	79
Anexo 4	.....	80
Anexo 5	.....	83

Lista de figuras

Figura 1 - Projeção de estresse hídrico em 2040.....	18
Figura 2 - Célula Peltier	25
Figura 3 - Composição de ar atmosférico	26
Figura 4 - Carta psicrométrica à pressão atmosférica a nível do mar $P = 101,325 \text{ kPa}$	33
Figura 5 - Aquecimento sensível.....	34
Figura 6 - Resfriamento sensível.....	35
Figura 7 - Umidificação do ar	35
Figura 8 - Desumidificação do ar.....	36
Figura 9 - Aquecimento e desumidificação do ar	36
Figura 10 - Resfriamento e Desumidificação do ar	37
Figura 11 - Resfriamento e Umidificação do ar	37
Figura 12 - Esquema (croquis) do protótipo	41
Figura 13 - Vista global do protótipo	41
Figura 14 - Vista de topo do protótipo	42
Figura 15 - Vista inferior da tampa do protótipo	42
Figura 16 - Vista interna da tampa do protótipo	43
Figura 17 - Vista do interior da caixa do protótipo	43
Figura 18 - Módulo termoelétrico	45
Figura 19 - Termo-higrômetro	46
Figura 20 - Modelagem de processo de desumidificação	49
Figura 21 - Medição da corrente elétrica no módulo Peltier.....	51
Figura 22 - Medição da tensão no módulo Peltier	51
Figura 23 - Formação de gelo no dissipador frio	54
Figura 24 - Gráfico de volume de condensado por área do dissipador frio x temperatura do dissipador frio.....	54
Figura 25 - Gráfico de volume de condensado por área do dissipador frio x temperatura do ambiente média	56
Figura 26 - Gráfico de volume de condensado por área do dissipador frio x umidade relativa média	57
Figura 27 - Gráfico de volume de condensado por área do dissipador frio x variação da pressão atmosférica média	58
Figura 28 - Gráfico de volume de condensado por área do dissipador frio x temperatura de	

ponto de orvalho média	59
Figura 29 - Gráfico de volume de condensado por área do dissipador frio e umidade relativa média x $R_{T_{D.F.M}} / T_{A.M}$	60
Figura 30 - Gráfico de volume de condensado por área do dissipador frio e consumo de energia x $R_{T_{D.F.M}} / T_{A.M}$	61
Figura 31 - Gráfico de volume de condensado gerado por área do dissipador frio x temperatura do ar atmosférico à mesma umidade	63
Figura 32 - Gráfico de volume de condensado gerado por área do dissipador frio x temperatura do ar na saída do sistema.....	64
Figura 33 - Gráfico de volume de condensado por unidade de área do dissipador frio x umidade relativa do ar atmosférico a 27 °C	65
Figura 34 - Comparação da temperatura diurna alta dos últimos 20 anos entre Brasil e Marrocos	69
Figura 35 - Comparação da temperatura noturna mínima dos últimos 20 anos entre Brasil e Marrocos	70
Figura 36 - Comparação da umidade relativa dos últimos 20 anos entre Brasil e Marrocos...	70

Lista de tabelas

Tabela 1 – Análise comparativa de geração hídrica entre diversos pesquisadores.....	22
Tabela 2 -Composição do ar (Fonte: Adaptado de ASHRAE2009)	26
Tabela 3 - Propriedades críticas dos componentes do ar seco	27
Tabela 4 - Constantes do ar padrão	27
Tabela 5 - Especificações técnicas da pastilha Peltier	44
Tabela 6 – Dados de entrada do modelo numérico	50
Tabela 7 - Dados experimentais registrados para formação de gelo.....	53

Lista de abreviaturas e símbolos

ϕ	Umidade relativa
AWG	Gerador de água atmosférica
c_{ar}	Calor específico do ar seco
c_p	Calor específico (J/kg.K)
c_{pm}	Calor específico úmido [kJ/kg de ar seco]
c_{va}	Calor específico do vapor de água [1,84 kJ/ (kg de vapor da água) · °C]
h	Entalpia (J)
$h_{\acute{a}gua}$	Entalpia específico da água à 0 °C e pressão atmosférica de 101,325kPa = 2499,86 kJ/kg
H_{as}	Entalpia ar seco [kJ/kg]
H_{esp}	Entalpia específica do ar úmido [kJ/kg]
H_{va}	Entalpia de vapor de água [kJ/kg]
p	Pressão total da mistura (kPa)
P_{da}	Pressão parcial de ar seco [Pa]
P_{sat}	Pressão de saturação [Pa]
P_{va}	Pressão de vapor d'água [Pa]
p_w	Pressão parcial de vapor da água [Pa]
p_{ws}	Pressão de saturação do vapor da água [Pa]
Q_h	Taxa de transferência de calor [J]
$R_{T_{D.F.M}} / T_{A.M}$	Relação adimensionalizada da temperatura do dissipador frio pela temperatura do ambiente média
TEC	Resfriadores termoelétricos
TEM	Módulo termoelétricos
T_{BS}	Temperatura de bulbo seco (°C)
T_{BU}	Temperatura de bulbo úmido (°C)
T_f	Temperatura final [°C]
T_i	Temperatura inicial [°C]
T_{po}	Temperatura de ponto de orvalho [°C]
V_{ma}	Vazão mássica ar seco vazão mássica de ar seco [Kg de ar seco / s]
w	Razão da mistura

W	Trabalho [J]
Δh	Varição de entalpia específica [kJ/kg]
ΔU	variação da energia interna do sistema
ω	Umidade absoluta [Kg da água/ Kg de ar seco]
ω_s	Umidade de saturação [Kg da água/ Kg de ar seco]
ω_{sBU}	Umidade absoluta para a temperatura de bulbo úmido

Capítulo 1

1. Introdução

- Contextualização do problema da segurança hídrica em regiões semiáridas.

A segurança hídrica é uma questão crítica que afeta milhões de pessoas em todo o mundo, especialmente em regiões semiáridas. As regiões semiáridas são caracterizadas por baixas precipitações e altas taxas de evaporação, resultando em condições de seca frequentes. Essas condições tornam difícil para as comunidades locais acessarem água potável suficiente para suas necessidades diárias.

No Brasil, a região semiárida se estende por diversos estados, com predominância no Nordeste, mas também alcançando partes do Centro-Oeste e Sudeste. Nessa vasta área, a escassez de água é uma dura realidade para inúmeras comunidades. Na África, a situação é semelhante em países como Marrocos, Argélia e Líbia, bem como em toda a região sul do continente, que inclui Namíbia, Botsuana, Zimbábue, África do Sul, Lesoto e Essuatíni. Grandes populações nesses países vivem em áreas semiáridas, enfrentando desafios comparáveis. Essas nações apresentam semelhanças com outros países da América Latina que enfrentam dificuldades semelhantes, como Peru e Chile.

A falta de acesso a água potável tem implicações profundas para a saúde, a educação e a economia dessas regiões. Pode levar a problemas de saúde relacionados à água, como desidratação e doenças transmitidas pela água. Também pode limitar as oportunidades de educação, pois as crianças muitas vezes têm que passar horas todos os dias buscando água em vez de frequentar a escola. Além disso, pode restringir as oportunidades econômicas, pois a agricultura e outras atividades que dependem da água são limitadas.

Portanto, encontrar soluções para melhorar a segurança hídrica em regiões semiáridas é de extrema importância. Uma dessas soluções pode ser a geração de água a partir do ar atmosférico, que é o foco deste projeto. Através do uso de tecnologias como Módulos Termelétrico/Célula Peltier, é possível a extração da umidade do ar e convertê-la em água potável, proporcionando uma fonte de água sustentável para essas comunidades vulneráveis.

- Importância da geração de água a partir do ar atmosférico como uma solução potencial.

A geração de água a partir do ar atmosférico é uma tecnologia emergente que tem o potencial de fornecer uma solução sustentável e ecologicamente correta para a crise da água em regiões semiáridas. Esta tecnologia, também conhecida como gerador de água atmosférica (AWG), envolve a captura de umidade do ar e sua conversão em água potável.

Existem várias razões pelas quais a geração de água a partir do ar atmosférico é considerada uma solução potencial importante para a segurança hídrica:

1. **Fonte de água renovável:** Ao contrário dos recursos hídricos subterrâneos ou superficiais, a umidade do ar é uma fonte de água renovável que está disponível em quase todos os lugares na Terra, mesmo em regiões semiáridas.
2. **Independência de infraestrutura de distribuição:** A geração de água a partir do ar atmosférico não requer uma infraestrutura de distribuição de água extensa, tornando-a uma solução ideal para áreas remotas ou de difícil acesso. Isso se deve, pois, o AWG é um processo de abrangência local.
3. **Qualidade da água:** A água gerada a partir do ar atmosférico é geralmente de alta qualidade e pode ser mais segura para beber do que a água de fontes subterrâneas ou superficiais, que podem estar contaminadas.
4. **Adaptabilidade às mudanças climáticas:** Como a geração de água a partir do ar atmosférico não depende de precipitação ou níveis de água subterrânea, ela pode ser uma solução mais resiliente às mudanças climáticas.

Este estudo visa avaliar a eficiência de um protótipo de geração de água do ar atmosférico usando um módulo termoelétrico e explorar sua viabilidade como uma solução para a segurança hídrica em regiões semiáridas do Brasil e da África. Através desta pesquisa, espera-se contribuir para os esforços contínuos para resolver o problema da segurança hídrica nessas regiões e melhorar a vida de seus residentes.

1.1. Justificativa

A Figura 1 mostra a projeção de estresse hídrico mundial em 2050 (SAMMIS, 2018). Embora o Brasil não esteja destacado neste mapa, estima-se que 40% do território nacional

tem ameaças relacionadas à água, passando por um processo denominado por especialistas como “estresse hídrico” (DISERO, 2019), sendo que o Brasil detém cerca de 12% da água doce disponível no planeta (ANDREW, TIEN e SARAH, 2014). Distrito Federal, Ceará, Paraíba, Rio de Janeiro e Pernambuco são os estados mais afetados e São Paulo, com 70% do seu território em situação crítica, impacto da superpopulação e das práticas agrícolas que esgotam o solo (DISERO, 2019), (WRI BRASIL, 2022).

Na África, um estudo de caso (SÂMELLA e NÁTANE, 2020) realizado em Moçambique avaliou as condições de segurança hídrica do país mediante as condições naturais, a vulnerabilidade social e a governança hídrica. O estudo constatou que a segurança hídrica de Moçambique passa por ameaças que estão associadas não somente às suas condições naturais climáticas, mas sobretudo, às suas políticas de intervenção que têm negligenciado a realidade de vulnerabilidade hídrica no país.

Esses estudos de caso destacam a complexidade dos desafios relacionados à segurança hídrica em regiões semiáridas e a necessidade de abordagens integradas e adaptativas para enfrentar esses desafios.

O presente estudo é realizado no Brasil e segundo a (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2021), mais de 2 bilhões de pessoas vivem em países com estresse hídrico, sem acesso a água. Tendo em vista que do total de água do mundo, 97% são salgadas e 3% são doces, menos de dois terços dessa água doce está própria para consumo (WORLD WIDE FUND FOR NATURE, 2017).

A técnica predominante de produção de água que é a dessalinização se refere ao conjunto de processos que retiram sais e outros componentes minerais da água salgada para, por exemplo, o consumo humano. Métodos existentes de dessalinização da água do mar (nano filtração; formação de hidratos gasosos; destilação solar; eletro diálise; osmose reversa (IBERDROLA, 2021)) combinados, resolvem parcialmente os problemas de abastecimento de água, mas são caracterizados por altos custos de energia e recursos (BILENKO e TITLOV, 2021). No entanto, urge a necessidade de inserção de outros métodos viáveis para produção de água potável para uso humano.

Como alternativa a essa problemática, já existem AWG capazes de produzir água com eficácia de 4 l/kW (THE TIMES OF ISRAEL, 2017). Por exemplo, os geradores de água atmosférica da empresa Watergen têm uma capacidade de produção de 4 l/kWh de água potável (INBENC, 2020). A tecnologia da empresa também facilita a produção significativa de água em climas com umidade tão baixa quanto 20%, o que consiste em uma alternativa para as regiões semiáridas com umidade relativa baixa.

É nessa lógica que este estudo propõe-se avaliar a eficiência de um protótipo de geração de água do ar atmosférico com uso do Módulo termoeletrônico/Célula Peltier, como uma solução eficiente tanto financeira quanto estrutural para a segurança hídrica em regiões semiáridas. A avaliação da eficiência deste protótipo e a análise da sua viabilidade em cenários reais nos semiáridos brasileiro e africano podem contribuir significativamente para a busca de soluções para a crise da água nessas regiões.

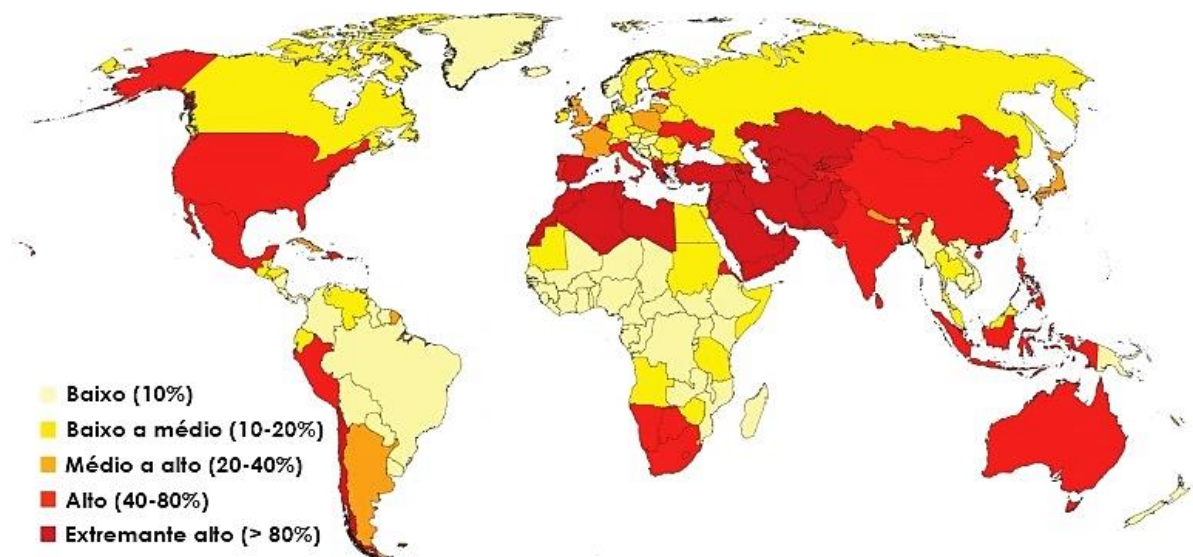


Figura 1 - Projeção de estresse hídrico em 2040.

(Fonte: Equattoria)

1.2. Objetivo

O objetivo do presente trabalho é avaliar a eficiência de um protótipo experimental de geração de água a partir do ar atmosférico com uso da célula Peltier. Será realizada uma modelagem matemática e termodinâmica do processo AWG com uma posterior análise computacional empregando o software *Interactive Thermodynamis* (IT) para fim de validação da eficiência do protótipo experimental.

1.2.1. Objetivos Específicos

- Construir um protótipo de geração de água do ar.
- Realizar testes de geração de água com o protótipo.
- coletar os dados e resultados.
- Modelar matematicamente/termodinamicamente o fenômeno psicrométrico de geração de água do ar.
- Realizar uma análise numérica e paramétrica no IT com os dados de testes.
- Avaliar a eficiência do protótipo comparando os resultados de testes experimentais/empíricos com a análise computacional.

1.3. Organização do Trabalho

O trabalho está organizado de forma ao Capítulo 1 dar uma breve introdução ao tema e apresentar o objetivo do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma sucinta revisão bibliográfica acerca do assunto abordado neste trabalho.

No Capítulo 3 será apresentada a fundamentação teórica que serviu como embasamento para o desenvolvimento do protótipo, realização dos testes e a rotina computacional utilizada.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia adotada neste trabalho com descrição detalhada do protótipo, incluindo o projeto [*design*] e os materiais utilizados. Apresentação do modelo computacional, aproximações utilizadas e procedimento experimental para obtenção dos resultados experimentais. Descrição dos métodos utilizados para avaliar a eficiência do protótipo.

No Capítulo 5 são mostrados os resultados dos testes, os quais são comparados com os resultados numéricos através de uma análise sucinta destes resultados.

O Capítulo 6 é um estudo de caso que discute sobre a viabilidade de implementação do protótipo fabricado e impacto na segurança hídrica das populações vulneráveis.

No Capítulo 7 serão apresentadas as conclusões finais e serão feitas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

2. Revisão Bibliográfica

A eficiência dos protótipos de geração de água do ar atmosférico tem sido objeto de vários estudos. (DA SILVA, 2018) analisou o potencial brasileiro para a captação de água da atmosfera e desenvolveu protótipos para este fim. O estudo observou diferentes tecnologias utilizadas em diversos países do mundo, como o resfriamento passivo, módulos termoelétricos, sistemas de climatização, uso de materiais porosos, uso de gelo e de refrigeradores como superfícies condensadoras. A pesquisa também realizou uma estimativa de rendimento anual de orvalho para a cidade de Viçosa, com média anual noturna de temperatura e de umidade relativa do ar de cerca de 16,36°C e 92,73% respectivamente, foi de cerca de 47,18 mm. Além disso, o estudo realizou um experimento ativo usando módulos termoelétricos, onde a maior quantidade de água que poderia ser coletada foi de cerca de 2,04 l/m².h com um consumo de cerca de 7,20 kWh.

(ESLAMI, TAJEDDINI e ETAATI, 2018) apresentaram um estudo experimental de análise térmica e otimização de um sistema de captação de água do ar úmido utilizando resfriadores termoelétricos (TEC). Eles usaram análise de sensibilidade para encontrar o número ideal de TECs. O sistema resultante é capaz de produzir 26 ml/h de água a partir do ar com 75% de umidade relativa e temperatura de 45°C, consumindo apenas 20 Watts de energia elétrica.

(SHANSHAN, WEI, *et al.*, 2017) apresentaram uma análise experimental de gerador portátil de água atmosférica pelo método de resfriamento termoelétrico. O sistema experimental contém um umidificador, uma câmara de mistura, um canal de ar e um gerador de água com 2 TECs. O sistema resultante pode gerar 25,1 g/h com o uso de 58,2 Watts de entrada.

(UTTASILP, PATCHARAPRAKITI, *et al.*, 2018) apresentaram um estudo sobre energia solar ótima em refrigerador termoelétrico de gerador de água em estudo de caso sobre crise de enchentes. O protótipo foi construído e testado em temperatura em torno de 30 °C e umidade na faixa de 60-80 %. Os resultados mostram que 0,2-0,3 l/dia de água potável é obtido com consumo de energia de 2,5-3,6 W.

(RUNZE, QINGFEN, *et al.*, 2020) apresentaram uma investigação experimental sobre um gerador portátil de água atmosférica. O sistema é composto por um módulo gerador de água, um módulo purificador de água, um módulo de alimentação e controle e um módulo de fluabilidade. Os resultados mostraram que a melhor taxa de produção de água de 460 ml/h

foi alcançada em temperatura de 27 °C e umidade relativa de 92 %.

(ATUL, TEJAS, *et al.*, 2021) apresentaram um estudo sobre gerador de água atmosférica movido a energia solar e uma visão geral das tecnologias AWG. Eles compararam duas tecnologias diferentes, como o sistema de compressão de vapor que pode produzir água a 72,1 ml/kWh e o AWG com efeito Peltier que pode produzir água a 1 l/kWh em condições de alta umidade.

(PONTIOUS, WEIDNER, *et al.*, 2016) apresentaram um estudo experimental sobre o projeto de um gerador de água atmosférica. Construíram dois protótipos, um com trocador de calor de fluxo cruzado e outro com resfriador termoelétrico. Esses protótipos foram construídos para operar sob faixa de temperatura de bulbo seco de 13 a 54 °C e faixa de UR de 52% a 100%. Em termos de desempenho, ambos os protótipos tiveram um bom desempenho. Eles propuseram que estas tecnologias pudessem ser utilizadas para irrigação agrícola em vez de tecnologia de dessalinização.

(KADHIM, ABBAS e HAYDER, 2020) construíram um protótipo AWG. O protótipo era movido a energia solar e portátil com um módulo Peltier acoplado a ventiladores em ambas as extremidades do módulo. Os autores buscavam aumentar a geração de água a partir do AWG proposto aumentando a taxa de fluxo de ar no lado mais quente do módulo Peltier. O protótipo gerou cerca de 9,5ml/h. na velocidade do fluxo de ar de 1 m/s, mas após aumentar a taxa de fluxo de ar no lado mais quente do módulo Peltier, a água gerada foi aumentada para 20 ml/h. na mesma velocidade do fluxo de ar, ou seja, 1m/s.

O trabalho de (HENKER, RODRIGUES, *et al.*, 2014), consistiu-se em fazer uso do sistema Peltier em configuração compacta para geração de água potável. O dispositivo é composto por uma caixa de poliestireno expandido, pastilha Peltier, dissipadores de alumínio, ventilador, reservatório plástico e funil. Com umidade relativa de 80%, conseguiu-se até 2,6 l/m².h e um consumo energético aproximadamente de 7,92 kWh/l de água obtido.

O estudo de (MELO, 2019) , baseou-se na construção de um dispositivo compacto que utiliza o sistema Peltier para geração de água a partir da condensação do ar atmosférico. Obteve-se uma média de produção do condensado de 100 ml durante cinco horas de funcionamento, o que equivale a 20ml/h, com a umidade relativa média igual a 60% e a temperatura do ponto de orvalho em torno de 22 °C.

(AL HERR e ELSARRAG) exploraram a possibilidade de obter água potável a partir de unidades de refrigeração de ar-condicionado, comumente usadas em instalações residenciais, comerciais e industriais na região do Golfo. Os resultados mostraram uma produção de 0,3 l/kWh de água, o que sugere a viabilidade de gerenciar esse recurso,

considerando que a precipitação anual na região é de cerca de 80 mm.

No estudo de (BADR, 2009), foram utilizadas bobinas de refrigeração semelhantes às usadas em aparelhos de climatização. Para uma umidade relativa típica da região da Arábia Saudita (entre 30% e 70%), foram obtidos 700 ml/m²h para uma velocidade de ar de 2,25 m/s. A mesma pesquisa, realizada entre agosto e fevereiro, resultou em valores médios de 600 ml/m²h.

De outro lado, (ALI, MOHAMMAD, *et al.*, 2020) apresentaram uma revisão sobre o nexo água-energia para a produção de água potável a partir do ar úmido. Propuseram que a utilização de energias renováveis é a solução para a redução dos custos energéticos. E propuseram que a água pode ser captada com tecnologias como estrutura natural, coleta de neblina, seleção subterrânea, geradores de água atmosférica e método de absorção.

A Tabela 1 abaixo resume os resultados das pesquisas mencionadas acima com base em: a quantidade de geração de condensado, o consumo energético, as condições climáticas e o tipo de equipamento/dispositivo empregado.

Tabela 1 – Análise comparativa de geração hídrica entre diversos pesquisadores

Autores	Geração hídrica [l/h]	Consumo Energético [kW]	Temperatura TBS [°C]	Umidade Relativa U_r [%]	Tipo de equipamento
Eslami, M. et al. (2018)	0,026	0,02	45	75	TEC
Shanshan, L. et al. (2017)	0,252	0,0582	24,29	67,8	TEC
Uttasilp. C, et al. (2018)	8×10^{-3} $12,5 \times 10^{-3}$	0,0025 0,0036	30	60 80	Refrigerador termelétrico
Du Runze. D. et al. (2020)	0,46	0,24	27	92	Gerador portátil de água
Atul, E. et.al. (2021)	1	0,12	30	50	Efeito Peltier

Kadhim, Abbas e Hayder (2020)	0,0095 0,02	0,07	24 31	60 75	AWG
Henker ,E. et al. (2014)	2,6	7,92	30	80	Efeito Peltier
Melo (2019)	0,02	-	31	60	Efeito Peltier
Al Horr e Elsarrag	0,3	1	15 30	60	Ar- condicionado
Badr (2009)	0,017	-	25 40	30 100	Bobinas de refrigeração

Capítulo 3

3. Revisão Teórica

3.1. Efeito Peltier

A Célula Peltier mostrada na Figura 2, também conhecida como módulo termoelétrico, é um dispositivo que utiliza o Efeito Peltier para criar uma diferença de temperatura entre dois lados do dispositivo. Este efeito, descoberto pelo físico francês Jean Charles Athanase Peltier em 1834, ocorre quando uma corrente elétrica passa por uma junção de dois materiais diferentes, resultando em uma absorção ou liberação de calor.

Na prática, quando uma corrente é aplicada através de um dispositivo termoelétrico, ela transporta calor de um lado do dispositivo para o outro. Como resultado, um lado se torna mais frio (lado de absorção de calor) enquanto o outro lado se torna mais quente (lado de liberação de calor). Este processo é reversível: invertendo a direção da corrente, inverte-se também a direção do fluxo de calor (GENERATEPRESS, 2024).

O módulo Peltier é constituído por várias junções termoelétricas em série ou paralelo, usualmente feitas de materiais semicondutores. Estas junções são colocadas entre duas placas de material condutor para assegurar uma distribuição uniforme de calor (GENERATEPRESS, 2024).

No contexto da geração de água a partir do ar atmosférico, a célula Peltier pode desempenhar um papel crucial, visto que é uma tecnologia barata, de fácil entendimento e acessível para a maior parte do mundo. A ideia é usar o lado frio abaixo da temperatura de orvalho da atmosfera para condensar a umidade do ar, transformando-a em água líquida. Este processo pode ser particularmente útil em regiões semiáridas, onde a água é escassa, mas a umidade do ar ainda está presente (HENKER, RODRIGUES, *et al.*, 2014).

No entanto, é importante notar que a eficiência deste processo pode ser afetada por vários fatores, incluindo a umidade relativa do ar, a diferença de temperatura que o dispositivo Peltier pode criar, e a quantidade de energia elétrica necessária para alimentar o dispositivo.

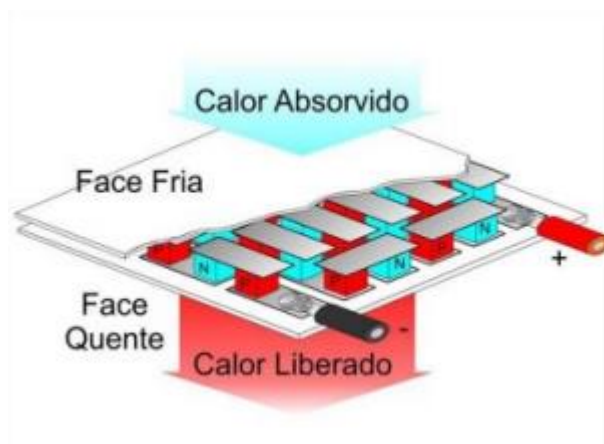


Figura 2 - Célula Peltier
(Fonte: EasyTrom Labs)

3.2. Psicometria

A psicrometria é a ciência que estuda as propriedades do ar úmido, sendo uma disciplina essencial em muitas áreas da engenharia, como a climatização e refrigeração. Ela se concentra na interação entre as propriedades físicas e termodinâmicas do ar e do vapor de água. Essas propriedades incluem temperatura, umidade, pressão e densidade (MORAN, SHAPIRO, *et al.*, 2014).

A geração de água do ar atmosférico é um conceito que se correlaciona diretamente com a psicrometria. Trata-se de um processo que extrai água do ar úmido do ambiente. Este processo é realizado por meio de dispositivo como gerador de água atmosférica (AWG), que extrai água do ar através de condensação. Isto é, resfriando o ar abaixo de seu ponto de orvalho.

Portanto, a psicrometria e a geração de água do ar atmosférico estão intrinsecamente ligadas, pois ambas lidam com as propriedades do ar úmido e a interação entre o ar e o vapor de água. No presente trabalho, a compreensão dessas propriedades é crucial para a eficácia de extração de água do ar, tornando a psicrometria uma ferramenta valiosa para otimizar o processo.

3.2.1. Ar úmido

O ar atmosférico é o principal elemento do presente estudo e é considerado como a mistura de ar seco, vapor de água e impurezas com mostra a Figura 3 abaixo.

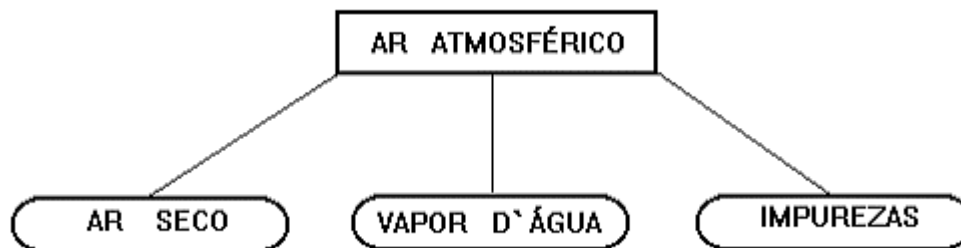


Figura 3 - Composição de ar atmosférico

O ar seco é composto principalmente por nitrogênio (78,09% em volume), oxigênio (20,95% em volume), argônio (0,93% em volume) e dióxido de carbono (0,03% em volume). Além desses, há traços de gases nobres como neônio, hidrogênio, hélio, criptônio, ozônio, entre outros (SEWELL, 1978).

A composição geral do ar seco é atualizada regularmente pela ASHRAE, a principal organização científica do clima do mundo. De acordo com (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, 2009), a composição do ar seco é definida como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 -Composição do ar (Fonte: Adaptado de ASHRAE2009)

Componentes	Nomenclatura	Composição (%)
Nitrogênio	N_2	78,084
Oxigênio	O_2	20,9476
Argônio	Ar	0,934
Dióxido de Carbono	CO_2	0,0314
Hélio	He	0,000524
Metano	CH_4	0,00015
Dióxido de enxofre	SO_2	0,0001
Hidrogênio	H_2	0,00005
Criptônio, Xenônio e Ozônio	Kr, Xe, O_3	0,0002

A quantidade de vapor de água no ar atmosférico varia consideravelmente, pois é condensável a pressões e temperaturas usuais. A presença de vapor de água no ar indica a umidade do ar atmosférico, que é crucial para a regulação da temperatura na Terra. A umidade relativa do ar é de extrema importância para a saúde dos seres vivos (SEWELL, 1978).

As propriedades do ar úmido são apresentadas na forma de tabelas termodinâmicas ou cartas psicrométricas. Para o estudo dos processos normalmente encontrados no campo da

psicrometria, o ar úmido é formado pela mistura de dois gases: o vapor d'água e o ar seco. Esta aproximação é válida em ampla faixa de temperatura, considerando que as condições ambientes estão bastante longe das propriedades críticas dos componentes do ar seco. As tabelas (Tabela 3 e Tabela 4) mostram respectivamente as propriedades críticas dos três primeiros componentes do ar seco e as constantes do ar padrão a 26.85 °C ou 300K. Portanto, para o presente estudo, as condições ambientais se enquadram perfeitamente.

Tabela 3 - Propriedades críticas dos componentes do ar seco

Componentes	Temperatura Crítica (°C)	Pressão Crítica (kPa)
Nitrogênio (N_2)	-147.13	3394,39
Oxigênio (O_2)	-118.6	5045,98
Argônio (Ar)	-122.4	4873,73

Tabela 4 - Constantes do ar padrão

Propriedades	Valor
Aceleração da gravidade normal, g	9,80665 m/s ²
Constante de gás para o ar, R	287 J/kg°C
Densidade do ar ao nível do mar, ρ_{ar}	1,201 kg/m ³
Calor específico à pressão constante do ar, c_p	1,0048 kJ/kg°C
Calor específico a volume constante do ar, c_v	0,717 kJ/kg°C

Vale destacar também que as massas moleculares dos principais componentes do ar úmido são: O_2 (32 g/mol), N_2 (28 g/mol) e H_2O (18 g/mol). Essas massas moleculares são importantes para entender a densidade e a pressão parcial dos componentes do ar úmido (Mudanças Climáticas Globais, 2018).

3.2.2. Propriedades Termodinâmicas

A psicrometria usa propriedades termodinâmicas para analisar os processos e propriedades do ar úmido (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, 2009), sendo o modelo das misturas de gases ideais a principal ferramenta usada para determinar as suas propriedades e, a carta psicrométrica a principal forma de visualização dos processos de Engenharia.

- a) Temperatura de bulbo seco (T_{BS});

A temperatura de bulbo seco (T_{BS}) é medida por meio de um termômetro padrão, colocado no ambiente, e não sofre influência da umidade relativa do ar (ALMEIDA, 2004). Atualmente, a maioria dos sensores de temperatura são sensores de bulbo seco, tais como: termopares, entre outros componentes de instrumentação. Cada um tem seu próprio recurso de sinal indicador de temperatura.

b) Temperatura de bulbo úmido (T_{BU})

A temperatura do bulbo úmido é uma medida de temperatura que reflete a evaporação da água no ar, lida por um termômetro coberto com um pano úmido. Quando a umidade relativa é de 100%, a temperatura do bulbo úmido é igual à temperatura do ar; em umidade mais baixa, a temperatura do bulbo úmido é menor devido ao resfriamento evaporativo. A temperatura do bulbo úmido é a temperatura mais baixa que pode ser alcançada apenas pela evaporação da água e é uma indicação da quantidade de umidade no ar.

c) Umidade relativa (ϕ)

A umidade relativa (ϕ) fornece uma correspondência entre a quantidade de vapor d'água presente em um sistema e a quantidade máxima de vapor d'água que o sistema retém a uma dada temperatura e pressão. Pode ser calculada pela razão entre a umidade absoluta (ω) e a umidade de saturação (ω_s) como mostra a equação (1).

$$f = \frac{\omega}{\omega_s} \quad (1)$$

A relação da quantidade de umidade obtida (ω), estabelece a proporção em relação ao valor máximo ou umidade do estado (ω_s). Esta equação também é função da pressão de saturação (P_{sat}) e da pressão de vapor d'água (P_{va}), que também é mostrada na equação (2).

$$f = \frac{P_{va}}{P_{sat}} \quad (2)$$

d) Umidade absoluta

A umidade absoluta é uma medida que representa a massa de vapor de água presente em um determinado volume de ar seco. Ela é expressa em unidades de massa por volume (kg/m^3 de ar seco) (Portal São Francisco, 2020).

A umidade absoluta é diretamente influenciada pelas massas moleculares dos elementos constituintes do ar e do vapor de água. O ar seco é composto principalmente de nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2), com densidades de massa de $1,165 \text{ kg/m}^3$ e $1,331 \text{ kg/m}^3$, respectivamente. O vapor de água, por outro lado, é a forma gasosa da água (H_2O), cuja massa molecular é determinada pela soma das massas atômicas do hidrogênio e do oxigênio (Manual da Química, 2018).

A quantidade de vapor de água que o ar pode conter depende da temperatura: quanto mais quente o ar, mais água ele pode absorver. Isso ocorre porque a energia térmica facilita a evaporação da água, aumentando a quantidade de vapor de água no ar. Portanto, a umidade absoluta pode variar com as condições ambientais, como temperatura e pressão. Podemos calcular a umidade absoluta utilizando a equação (3) abaixo.

$$\omega = 0,621945 \frac{P_w}{P - P_w} \quad (3)$$

Em que:

ω : umidade absoluta $\left[\frac{\text{kg}_{\text{água}}}{\text{kg}_{\text{ar seco}}}\right]$;

P: pressão total da mistura [Pa];

P_w : pressão parcial do vapor d'água [Pa].

Sendo que para o ar saturado de umidade, o conteúdo de umidade atinge o valor máximo. O conteúdo de umidade na saturação é calculado pela equação acima, substituindo a pressão parcial do vapor d'água pela pressão de saturação do vapor d'água, como mostra a equação (4).

$$\omega = 0,621945 \frac{P_{ws}}{P - P_{ws}} \quad (4)$$

ω : umidade absoluta $\left[\frac{\text{kg}_{\text{água}}}{\text{kg}_{\text{ar seco}}}\right]$;

P: pressão total da mistura [Pa];

P_{ws} : pressão de saturação do vapor d'água [Pa].

O teor de umidade na saturação também pode ser obtido em função da temperatura de bulbo seco ou em função da temperatura de bulbo úmido, de modo que irá estar ligado a qual temperatura foi usada no cálculo da pressão de saturação do vapor d'água. De outra forma, há também a possibilidade de calcular o teor de umidade com a equação (5) (AMERICAN

SOCIETY OF HEATING, 2009).

$$\omega = \frac{(2501 - 2,326T_{BU})\omega_{s_{BU}} - 1,006(T_{BS} - T_{BU})}{(2501 + 1,86T_{BS} - 4,186T_{BU})} \quad (5)$$

Em que:

ω : umidade absoluta [$\frac{kg_{\acute{a}gua}}{kg_{ar\ seco}}$];

$\omega_{s_{BU}}$: umidade absoluta na saturação para a temperatura de bulbo úmido [$\frac{kg_{\acute{a}gua}}{kg_{ar\ seco}}$];

T_{BS} : temperatura de bulbo seco [$^{\circ}C$];

T_{BU} : temperatura de bulbo úmido [$^{\circ}C$].

e) Entalpia específica (h)

Expressa o conteúdo de energia do ar (calor absoluto) por unidade de massa de ar úmido em relação ao estado de referência ($T_{BS} = 0$) e inclui o conteúdo de calor sensível e latente.

Se a diferença de temperatura existe entre os valores finais (T_f) e iniciais (T_i), e for realizado o produto com o calor específico (c_p), será obtida a diferença de entalpia específica (Δh) considerando um gás ideal, conforme equação (6).

$$\Delta h = c_p(T_f - T_i) \quad (6)$$

Ao considerar que o ar atmosférico está livre de poluentes, nosso objeto de estudo acaba sendo o ar úmido, que conforme visto é a mistura de ar seco com vapor de água. A entalpia específica desta mistura (h), é a soma da entalpia do ar seco (h_{as}) e a entalpia do vapor de água (h_{va}), conforme equação (7).

$$h_{esp} = h_{as} + h_{va} \quad (7)$$

Se for considerada a temperatura de bulbo seco (T_{BS}) do ambiente em relação aos valores de calor específicos na temperatura de referência de $0^{\circ}C$, pode ser calculada a entalpia específica conforme demonstra a equação (8) (ASHARE,2009).

$$h_{esp} = C_{ar} \cdot T_{BS} + w \cdot (h_{\acute{a}gua \ \grave{a} \ 0^{\circ}C} + C \cdot T_{BS}) \quad (8)$$

Em que:

h_{esp} : entalpia específica do ar úmido [kJ/kg];

T_{BS} : temperatura de bulbo seco [$^{\circ}C$];

w : razão de mistura [$\frac{kg_{vapor\ da\ água}}{kg_{ar\ seco}}$];

c_{ar} : calor específico do ar seco [1,006 kJ/kg $_{ar\ seco}$ * $^{\circ}C$];

c_{va} : calor específico do vapor de água [1,84 kJ/ kg $_{vapor\ da\ água}$ * $^{\circ}C$];

$h_{água\ à\ 0\ ^{\circ}C}$: entalpia específica da água à 0 $^{\circ}C$ e pressão atmosférica de [101,325 kPa = 2499,86 kJ/kg].

f) Temperatura de orvalho ou saturação

A temperatura do ponto de orvalho é a temperatura na qual o vapor começa a condensar, considerando o ar saturado, ao resfriar, sob pressão constante e umidade absoluta (GATLEY, 2013), por isso também é chamada de temperatura de saturação. Resumidamente, é a temperatura na qual o ponto de orvalho (precipitação de água resultante da condensação do vapor de água no ar) se estabiliza naturalmente. Este valor depende da pressão do vapor de água e umidade.

A temperatura do ponto de orvalho é determinada pela carta psicrométrica Figura 4 e pode ser calculada a partir da temperatura do ar (T) e da umidade relativa (f) usando a equação (9) tirada da bibliografia (LAWRENCE, 2005).

$$T_{po} = \frac{B_1 * \alpha(T, f)}{A_1 - \alpha(T, f)} \quad (9)$$

onde:

$$\alpha(T, f) = \frac{A_1 * T}{B_1 + T} + \ln f;$$

$$A_1 = 17,625;$$

$$B_1 = 243,04 [^{\circ}C].$$

g) Pressão de saturação do vapor d'água

É a pressão parcial exercida pelas moléculas de vapor de água presente no ar (ROSSI, 1987). Como o ar úmido é considerado uma mistura binária, sendo considerados gases perfeitos - ar seco e vapor d'água - considerado uma mistura, onde a pressão absoluta (P) da mistura é dada somando a pressão parcial de ar seco (P_{DA}) e a pressão parcial de vapor d'água

(P_{va}) como mostra a equação (10) (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, 2009):

$$P = P_{DA} + P_{va} \quad (10)$$

Em que:

P: pressão total da mistura [Pa];

P_{DA} : pressão parcial do ar seco [Pa];

P_{va} : pressão do vapor d'água [Pa].

3.2.3. Carta Psicrométrica

O estado do ar atmosférico a uma determinada pressão é completamente descrito por duas variáveis termodinâmicas independentes. As restantes propriedades podem ser calculadas através de expressões apresentadas mais adiante neste subcapítulo, ou através da consulta do gráfico psicrométrico, representado na Figura 4. Inicialmente a consulta deste gráfico pode parecer complicada, devido à imensa informação disposta em um único gráfico.

No eixo horizontal está presente a temperatura de bulbo seco, que pode ser descrita como a temperatura ambiente, e no eixo vertical é apresentada a umidade absoluta, ainda no eixo vertical é possível ser observado, em alguns gráficos, a temperatura de ponto de orvalho e a pressão de vapor. A linha curva apresentada à esquerda do gráfico é denominada de linha de saturação, estando nesta linha todas as condições que representam ar saturado, assim como os estados em que a umidade relativa é de 100%.

As linhas curvas iniciadas no topo do gráfico e terminando no lado vertical esquerdo, caracterizam a variação constante de valores de umidade relativa. As linhas inclinadas, com menor declive, representam valores de temperatura de bulbo úmido constante. O volume específico constante é representado por linhas, também inclinadas, embora com o declive mais acentuado. As linhas de entalpia constante apresentam-se quase paralelas às linhas da temperatura de bulbo úmido.

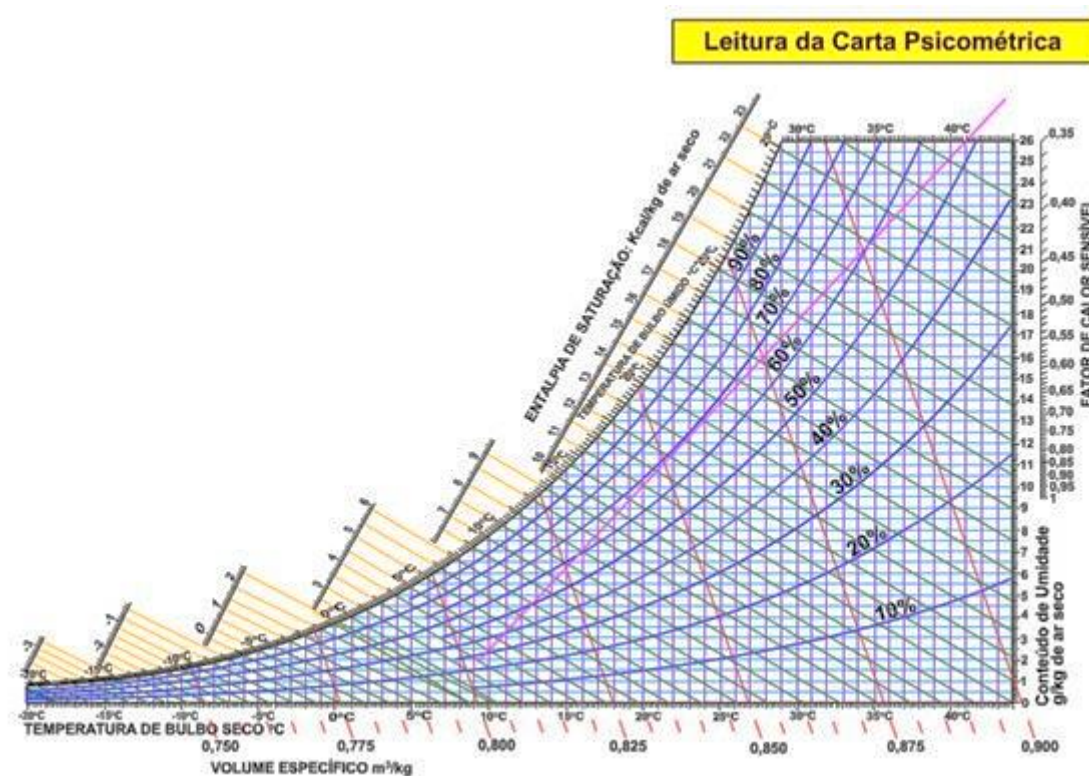


Figura 4 - Carta psicrométrica à pressão atmosférica a nível do mar $P = 101,325 \text{ kPa}$

(Fonte: Mundo do ar e da refrigeração)

3.2.4. Processos Psicrométricos

3.2.4.1. Aquecimento sensível (umidade absoluta constante)

A Figura 5 abaixo mostra o processo de aquecimento sensível, onde a umidade do ar permanece constante e a temperatura sobe à medida que flui sobre uma serpentina de aquecimento. A taxa de transferência de calor durante este processo é dada pela equação (11) abaixo:

$$Q_h = v_{ma} (h_B - h_O) = m_a \cdot c_{pm} (T_B - T_O) \quad (11)$$

Em que:

Q_h = taxa de transferência de calor [J];

v_{ma} = vazão mássica de ar seco $\left[\frac{\text{kg}_{ar\text{seco}}}{\text{s}} \right]$;

h_B = entalpia no ponto B $\left[\frac{\text{kg}_{cal}}{\text{kg}_{ar\text{seco}}} \right]$;

h_O = entalpia no ponto O $\left[\frac{\text{kg}_{cal}}{\text{kg}_{ar\text{seco}}} \right]$;

c_{pm} = calor específico úmido $\sim 1,0216 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{ar\text{seco}}} \right]$;

T_B = temperatura no ponto B [$^{\circ}\text{C}$] ;

T_O = temperatura no ponto O [$^{\circ}\text{C}$] .

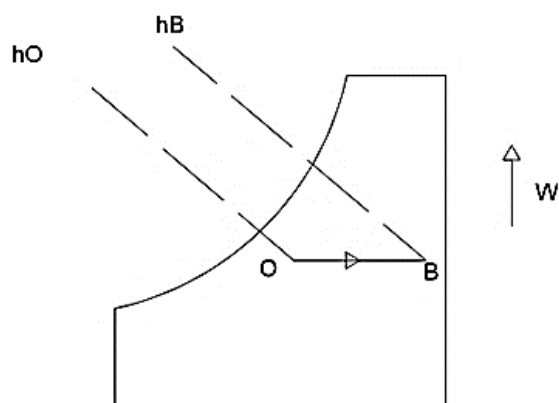


Figura 5 - Aquecimento sensível

3.2.4.2. Resfriamento sensível (umidade absoluta constante)

Durante este processo, a umidade do ar permanece constante, mas sua temperatura diminui à medida que flui sobre a serpentina de resfriamento. Para manter a umidade constante, a superfície da serpentina de resfriamento deve estar seca e sua temperatura na área da superfície deve ser maior que a temperatura do ponto de orvalho.

Se a serpentina de resfriamento é 100% eficaz, então a temperatura do ar de saída será igual à temperatura da serpentina. Porém, na prática, a temperatura do ar de saída ficará acima da temperatura da serpentina de resfriamento. A Figura 6 abaixo mostra o processo de resfriamento O-B crítico na carta psicrométrica. A taxa de transferência de calor durante este processo fornecido pela equação (12):

$$Q_h = m_a (h_O - h_A) = v_{ma} c_{pm} (T_O - T_A) h_o \quad (12)$$

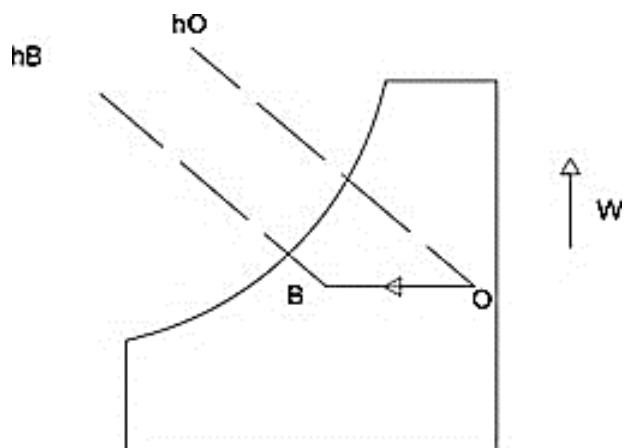


Figura 6 - Resfriamento sensível

3.2.4.3. Umidificação do ar (temperatura de bulbo seco constante)

Conforme a Figura 7, esse processo é caracterizado pelo aumento da umidade específica do ar e pela manutenção da temperatura de bulbo seco constante. Isso é feito adicionando apenas calor latente do ar (evaporação de água), estimulado pela injeção de vapor (fornecido por linhas de vapor superaquecido ou pela evaporação da água aquecida por imersão em resistência elétrica). Como resultado, a umidade relativa do ar aumentará, pois, sua condição se aproximará da curva de saturação.

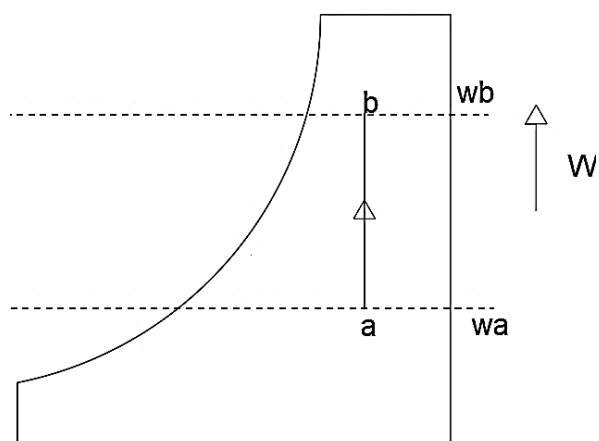


Figura 7 - Umidificação do ar

3.2.4.4. Desumidificação do ar (temperatura de bulbo seco constante)

Conforme a Figura 8, esse processo é caracterizado pela redução da umidade específica do ar e pela manutenção da temperatura de bulbo seco constante. Isso é feito retirando apenas calor latente do ar (condensação de água), estimulado pelo trocador de calor que

deve estar abaixo da temperatura de orvalho daquele ambiente. Como resultado, a umidade relativa do ar diminuirá, pois, sua condição se afastará da curva de saturação.

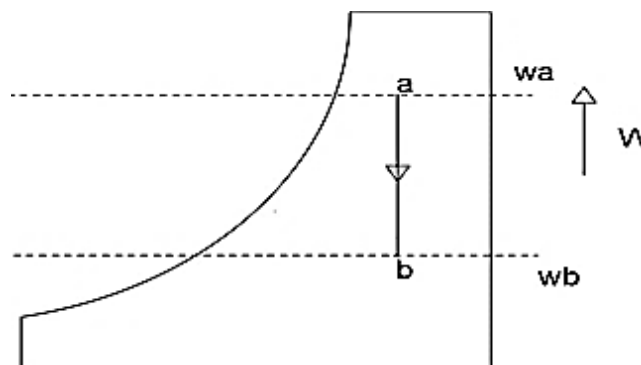


Figura 8 - Desumidificação do ar

3.2.4.5. Aquecimento e desumidificação

Este processo é caracterizado por uma redução da umidade específica do ar (teor de calor latente), acompanhada de um aumento da temperatura do ar seco (teor de calor sensível), conforme mostra a figura 8. Esse processo é geralmente promovido por um desumidificador químico.

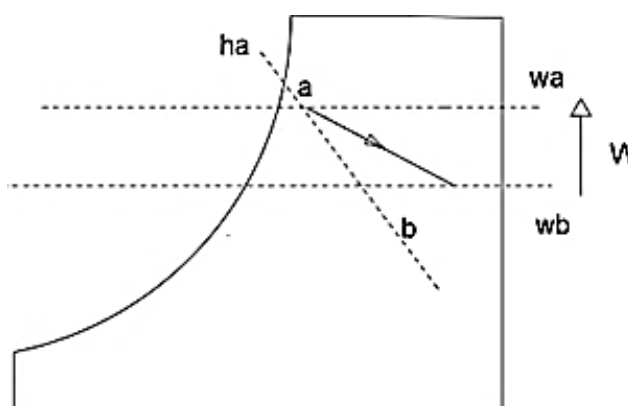


Figura 9 - Aquecimento e desumidificação do ar

3.2.4.6. Resfriamento e desumidificação do ar;

Conforme mostra a figura 10, este processo é caracterizado pela redução simultânea da temperatura de bulbo seco (carga sensível) e da umidade específica (carga latente) do ar. Este processo pode ser estimulado com água fria ou uma bobinade expansão diretamente ou com um purificador de água gelada.

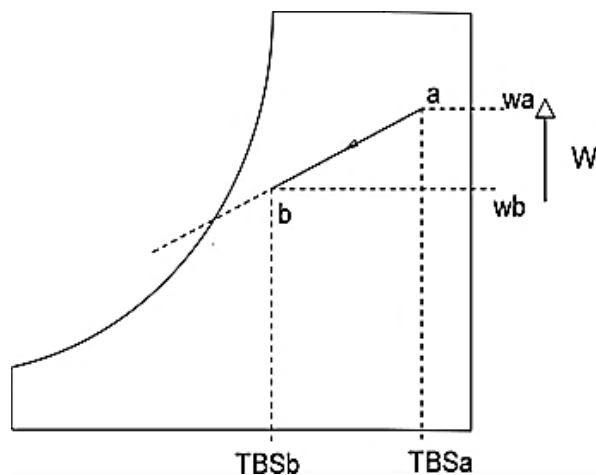


Figura 10 - Resfriamento e Desumidificação do ar

3.2.4.7. Resfriamento e umidificação do ar

Este processo, mostrado na figura 10, é caracterizado por uma redução na temperatura de bulbo seco (ponto B) do ar através da evaporação da água (geralmente pulverizada na corrente de ar), eleva a umidade do ar (ponto A). Quando a água evapora ele retira o calor do ar, reduzindo sua temperatura.

Há uma troca do calor latente da evaporação da água com o calor sensível (correspondente à temperatura da mistura) do ar.

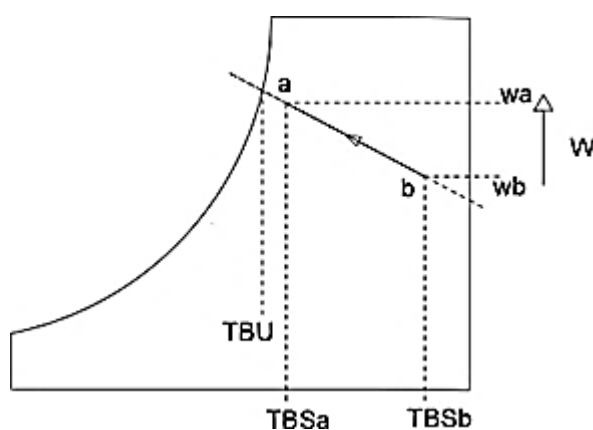


Figura 11 - Resfriamento e Umidificação do ar

3.3. Interactive Thermodynamics

A análise paramétrica é uma técnica de comparação e/ou de avaliação de uma variável

em função de uma função-objetivo que ajuda na tomada de decisões. Nas soluções numéricas, são desenvolvidos modelos virtuais do nosso protótipo a ser estudado que é representado por fundamentos termodinâmicos e conceitos psicrométricos tais quais: calor e trabalho; modelo gás-vapor; modelo de Dalton; transferência de massa; etc.

Neste estudo, será empregado o software *Interactive Thermodynamics* (IT) que é uma ferramenta para avaliar e simular processos termodinâmicos, no caso em questão, processos psicrométricos, conforme descritos na seção 3.6. Optou-se por utilizar o IT porque ele é uma valiosa ferramenta de aprendizado que permite desenvolver modelos de engenharia, realizar análises de simulação e examinar os princípios em maior profundidade. Ele pode ser utilizado não só para resolver problemas rotineiros, fornecendo dados para pontos de status individuais, mas também para simulação e análise.

A ferramenta computacional IT fornece um suplemento essencial para resolver problemas de engenharia e termodinâmica. O programa é construído em torno de um solucionador de equações complementado com dados sobre propriedades termodinâmicas e outros recursos úteis. Como resultado, é possível obter uma solução numérica única ou variar os parâmetros para investigar os seus efeitos. Além disso, o IT também inclui uma série de simulações pré-construídas que ilustram conceitos termodinâmicos importantes, como a primeira e segunda leis da termodinâmica, ciclos de potência e refrigeração, e propriedades de substâncias puras. Por fim, pode-se obter saída gráfica para gerar relatórios usando qualquer processador de texto ou imagem (JOHN WILEY & SONS, INC., 2000-2024).

No contexto do nosso estudo, será feita em um primeiro instante uma validação de programação no IT usando resultados previamente conhecido de um exemplo/exercício didático similar a este estudo de caso. Posteriormente, serão utilizados dados de entrada reais [*inputs*] de testes realizados com o protótipo, para simulação e obtenção de resultados numéricos. Dessa forma, busca-se a comparação dos resultados numéricos com os próprios resultados obtidos nos testes empíricos do protótipo.

3.3.1. Primeira lei da termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica, também conhecida como a lei da conservação de energia, afirma que a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada. Em termos matemáticos, ela é expressa pela fórmula abaixo:

$$\Delta U = Q - W \quad (13)$$

Em que:

ΔU é a variação da energia interna do sistema.

Q é o calor trocado com o meio externo.

W é o trabalho realizado.

No presente trabalho, a primeira Lei da termodinâmica se aplica da seguinte maneira: a energia na forma de calor ou trabalho é usada para resfriar o ar e condensar o vapor de água, transformando-o em água líquida. Essa transformação de energia não viola a primeira lei da termodinâmica, pois a energia total permanece constante durante o processo.

Além disso, será feita uma análise energética de 1ª Lei para comparar com os resultados experimentais que foram obtidos.

Capítulo 4

4. Metodologia

Para atingir os objetivos propostos e testar as hipóteses formuladas, realizou-se um estudo experimental em quatro fases distintas.

A primeira fase constituiu na elaboração e fabricação do protótipo experimental para realização dos testes. Durante a elaboração, foram descartadas várias ideias do protótipo inicial, devido a inviabilidade na sua realização ou a ineficiência quanto aos resultados experimentais buscados.

Na segunda fase, procedeu-se à realização dos testes com o protótipo, medição dos resultados, coleta de dados com suas características quer quantitativas, quer qualitativas.

A terceira fase trata-se de modelagem matemática do processo de desumidificação. Empregou-se o software termodinâmico *Interactive Thermodynamics* (IT) para a elaboração do código de resolução de problemas termodinâmicos. Foi feita a validação do código baseando-se na resolução de um problema similar (MORAN, SHAPIRO, *et al.*, 2014).

Em seguida, adaptou-se o código ao presente caso levando em conta a correta conversão das unidades de engenharia referentes a este primeiro. Após isso, realizou-se as análises paramétricas dos resultados para fim de comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

Finalmente, a quarta fase consiste na etapa de comparação dos resultados obtidos numericamente com os resultados experimentais.

4.1. Construção do protótipo

O protótipo fabricado para este estudo está descrito esquematicamente na Figura 12 abaixo:

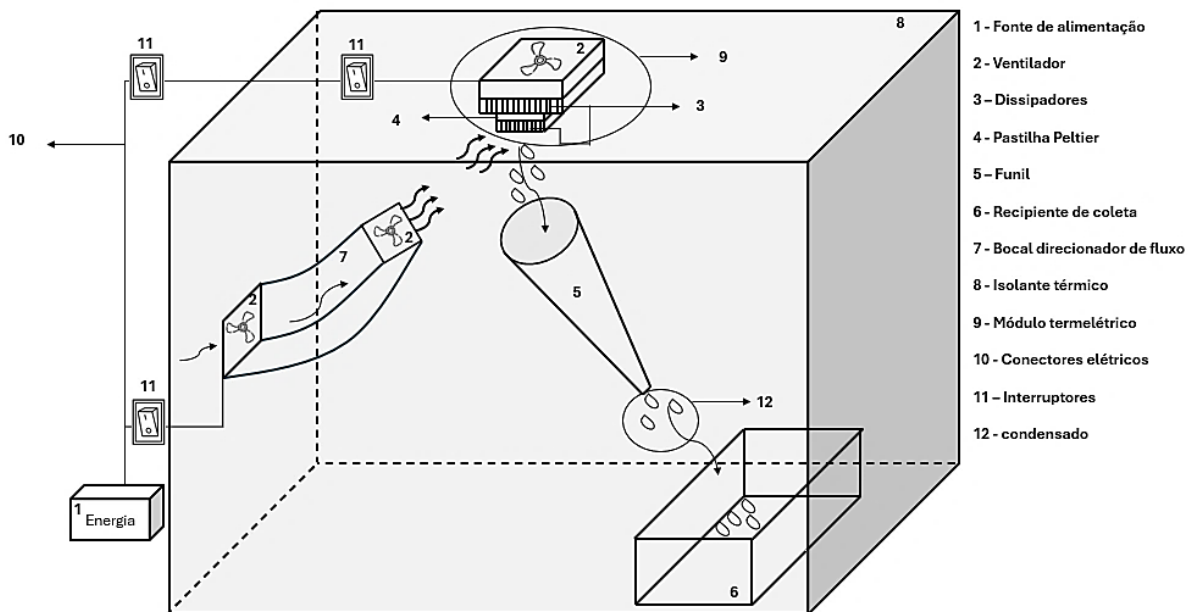


Figura 12 - Esquema (croquis) do protótipo

A sequência de figuras (Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16 e Figura 17) ilustram as vistas global, de topo, interior da tampa, interna da tampa e interior da caixa do protótipo fabricado respectivamente.



Figura 13 - Vista global do protótipo



Figura 14 - Vista de topo do protótipo



Figura 15 - Vista inferior da tampa do protótipo

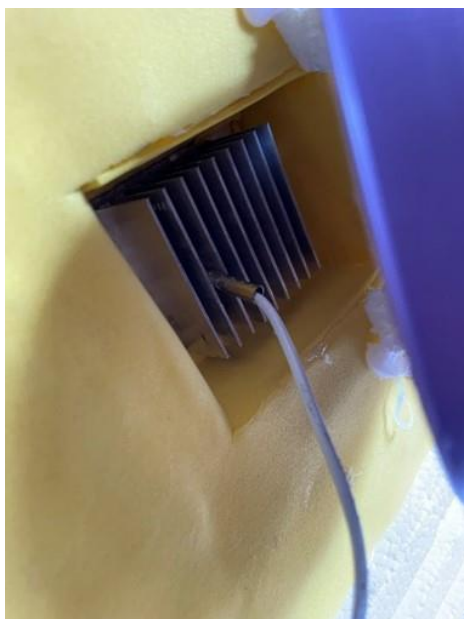


Figura 16 - Vista interna da tampa do protótipo



Figura 17 - Vista do interior da caixa do protótipo

O protótipo é uma construção que busca gerar água a partir do ar atmosférico com uso da célula termelétrica Peltier, visando avaliar a eficiência do sistema e analisar as variáveis envolvidas no processo. O protótipo fabricado consiste nos seguintes componentes principais:

1. Uma fonte de alimentação de 12 Volts e 2 Amperes para fornecer energia elétrica aos componentes do sistema via conexões elétricas.
2. Ventiladores, um localizado na lateral da caixa e o outro fica dentro da caixa direcionado para o dissipador frio. Os dois ventiladores estão colocados nas extremidades do bocal direcionador de fluxo. Eles são responsáveis por favorecer a

admissão do ar ambiente na caixa e sua chegada sobre o dissipador frio, promover a sua circulação e melhorar a eficiência do processo de condensação.

3. Dissipadores, acoplados diretamente a pastilha Peltier com pasta térmica e são responsáveis pela dissipação do calor nos dois lados da pastilha.
4. Pastilha Peltier, responsável pela geração do gradiente de temperatura. A Tabela 5 abaixo resume as especificações técnicas da pastilha Peltier.

Tabela 5 - Especificações técnicas da pastilha Peltier

Especificação	Valor
Modelo	TEC1-12706
Tensão de Operação	0 - 15,2V DC
Corrente Máxima	7,6A
Potência Máxima	91W
Dimensões	40 × 40 × 3,4 mm
Resistência	1,3 ~ 1,5 Ω
Peso	24,0 g
Faixa de Temperatura	-30°C a 80°C
Material de Selagem	Silicone industrial

5. Um funil conectado na tampa logo abaixo do dissipador frio, responsável por melhor direcionar o condensado gerado após a condensação do ar atmosférico para a vasilha de coleta.
6. Um recipiente que fica dentro da caixa, posicionada abaixo do funil para recolher o condensado gerado durante os testes.
7. Um bocal direcionador de fluxo, feito de garrafa PET cortada nas devidas dimensões dos ventiladores e permitindo um melhor direcionamento do fluxo do ar atmosférico.
8. Um isolante térmico de isopor, de 5 litros de capacidade, com 5 centímetros de espessura de parede e 26 centímetros de profundidade, utilizada como câmara de condensação. A caixa e a tampa se encaixam através dos labirintos presentes em cada um deles. Ou seja, todas as características da caixa acima citadas, permitem minimizar a troca de calor entre o interior da caixa e o ambiente externo.

9. Um módulo termoeétrico Figura 18 composto principalmente por uma célula Peltier responsável pela geração do gradiente de temperatura, dois dissipadores de alumínio de tamanhos diferentes, o maior dissipando o lado quente e o menor dissipando o lado frio e um ventilador. O pequeno dissipador ligado ao lado frio da célula Peltier tem a função de resfriar para promover a condensação do ar atmosférico. O cooler é acoplado ao dissipador de maior tamanho e  responsável por dissipar o calor proveniente do lado quente da célula Peltier. O módulo com tensão de 12 Volts e corrente de 6 Amperes está inserido no meio da tampa da caixa de isopor com o dissipador frio para dentro da caixa e o lado quente fica para fora.

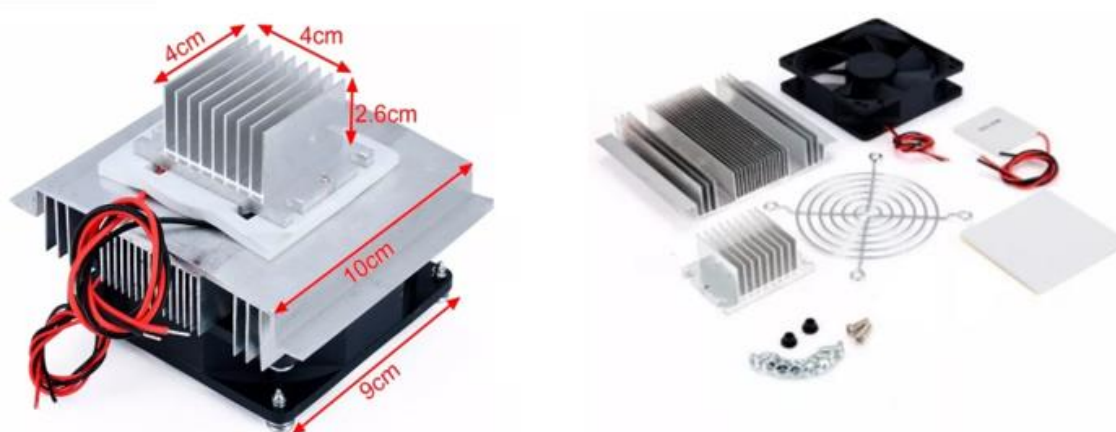


Figura 18 - Módulo termoeétrico
(Fonte: OL Eletronics)

10. Conectores elétricos, são fios elétricos utilizados para conectar os componentes do circuito elétrico.
11. Três interruptores responsáveis respectivamente por ligar e desligar a célula Peltier, o dissipador de calor e os coolers de admissão de ar atmosférico na caixa.
12. Condensado, representa as gotículas de água formadas sobre o dissipador frio após o processo de condensação, que caem dentro do funil e direcionadas para o recipiente de coleta.

Além dos componentes citados acima, o protótipo possui um termo-higrômetro Figura 19, equipado de um visor digital LCD, que faz a medição da temperatura e umidade relativa em

tempo real. Além de medir as temperaturas ambiente externa à caixa e da placa fria localizada dentro da caixa, a umidade relativa do ar (f) os valores máximos (MAX) e mínimos (MIN) também são registrados continuamente. Ele possui uma precisão de medição ± 0.1 °C de temperatura e $\pm 1\%$ de umidade relativa.



Figura 19 - Termo-higrômetro

(Fonte: Mercado Livre)

Foram utilizados também folhas de Etil Vinil Acetato (EVA), cola quente, pedaços de isopor e fita adesiva durante a fabricação do protótipo para melhorar o isolamento térmico do sistema.

4.2. Métodos

O experimento com o protótipo fabricado foi realizado no Brasil no estado de Rio de Janeiro, cidade de Rio de Janeiro, zona norte, bairro Méier no terceiro andar do condomínio Mar Del Azur. Foram realizados 42 testes de duração de 11 horas com medições efetivas. Durante cada teste, o sistema foi monitorado e os seguintes parâmetros foram medidos e registrados conforme (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**):

- Datas: a data na qual o teste foi realizado.

- Testes: cada teste é numerado. Foram realizados mais de 60 testes e só têm 42 com todas as medições efetivas. Ou seja, foram descartados mais de 18 testes devido à formação de gelo, indisponibilidade do sistema de medição entre outros.
- Horários: dependendo do horário no qual foi realizado o teste, espera-se um determinado resultado. Os testes realizados durante à noite têm tendência a gerar mais condensado do que os que foram realizados durante o dia.
- Umidades relativas final, máxima e mínima: são medições feitas diretamente pelo termo-higrômetro.
- Temperaturas final, máxima e mínima do ambiente: medições também realizadas pelo termo-higrômetro, fora da caixa de isopor.
- Temperaturas final, máxima e mínima da placa fria: medições realizadas pelo termo-higrômetro através do sensor conectado diretamente na placa, dentro da caixa de isopor.
- Valor médio da pressão atmosférica: devido à falta de barômetro para medir a pressão atmosférica no exato local do protótipo, foi necessário adquirir esses dados na estação meteorológica mais próxima conforme as datas de realização dos testes (via a estação meteorológica № 66 do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)), disponível no link: <https://meteoro-cefet-front.fly.dev/consulta>.
- Volume de condensado gerado: coletado na vasilha e medido ao final de cada teste com uma seringa graduada de 0 a 10 ml.

4.2.1. Limitações do experimento

Em uma prévia avaliação dos dados coletados durante os testes experimentais, foram percebidas algumas limitações na interpretação efetiva desses dados de ponto de vista de engenharia. Foram realizadas medições em determinado momento (início e final) da operação do protótipo em vez de medições contínuas, ou seja, conforme a variação do tempo. Foi o caso de medições de: temperatura do dissipador quente; temperatura do dissipador frio; vazão volumétrica do ar úmido na entrada do sistema e na frente do dissipador frio; umidade relativa do ar atmosférico durante todo o processo na entrada até a saída. Essas limitações acima mencionadas se devem à indisponibilidade de dispositivos capazes de realizar esses tipos de

medição no protótipo. Por esta razão, será efetuado posteriormente um tratamento dos dados adquiridos durante os testes experimentais do protótipo.

4.2.2. Tratamentos dos dados de testes experimentais

Foi feito um tratamento dos dados coletados durante os testes experimentais para uma melhor adequação com o presente estudo devido às limitações mencionadas na seção 4.2.1. O tratamento de dados consistiu em encontrar um valor médio dos parâmetros (temperatura e umidade) medidos nos pontos mínimo e máximo. Além disso, fez-se necessário adimensionalizar as variáveis (temperatura e volume de condensado), pela relação entre as temperaturas dos dissipadores frio e quente ($R_{T_{D.F.M}} / T_{A.M}$) e a relação entre o volume de condensado gerado e a área de troca de calor do dissipador frio com o ar úmido (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Essas etapas foram realizadas para melhor interpretar os gráficos apresentados na seção 5.

4.3. Simulação numérica

A simulação numérica é uma ferramenta poderosa usada nas ciências termodinâmicas para resolver problemas complexos que podem ser difíceis ou impossíveis de resolver analiticamente. Ela permite aos cientistas e engenheiros modelarem sistemas termodinâmicos e prever seu comportamento sob diferentes condições. Ela envolve a discretização das equações diferenciais que governam o comportamento de um sistema termodinâmico. Estas equações são então resolvidas numericamente para obter uma solução aproximada. Este processo pode ser repetido para diferentes condições iniciais ou parâmetros do sistema, permitindo a exploração de uma ampla gama de cenários.

Empregou-se neste estudo o *Interactive Thermodynamics* (IT) para a realização desta análise. No entanto, para este caso que é um processo de desumidificação do ar atmosférico, a modelagem do ciclo termodinâmico é mostrada na Figura 20 abaixo. No ponto (1), temos as propriedades termodinâmicas do ar úmido ambiente (T_1, ω_1, h_1) antes da sua admissão no sistema de desumidificação e no ponto (2) as do ar que passou pelo processo de desumidificação logo após sua saída do sistema de desumidificação (T_2, ω_2, h_2). No ponto (a), se encontram as propriedades termodinâmicas do vapor d'água condensado (T_a, h_a). Em relação ao sistema de desumidificação, temos as taxas de trabalho e transferência de calor realizados pelo sistema (\dot{W}, \dot{Q}).

Vale destacar que, no design do protótipo experimental, não foi promovida uma saída para que o ar saísse do sistema após o processo de condensação. Isso é devido a não

condensação do ar de entrada no caso de existência da sua saída.

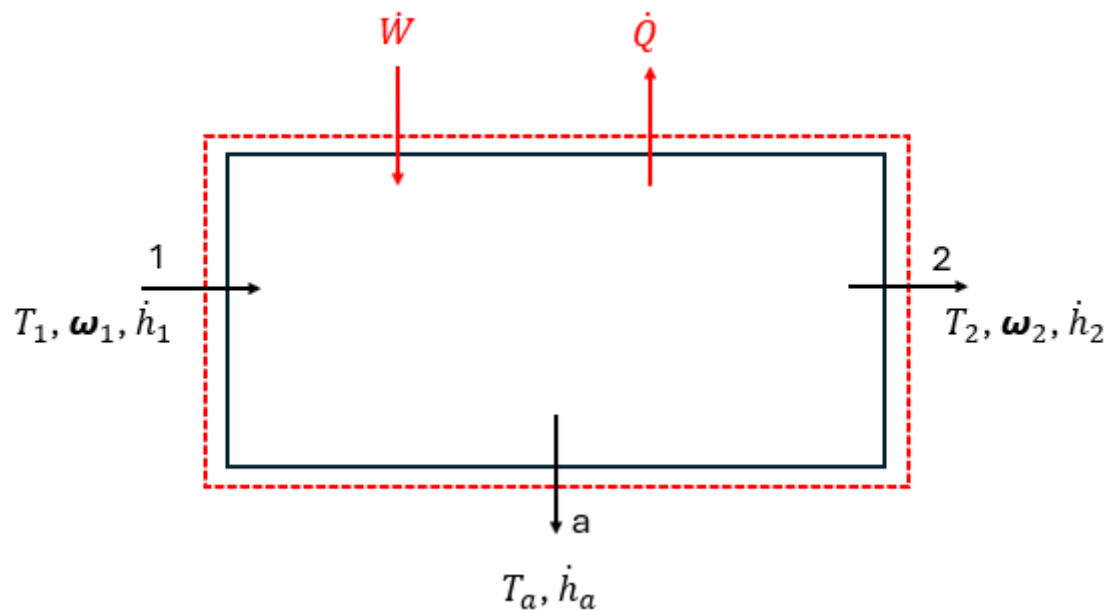


Figura 20 - Modelagem de processo de desumidificação

Como mencionado na seção 4, a terceira fase deste estudo trata-se de modelagem matemática do processo de desumidificação e análises paramétricas dos resultados para fim de comparação com os resultados obtidos experimentalmente. Para isso, foi elaborado um problema (Anexo 1) termodinâmico conforme os experimentos realizados com o protótipo considerados os dados (*inputs*) reais medidos. Em seguida foi programado um código (Anexo 2) de resolução deste problema, código que já foi validado baseando-se no gabarito de um problema similar do livro (MORAN, SHAPIRO, *et al.*, 2014).

4.3.1. Análise paramétrica

Com a obtenção dos resultados (*outputs*) fornecidos pelo IT via a resolução do problema termodinâmico adaptado a este estudo de caso, em seguida foram realizadas as análises paramétricas no intuito de analisar os novos resultados obtidos variando as variáveis de entrada e comparar com os resultados experimentais obtidos. Neste caso, foram variados os parâmetros de entrada seguintes: temperatura do ar úmido na entrada e na saída do sistema; pressão atmosférica; umidade relativa do ar na entrada e na saída do sistema; a vazão volumétrica do ar úmido na entrada do sistema; a área de contato do dissipador frio com o ar úmido e o tempo de operação do sistema. A Tabela 6 abaixo resume os dados de entrada do modelo numérico.

Tabela 6 – Dados de entrada do modelo numérico

Variáveis	Descrição
$t = 11$	Tempo de operação do sistema: 11 horas em (s)
$T_1 = 27$	Temperatura do ar atmosférico ($^{\circ}\text{C}$)
$\Phi_1 = 64\%$	Umidade relativa do ar atmosférico
$T_2 = 14$	Temperatura do ar em (2) ($^{\circ}\text{C}$)
$\Phi_2 = 63\%$	Umidade relativa do ar na saída do sistema
$T_a = 14$	Temperatura do condensado ($^{\circ}\text{C}$)
$p = 101.3$	Pressão atmosférica (kPa)
$m = 425 \cdot 10^{-4}$	Vazão volumétrica do ar úmido fornecido pelo ventilador na entrada (1) (m^3/s)
$A = 20320$	Área de contato do dissipador frio (mm^2)
$D = 20000$	Quantidade de vapor de água em contato com a superfície fria (ml)

4.3.2. Método de avaliação da eficiência do protótipo

Antes da avaliação da eficiência do protótipo, foram realizados testes experimentais com o protótipo e simulações numéricas do modelo matemático do mesmo no IT. Para isto, propõe-se avaliar os três (3) aspectos seguintes dos modelos experimental e numérico:

- consumo energético,
- eficiência de condensação de água,
- geração de água.

4.3.2.1. Consumo energético

Define-se no presente trabalho, o consumo energético como sendo o consumo de energia por unidade de água produzida. Isso é calculado medindo a quantidade de água produzida em um determinado período e a energia consumida durante esse mesmo período. Neste caso, o consumo energético foi calculado no modelo experimental usando a corrente e a tensão requeridas pelo protótipo para sua operação. Enquanto no modelo numérico, esse consumo energético foi calculado usando a relação de balanço de energia.

4.3.2.1.1. Medição de corrente e de tensão requeridas pelo módulo Peltier

A medição da corrente e da tensão foi feita com auxílio de um amperímetro conforme mostrada nas Figura 21 e Figura 22 respectivamente. O valor da corrente medido foi de 2,48 Amperes e a tensão medida foi de 6,15 Volts.



Figura 21 - Medição da corrente elétrica no módulo Peltier



Figura 22 - Medição da tensão no módulo Peltier

4.3.2.2. Eficiência de condensação de água

A eficiência de condensação é avaliada pela quantidade de água que o protótipo é capaz de condensar nos dois modelos a partir de um determinado volume de ar. Isso é calculado medindo a quantidade de água produzida e o volume de vapor da água contido no ar que passou pelo protótipo. Ela será de fato neste caso calculada como a razão entre a quantidade de água coletada e a quantidade de água no ar que passou pelo protótipo e expressa em porcentagem para indicar o quanto de água no ar que o protótipo foi capaz de condensar. No modelo experimental não tinha a possibilidade de variação desse volume de ar, ele foi constante ao longo da operação e para cada teste realizado, em função da ausência de inversor de frequência no ventilador de admissão de fluxo.

Vale salientar também que esta é uma abordagem simplificada pois a eficiência de condensação de água real pode ser afetada por vários outros fatores, como a eficiência do

módulo termoelétrico/célula Peltier, a eficiência do sistema de coleta de água, entre outros.

4.3.2.3. Geração de água

A quantidade de água produzida pelo protótipo é medida em um determinado período, no caso, após 11 horas de operação. Isso fornecerá uma medida direta da capacidade do protótipo de gerar água a partir do ar atmosférico. Da mesma forma, essa geração é avaliada considerando a produção média de água de todos os testes realizados para o modelo experimental durante as 11 horas. Isso porque não foram realizadas medições de quantidade de água produzida pelo protótipo em determinada hora da sua operação.

Capítulo 5

5. Análise e discussão de resultados

Os resultados obtidos do presente estudo se classificam em duas categorias. De um lado os resultados de testes do protótipo fabricado e de outro lado os resultados da simulação numérica. Primeiramente será feita uma análise e discussão dos resultados experimentais. Em seguida será feita a mesma análise e discussão dos resultados obtidos da simulação numérica para fim de comparação.

5.1. Resultados do modelo experimental

5.1.1. Impacto da temperatura média do dissipador frio sobre o volume de condensado gerado

Na Figura 24 abaixo, encontra-se o gráfico de dispersão da variação do volume de condensado gerado por área do dissipador frio em relação a temperatura média do dissipador frio. De forma geral, percebe-se que quanto maior a temperatura do dissipador frio, maior a quantidade de condensado gerado por área do dissipador frio. Isso também é identificado pela linha de tendência em tracejada.

Esse resultado obtido é condizente com a teoria de forma que, quando mais fria a superfície de condensação, mais favorável é o processo de geração de condensado. No entanto, vale destacar que houve a formação de gelo em vez de condensado para condição específica de uma umidade relativa média de 77 %, uma temperatura atmosférica média de 20 °C, uma temperatura do dissipador frio média de 6,5 °C, sendo -4,6 °C a temperatura mínima atingida pelo dissipador frio. A Tabela 7 abaixo mostra todos os dados registrados para a formação do gelo, e a Figura 23 mostra a formação do gelo sobre o dissipador frio nas condições mencionadas acima.

Tabela 7 - Dados experimentais registrados para formação de gelo

DATA	HORÁRIOS	UMIDADE RELATIVA FINAL (%)	TEMPERATUA FINAL AMBIENTE (°C)	TEMPERATURA FINAL PLACA FRIA (°C)	Var. Méd. Pressão Atmosférica (kPa)	VOLUME DE CONDENSADO GERADO (ML)
27/08/2023	18H ÀS 05H	76	19.1	-4.1	102.11	Gelo



Figura 23 - Formação de gelo no dissipador frio

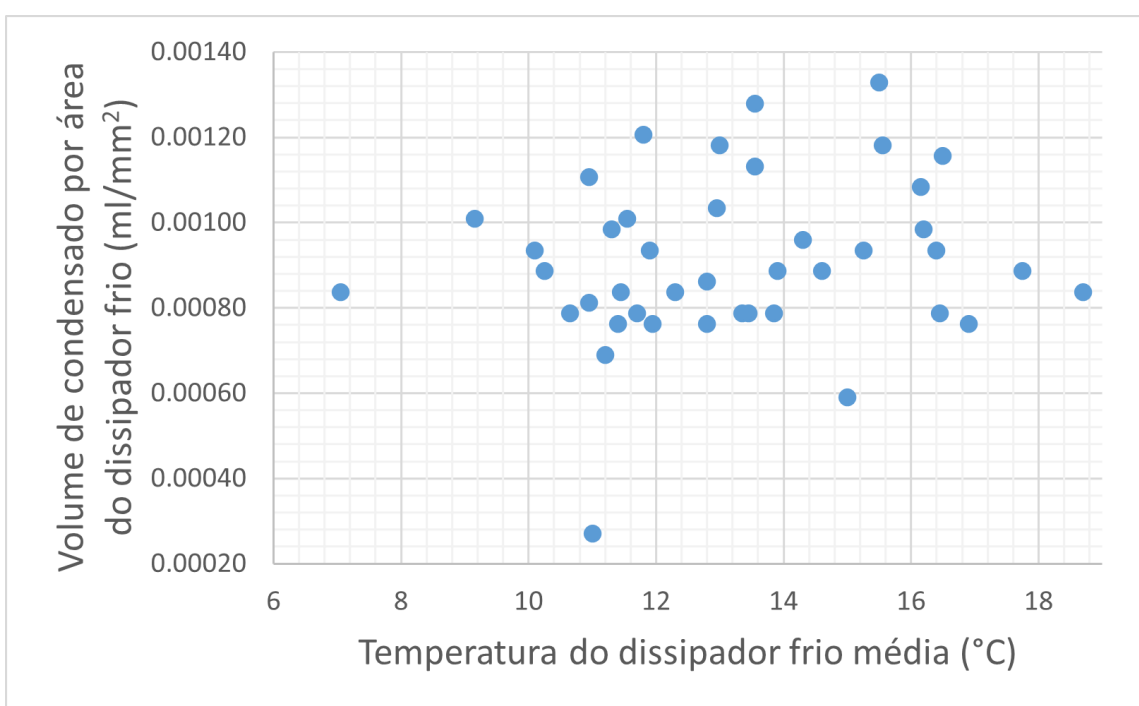


Figura 24 - Gráfico de volume de condensado por área do dissipador frio x temperatura do

dissipador frio

5.1.2. Impacto da temperatura média do ambiente sobre o volume de condensado gerado

O gráfico de dispersão apresentado ilustra a relação entre o volume de condensado gerado por área do dissipador frio e a temperatura média do ambiente. A partir da sua análise e da linha de tendência em tracejada no gráfico, é possível observar um comportamento praticamente linear constante. Ou seja, a quantidade de condensado gerado por área do dissipador frio quase não varia à medida que a temperatura ambiente média varia.

Com base nos conceitos psicrométricos, espera-se que a quantidade de condensado gerado por área do dissipador frio aumente conforme a temperatura ambiente média diminui. A razão para essa tendência pode ser explicada pela eficiência do módulo termoelétrico. O módulo termoelétrico, que é a peça central deste processo de desumidificação, funciona de maneira mais eficiente quando a temperatura do dissipador quente é mais baixa. De outro lado, ela se explica também pelo fato de a temperatura de ar de entrada estar próxima ou abaixo do ponto de orvalho. Finalmente, a temperatura do ar de entrada também pode afetar a taxa de fluxo de ar através do sistema. O ar mais quente é menos denso e pode fluir mais rapidamente, o que pode afetar a quantidade de tempo que o ar passa no sistema e, portanto, a quantidade de água que pode ser condensada.

Conseqüentemente, a junção dessas variações, sendo diferente para cada teste realizado, permite explicar este comportamento praticamente linear constante entre a quantidade de condensado gerado e a variação da temperatura ambiente.

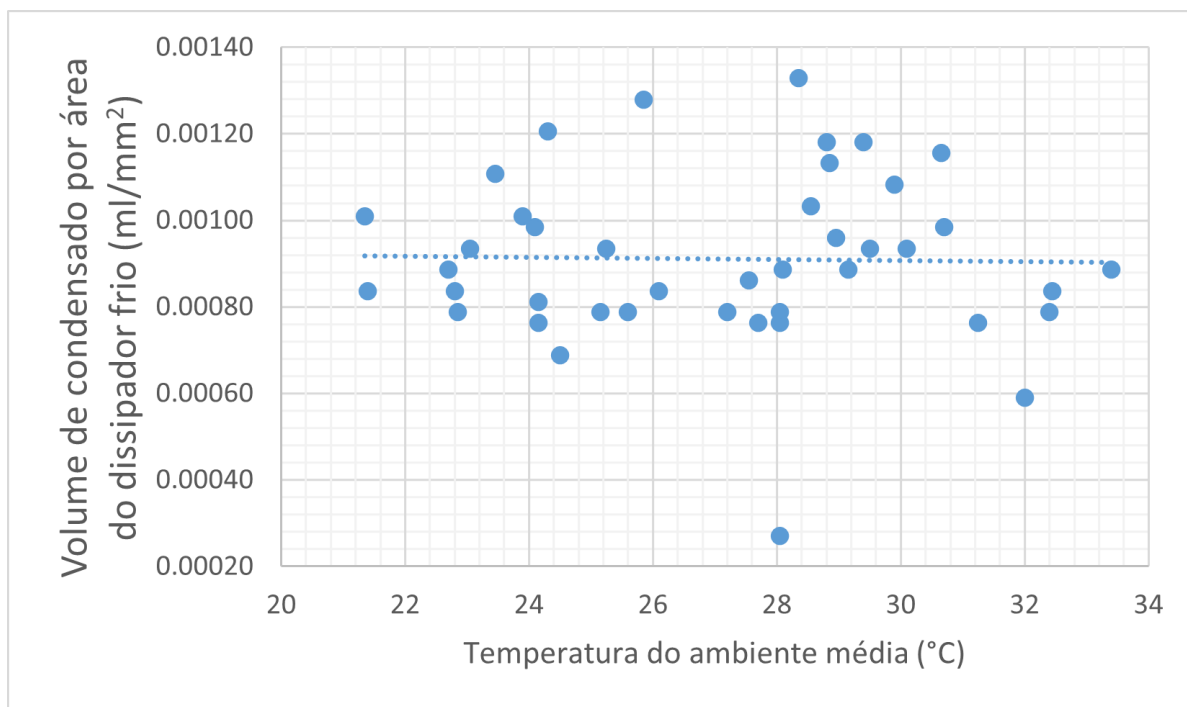


Figura 25 - Gráfico de volume de condensado por área do dissipador frio x temperatura do ambiente média

5.1.3. Impacto da umidade relativa média sobre o volume de condensado gerado

O gráfico de dispersão abaixo destaca a relação entre o volume de condensado produzido por área do dissipador frio e a umidade relativa média do ar atmosférico de entrada.

É notável que a quantidade de condensado gerado por área do dissipador frio aumenta proporcionalmente com o aumento da umidade relativa média. Esta correlação positiva é claramente destacada pela linha de tendência tracejada no gráfico, indicando uma relação direta entre a umidade relativa e a quantidade de condensado produzido.

A explicação para este fenômeno reside na disponibilidade de vapor de água no ar. A umidade relativa é uma medida da quantidade de vapor de água presente no ar em relação à quantidade máxima que o ar poderia conter naquela temperatura. Em outras palavras, é uma medida da saturação de vapor de água no ar.

Portanto, quanto maior a umidade relativa do ar de entrada, mais vapor de água está disponível para ser condensado pelo sistema de desumidificação. Isso significa que, em condições de alta umidade relativa, o sistema de desumidificação usando um módulo termoelétrico pode produzir uma maior quantidade de água.

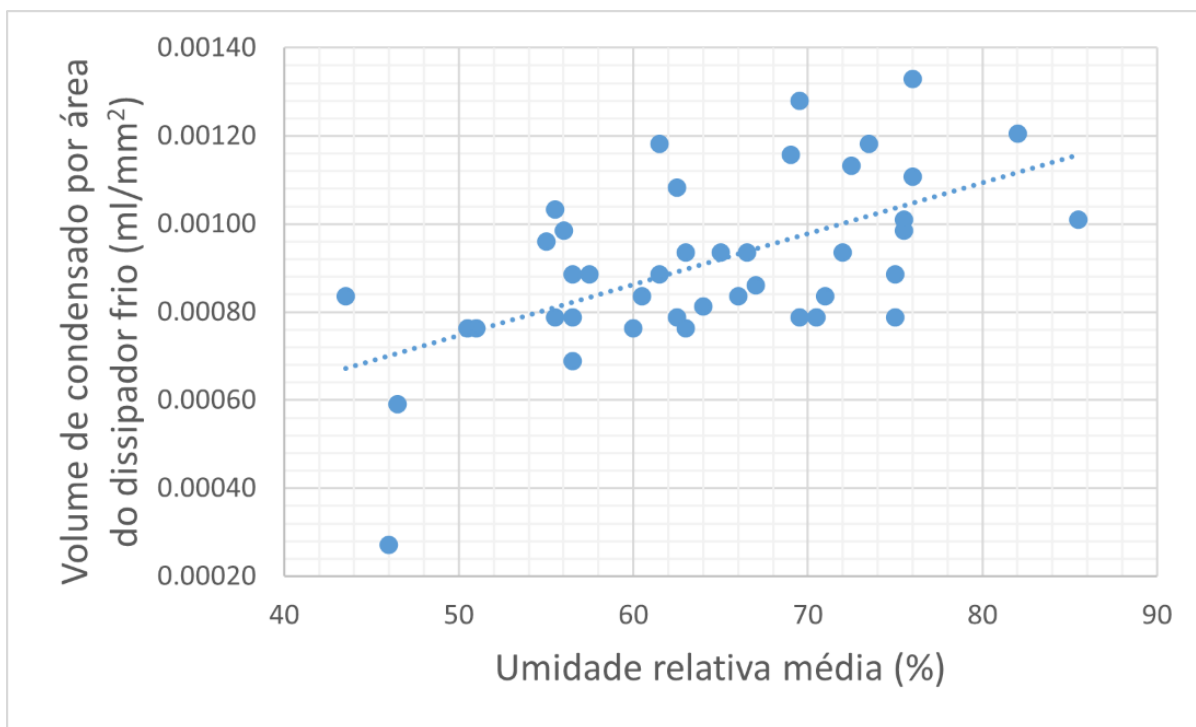


Figura 26 - Gráfico de volume de condensado por área do dissipador frio x umidade relativa média

5.1.4. Impacto da variação da pressão atmosférica média sobre o volume de condensado gerado

O gráfico de dispersão abaixo ilustra a relação entre o volume de condensado gerado por área do dissipador frio e a pressão atmosférica média. A partir da análise do gráfico, é possível observar que a quantidade de condensado gerado por área do dissipador frio aumenta à medida que a pressão atmosférica média diminui. Esta relação é indicada pela linha de tendência no gráfico.

No entanto, é importante notar que a variação da pressão atmosférica durante os testes não foi significativa o suficiente para mensurar o impacto que ela pode ter sobre a quantidade de vapor d'água condensado. Isso sugere que outros fatores, como a temperatura e a umidade relativa do ar analisadas acima, podem ter um impacto maior na quantidade de condensado produzido.

Por outro lado, teoricamente, esperou-se o resultado oposto. A pressão do ar atmosférico pode afetar a pressão de vapor do ar, que é a pressão exercida pelas moléculas de água no ar. Quando a pressão do ar é alta, a pressão de vapor também é alta, o que pode levar a uma maior quantidade de vapor d'água disponível para condensação. Isso sugere que, em condições de alta pressão atmosférica, pode-se esperar uma maior produção de quantidade de condensado.

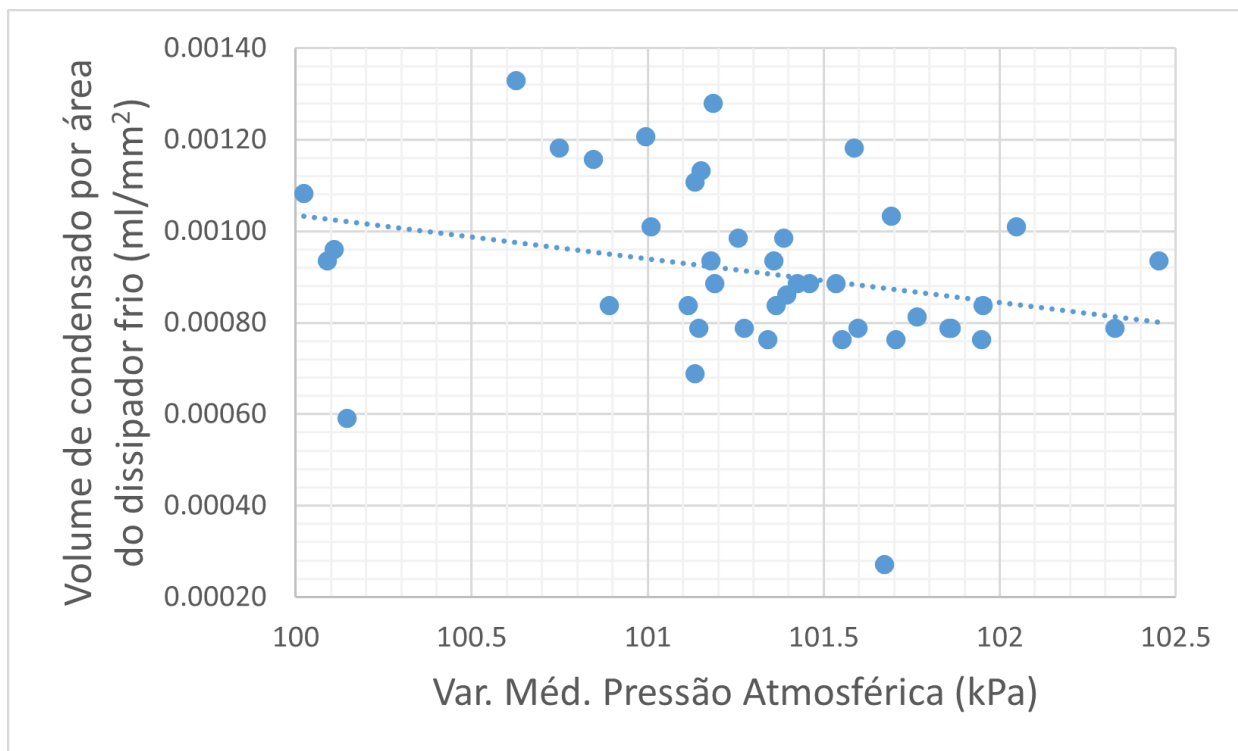


Figura 27 - Gráfico de volume de condensado por área do dissipador frio x variação da pressão atmosférica média

5.1.5. Relação entre o volume de condensado gerado e a temperatura de ponto de orvalho média

O gráfico de dispersão mencionado abaixo fornece uma representação visual da relação entre o volume de condensado gerado por área do dissipador frio e a temperatura média do ponto de orvalho.

A partir da análise do gráfico, é possível observar que a quantidade de condensado gerado por área do dissipador frio aumenta à medida que a temperatura média do ponto de orvalho aumenta. Esta relação é claramente indicada pela linha de tendência em tracejada no gráfico, sugerindo uma correlação direta entre a temperatura do ponto de orvalho e a quantidade de condensado produzido.

Um ponto importante a destacar é que, durante todos os testes realizados, a temperatura média do dissipador frio sempre esteve abaixo da temperatura do ponto de orvalho. Isso é crucial para o processo de desumidificação, pois a condensação do vapor d'água no ar ocorre quando a temperatura do ar cai abaixo do ponto de orvalho.

Isso indica que o sistema de desumidificação está adequadamente configurado ou é propício para promover a condensação do fluxo de ar atmosférico que o atravessa. Em outras palavras, o sistema de desumidificação está operando em condições ideais para maximizar a

quantidade de água condensada.

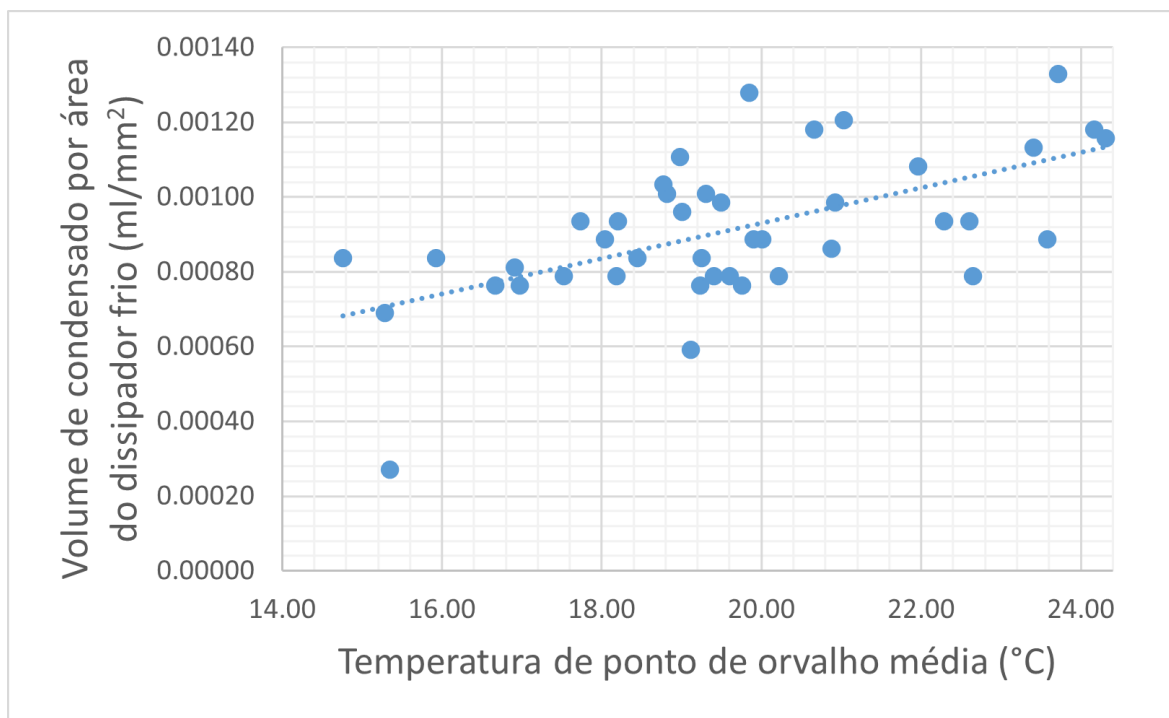


Figura 28 - Gráfico de volume de condensado por área do dissipador frio x temperatura de ponto de orvalho média

5.1.6. Variação de volume de condensado gerado e umidade relativa média com a relação temperatura do dissipador frio / temperatura do ambiente média

A Figura 29 mostra a variação do volume de condensado gerado por área do dissipador frio e da umidade relativa média com a variação da relação adimensionalizada da temperatura do dissipador frio pela temperatura do ambiente média ($R_{T_{D.F.M}} / T_{A.M.}$). Observa-se que tanto o volume de condensado gerado por área do dissipador frio quanto a umidade relativa média adotam globalmente as mesmas variações de subida e descida com a variação da relação da temperatura do dissipador frio pela temperatura do ambiente média. Este gráfico ajuda a perceber que esta relação adimensionalizada ($R_{T_{D.F.M}} / T_{A.M.}$) que varia entre 0.33 e 0.56, tem um impacto direto sobre a variação da umidade relativa média e o condensado produzido.

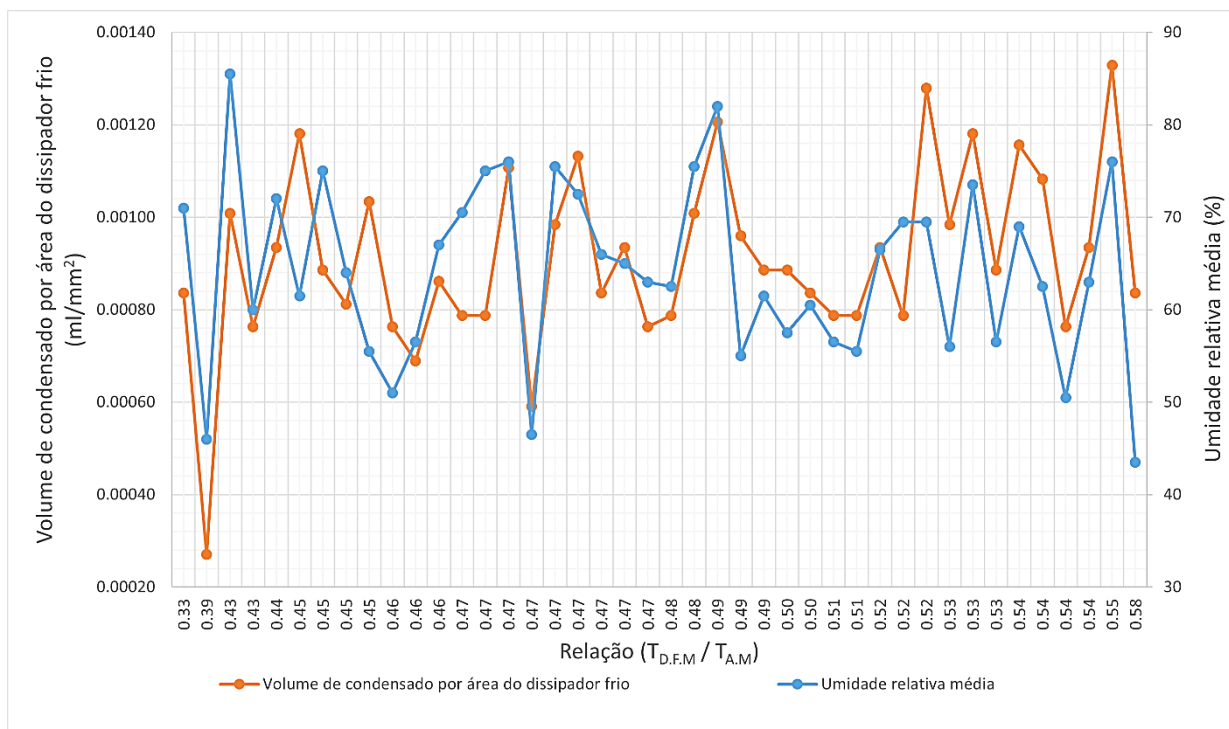


Figura 29 - Gráfico de volume de condensado por área do dissipador frio e umidade relativa média x $R_{T_{D,F,M}} / T_{A,M}$

5.1.7. Avaliação do consumo energético por geração de condensado

A energia consumida foi calculada no modelo experimental usando a corrente e a tensão requeridas pelo protótipo para sua operação, conforme mencionado na secção 4.3.2.1. Durante as 11 horas de operação do modelo experimental, percebe-se que a energia consumida, visualmente representado na Figura 30 por uma linha reta azul e sendo igual a 0.17 kWh se manteve constante em todos os testes realizados, a como comparação uma geladeira duas portas gasta em média 55 kWh no mês. Ou seja, a energia consumida permanece inalterada independentemente das condições de teste ou da quantidade de condensado produzido pelo sistema de desumidificação. Consequentemente, igual para todos os valores da relação adimensionalizada ($R_{T_{D,F,M}} / T_{A,M}$). Esta linha serve como uma representação gráfica clara e direta do consumo energético durante as horas de operação, destacando sua constância ao longo de todos os testes.

A curva laranja em forma de cascata representa o consumo energético por geração de condensado. Este último varia com base na quantidade de condensado produzido em cada teste. O consumo energético médio por geração de condensado representado no gráfico abaixo pela linha preta, considerando os 42 testes, é igual a 5×10^{-5} kWh/ml. Este valor indica a quantidade de energia média necessária para produzir a quantidade de 1 ml de condensado, fornecendo assim uma medida sobre o consumo energético médio por unidade de condensado do sistema de

desumidificação.

Comparativamente, este consumo energético médio por geração de condensado é relativamente bom quando comparado ao dos estudos resumidos na Tabela 1. Isso sugere que o sistema de desumidificação do modelo experimental é competitivo em termos de consumo energético, o que é um aspecto positivo para a viabilidade e aplicabilidade prática do sistema.

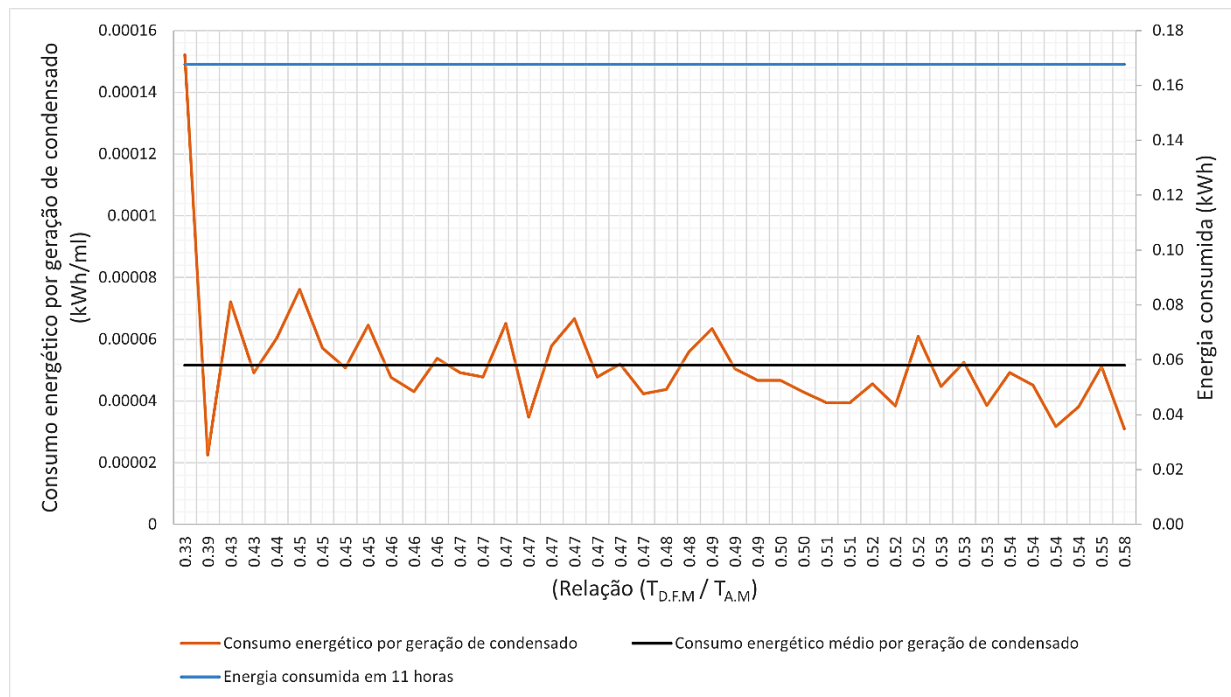


Figura 30 - Gráfico de volume de condensado por área do dissipador frio e consumo de energia $\times R_{T_{D.F.M}} / T_{A.M}$

5.1.8. Avaliação da eficiência de condensação de água

Conforme mencionado na seção 4.3.2.2, usou-se o software *Interactive Thermodynamics* (IT) para calcular a quantidade de vapor d'água contida no fluxo de ar que passou pelo sistema de condensação.

Durante as 11 horas de operação do sistema, foi registrado que um total impressionante de $2,4 \times 10^7$ ml de vapor de água passou pelo sistema. Este volume representa a quantidade total média de vapor de água contido no fluxo de ar que passou pelo sistema.

No entanto, com base na teoria de camada limite (ALEXANDRE, 2020) e dos limites do sistema de desumidificação, admite-se que a quantidade de vapor de água em contato com o dissipador frio está na ordem de $10^{-3}\%$ da quantidade real que passou pelo sistema, ou seja, 200 ml será realmente a quantidade de vapor de água em contato com o dissipador frio. Diante disso, o modelo experimental foi capaz de condensar, em média, apenas 18,5 ml. Isso resulta

em uma eficiência de condensação aproximada de 9%. Em outras palavras, a eficiência de condensação do protótipo é razoavelmente interessante.

No entanto, este resultado destaca a necessidade de melhorias significativas no design ou na operação do sistema de desumidificação para aumentar sua eficiência de condensação. Vale destacar também que nenhum dos estudos resumidos na Tabela 1 avaliou a eficiência de condensação, o que mostra a relevância do presente trabalho.

5.1.9. Avaliação de geração de água

Conforme mencionado na seção 4.3.2.3, a geração de água foi um aspecto crucial avaliado durante os testes realizados no modelo experimental. Esta geração foi calculada com base na produção média de água observada durante os testes.

Durante os testes, o modelo experimental foi capaz de produzir, em média 1,7 ml/h de água. Este valor representa a quantidade de água que o sistema foi capaz de condensar e coletar a cada hora de operação.

No entanto, quando comparamos essa geração de água com os resultados dos estudos resumidos na Tabela 1, fica claro que a geração de água do modelo experimental é relativamente baixa. Os estudos listados na Tabela 1 apresentam valores de geração de água significativamente mais altas, indicando que esses sistemas são capazes de condensar e coletar uma maior quantidade de água por hora de operação.

Isso sugere que, embora o modelo experimental seja capaz de condensar e coletar água do ar, há espaço para melhorias significativas em termos de geração de água.

5.2. Resultados do modelo numérico

5.2.1. Impacto da temperatura do ar atmosférico sobre o volume de condensado gerado

A Figura 31 apresenta um gráfico que ilustra a relação entre o volume de condensado gerado por área do dissipador frio e a temperatura média do ambiente para o modelo numérico.

A partir da análise do gráfico, é possível observar um aumento aproximadamente linear na geração da quantidade de água por área do dissipador frio com o aumento da temperatura ambiente média. Esta tendência contradiz os resultados observados no modelo experimental (Figura 25).

A explicação para essa tendência é encontrada na capacidade de retenção de umidade do ar. O ar quente tem a capacidade de reter mais umidade do que o ar frio. Isso significa que, a uma determinada umidade relativa, o ar mais quente contém mais vapor d'água do que o ar mais frio.

Portanto, se o ar de entrada for mais quente, ele pode conter mais umidade. Isso, por sua vez, pode levar a uma maior quantidade de água condensada pelo sistema de desumidificação. Em outras palavras, a eficiência do sistema de desumidificação pode aumentar com o aumento da temperatura do ar de entrada.

No entanto, é importante notar que esta é apenas uma tendência observada no modelo numérico. Os resultados reais podem variar dependendo de uma série de outros fatores, incluindo a eficiência do módulo termoelétrico, a umidade relativa do ar de entrada e a pressão atmosférica.

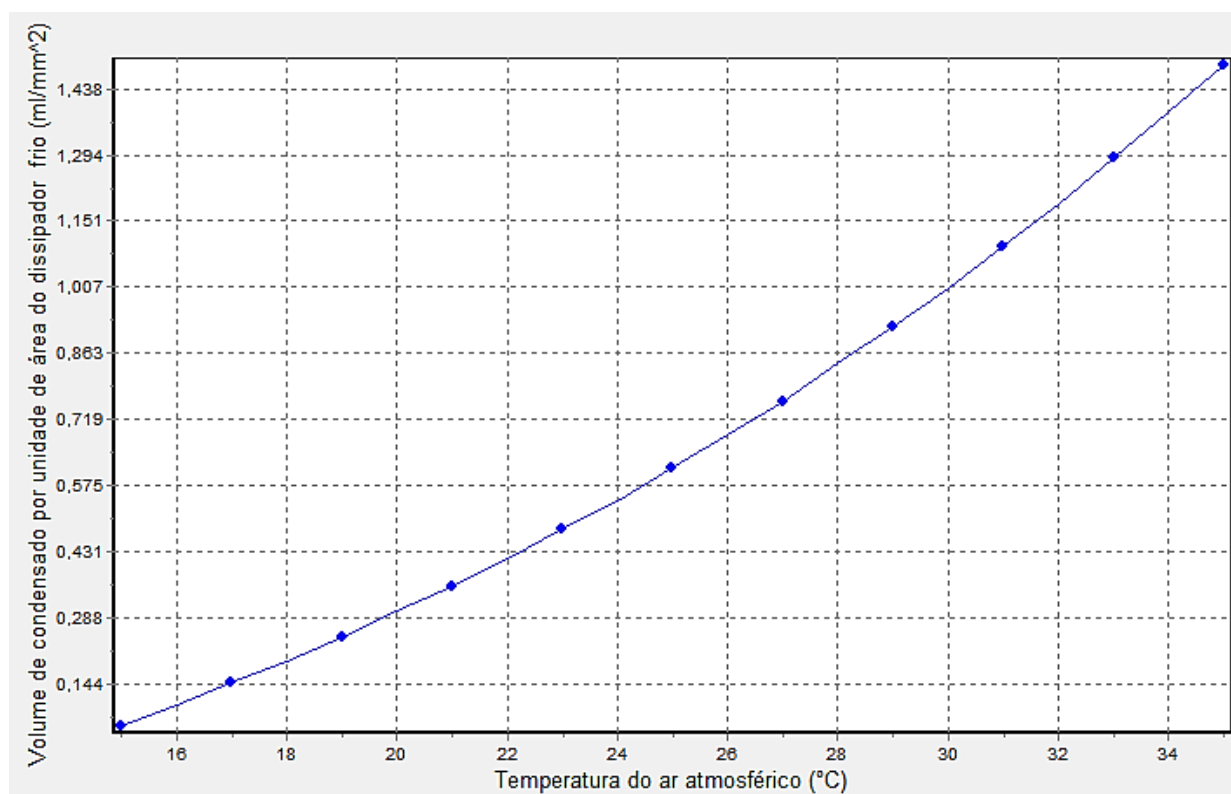


Figura 31 - Gráfico de volume de condensado gerado por área do dissipador frio x temperatura do ar atmosférico à mesma umidade

5.2.2. Impacto da temperatura do ar de saída sobre o volume de condensado gerado

A Figura 32 apresenta uma análise detalhada da variação do volume de condensado gerado por unidade de área do dissipador frio em relação à temperatura do ar na saída do sistema, conforme modelado numericamente. Esta análise é particularmente relevante, pois não foi possível medir a temperatura do ar de saída no modelo experimental, tornando o modelo numérico uma ferramenta valiosa para entender essa relação.

O gráfico revela uma tendência interessante: à medida que a temperatura do ar de saída aumenta, a quantidade de água gerada por unidade de área do dissipador frio diminui. Esta

relação inversa é claramente ilustrada no gráfico, que apresenta a forma de uma semi-parábola. Isso sugere que a eficiência de condensação do sistema de desumidificação diminui à medida que a temperatura do ar de saída aumenta.

Um ponto importante a destacar é que, acima da temperatura de 27,25 °C, o sistema não gera condensado. Isso indica que o sistema atinge um limite de eficiência de condensação à medida que a temperatura do ar de saída aumenta, além do qual a condensação de água se torna menos eficiente.

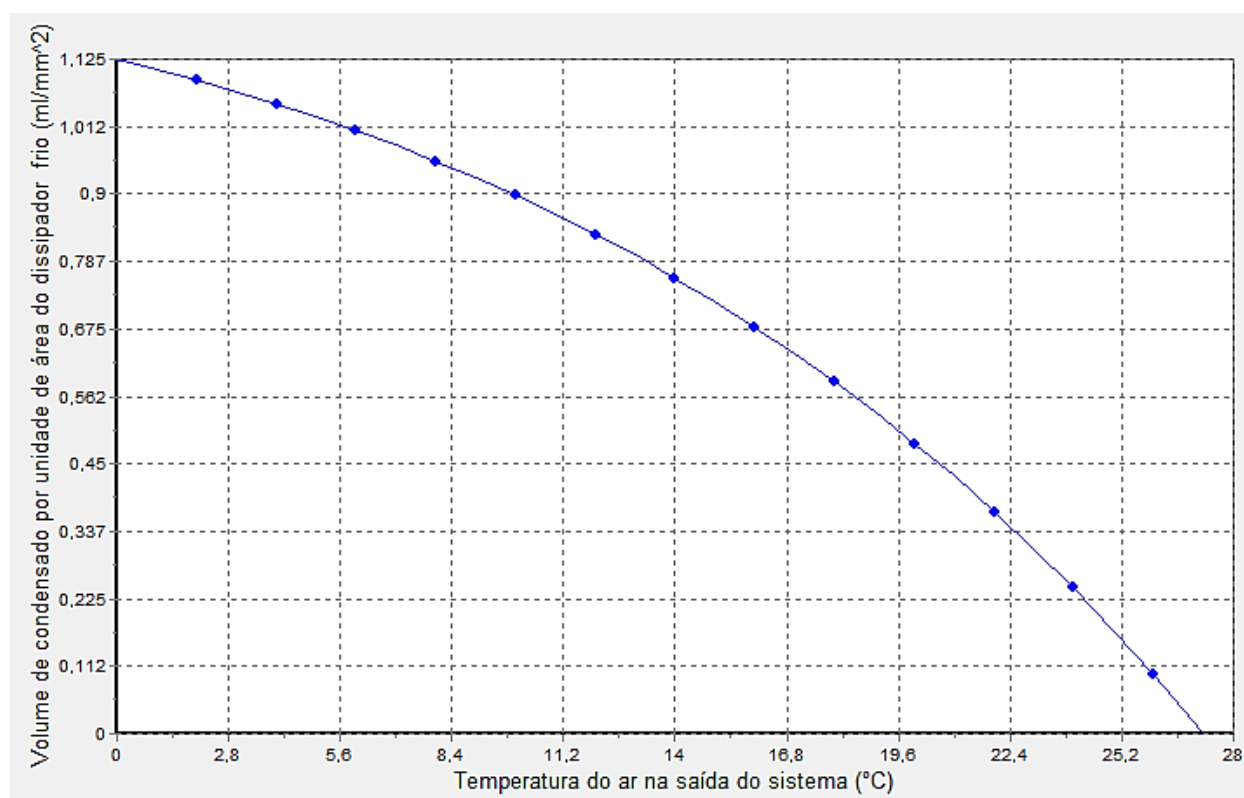


Figura 32 - Gráfico de volume de condensado gerado por área do dissipador frio x temperatura do ar na saída do sistema

5.2.3. Impacto da umidade relativa do ar atmosférico de entrada sobre o volume de condensado gerado

A Figura 33 apresenta uma análise detalhada do impacto da umidade relativa do ar atmosférico de entrada sobre o volume de condensado gerado por unidade de área do dissipador frio, conforme modelado numericamente.

De forma semelhante ao observado no modelo experimental (Figura 26), o gráfico mostra uma tendência linear crescente do volume de condensado produzido com o aumento da umidade relativa. Isso significa que, à medida que a umidade relativa do ar de entrada aumenta, a quantidade de água gerada por unidade de área do dissipador frio também aumenta. Esta

relação direta sugere que a umidade relativa do ar de entrada tem um impacto significativo na eficiência de condensação do sistema de desumidificação.

A razão para essa tendência pode é mencionada na seção 5.1.3. Pode-se incluir também aspectos como a temperatura do ar de entrada, a pressão atmosférica e a eficiência do módulo termoeletrico, que desempenham um papel crucial na determinação da quantidade de água que pode ser condensada pelo sistema de desumidificação.

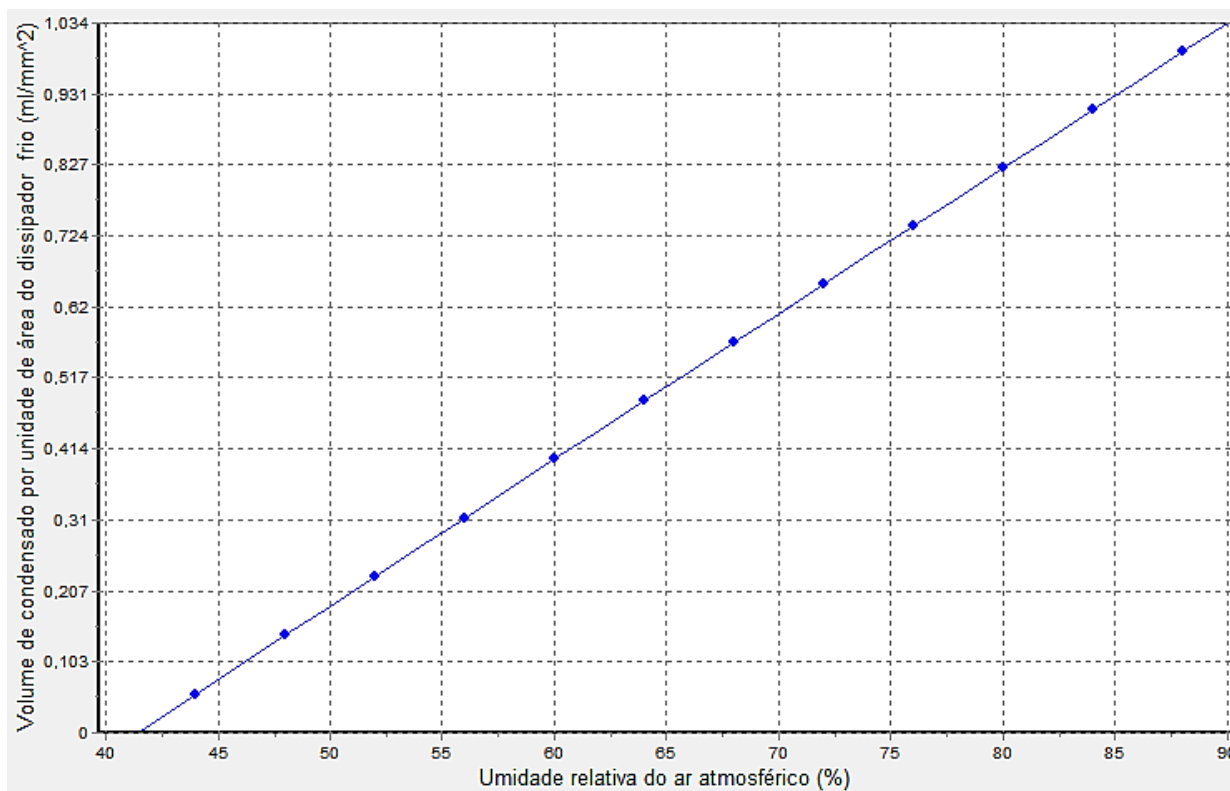


Figura 33 - Gráfico de volume de condensado por unidade de área do dissipador frio x umidade relativa do ar atmosférico a 27 °C

5.2.4. Avaliação do consumo energético por geração de condensado

A avaliação do consumo energético no modelo numérico é realizada utilizando o conceito de balanço de energia do sistema de condensação durante o período de operação de 11 horas. Este balanço de energia leva em consideração todas as entradas e saídas de energia do sistema, permitindo uma avaliação precisa do consumo energético.

Durante este intervalo de tempo, o consumo energético total foi de 0,018 kWh. Este valor foi calculado com base nas variáveis de entrada médias adquiridas pelo modelo experimental. Isso significa que, para as condições médias observadas no modelo experimental, o modelo numérico consumiu 0,018 kWh.

O consumo energético por geração de condensado sendo a energia consumida por

unidade de quantidade de água produzida, foi calculado neste caso como sendo de $1,15 \times 10^{-6}$ kWh/ml. Este valor indica a quantidade de energia necessária para produzir a quantidade de 1 ml de água, tratando-se do modelo numérico.

No entanto, é importante notar que o modelo experimental requer 43,5 vezes a energia consumida no modelo numérico para produzir a mesma quantidade de água, ou seja, 1 ml de condensado de vapor de água. Isso sugere que o modelo experimental ainda está longe de ser tão eficiente quanto o modelo numérico em termos de consumo energético por geração de condensado.

5.2.5. Avaliação da eficiência de condensação de água

De maneira análoga ao modelo experimental, o modelo numérico também avaliou a quantidade de vapor d'água contida no fluxo de ar que passou pelo sistema de condensação. Durante um período de operação de 11 horas, foi registrado que um total de $2,4 \times 10^7$ ml de vapor de água passou pelo sistema.

No entanto, com base na modelagem e dos resultados obtidos no modelo numérico, admite-se a quantidade de vapor de água realmente em contato com a superfície fria neste caso seja igual a 100 vezes à admitido no modelo experimental, ou seja, 20000 ml de vapor de água. Desta quantidade substancial de vapor de água, o modelo numérico foi capaz de condensar $15,4 \times 10^3$ ml. Isso resulta em uma eficiência de condensação aproximada de 77,15%. Em outras palavras, a eficiência de condensação de água do modelo numérico é extremamente alta quando comparada com o modelo experimental, ou seja, o modelo numérico é 8,6 vezes mais eficiente que o modelo experimental em termos de eficiência de condensação de água.

Isso sugere que, embora ambos os modelos apresentem eficiências de condensação de água relativamente boas, há espaço de melhorias para aumentar a eficiência do modelo experimental.

5.2.6. Avaliação de geração de água

No modelo numérico, a produção de água foi meticulosamente calculada levando em consideração as variáveis de entrada médias obtidas a partir do modelo experimental. Durante um período de operação contínua de 11 horas, o modelo numérico foi capaz de produzir uma quantidade significativa de água, totalizando $15,4 \times 10^3$ ml. Este valor foi mencionado anteriormente na seção 5.2.5.

No entanto, ao avaliar a eficiência de produção do modelo numérico, é importante considerar não apenas a quantidade total de água produzida, mas também o tempo durante o

qual essa produção ocorreu. Ao dividir a quantidade total de água produzida pelo tempo de operação, obtém-se uma medida de geração de água do sistema.

Neste caso, a geração de água do modelo numérico foi de 1400 ml/h. Isso significa que, para cada hora de operação, o modelo numérico foi capaz de produzir 1400 ml de água. Esta medida de geração de água fornece uma indicação valiosa do desempenho do sistema de desumidificação do modelo numérico.

Capítulo 6

6. Estudo de caso de implementação do protótipo em regiões semiáridas africanas

A implementação do protótipo de desumidificação do ar atmosférico para geração de água, desenvolvido neste estudo e testado no Brasil, especificamente no Rio de Janeiro, em regiões africanas semiáridas ou em estresse hídrico como (Marrocos, Moçambique, África do Sul, Argélia), é uma proposta inovadora e desafiadora. No entanto, é importante avaliar as condições climáticas desses países para verificar se elas se adequam as do estado de Rio de Janeiro. As variáveis climáticas mais interessantes a serem consideradas são:

- **Temperatura:** A temperatura do ar influencia diretamente a quantidade de vapor d'água que o ar pode conter. Quanto maior a temperatura (T_{BS}), maior a capacidade do ar de reter umidade.
- **Umidade Relativa:** A umidade relativa do ar é um fator crucial na eficiência da geração de água. Quanto maior a umidade relativa, mais água pode ser extraída do ar.
- **Pressão Atmosférica:** A pressão atmosférica pode afetar a quantidade de vapor d'água que pode ser condensado. Em altitudes mais elevadas, onde a pressão atmosférica é menor, a eficiência do sistema pode ser reduzida.

O site (<https://www.dadosmundiais.com/>) permitiu fazer uma comparação entre as temperaturas médias diurna máxima, noturna mínima e a umidade relativa média dos últimos 20 anos entre o Brasil e o Marrocos, mostrada nas figuras (Figura 34, Figura 35 e Figura 36) respectivamente. Os dois primeiros gráficos mostram uma semelhança das temperaturas médias diurna alta, noturna mínima de maio a outubro entre o Brasil e o Marrocos, visto que os dois são países tropicais e têm relativamente uma alta temperatura durante todo o ano. O terceiro gráfico mostra uma boa semelhança da umidade relativa durante os últimos 20 anos entre os dois países. Nos dois países, a umidade relativa gira em torno de 70%, o que é muito adequado para alta geração de condensado. Essas aproximações deixam viável a implementação do protótipo no Marrocos, pois ao observamos a Figura 1, vemos que este País está em uma área com risco hídrico extremamente elevado. Estas comparações devem ser feitas para avaliar a viabilidade da implementação do protótipo em outras regiões, já que as variáveis climáticas são similares a região em que o protótipo foi construído e realizado os experimentos, evidenciando que se pode obter resultados similares em outras regiões.

De outro lado têm-se potenciais desafios como:

- **Eficiência energética:** o protótipo contém um sistema de desumidificação baseado em módulo termoelétrico, como a Célula Peltier, e pode consumir uma quantidade significativa de energia. Isso pode ser um desafio em regiões onde o fornecimento de energia é limitado ou inexistente.

- **Manutenção:** a manutenção regular do sistema é necessária para garantir sua eficiência a longo prazo. Isso pode ser um desafio em regiões remotas ou de difícil acesso.
- **Condições ambientais extremas:** em regiões com condições ambientais extremas, como altas temperatura, baixa umidade ou altitudes elevadas (baixas pressões) a eficiência do sistema pode ser significativamente reduzida.
- **Custo:** Os custos de instalação e operação do sistema podem ser altos falando de produção em larga escala, ou seja, geradores de água atmosférica capazes de abastecer a população de uma cidade, o que pode ser um obstáculo para a implementação em comunidades vulneráveis. No entanto, vale destacar que o custo de instalação do protótipo de geração de água do presente trabalho é muito baixo, o que é um ponto apreciável.

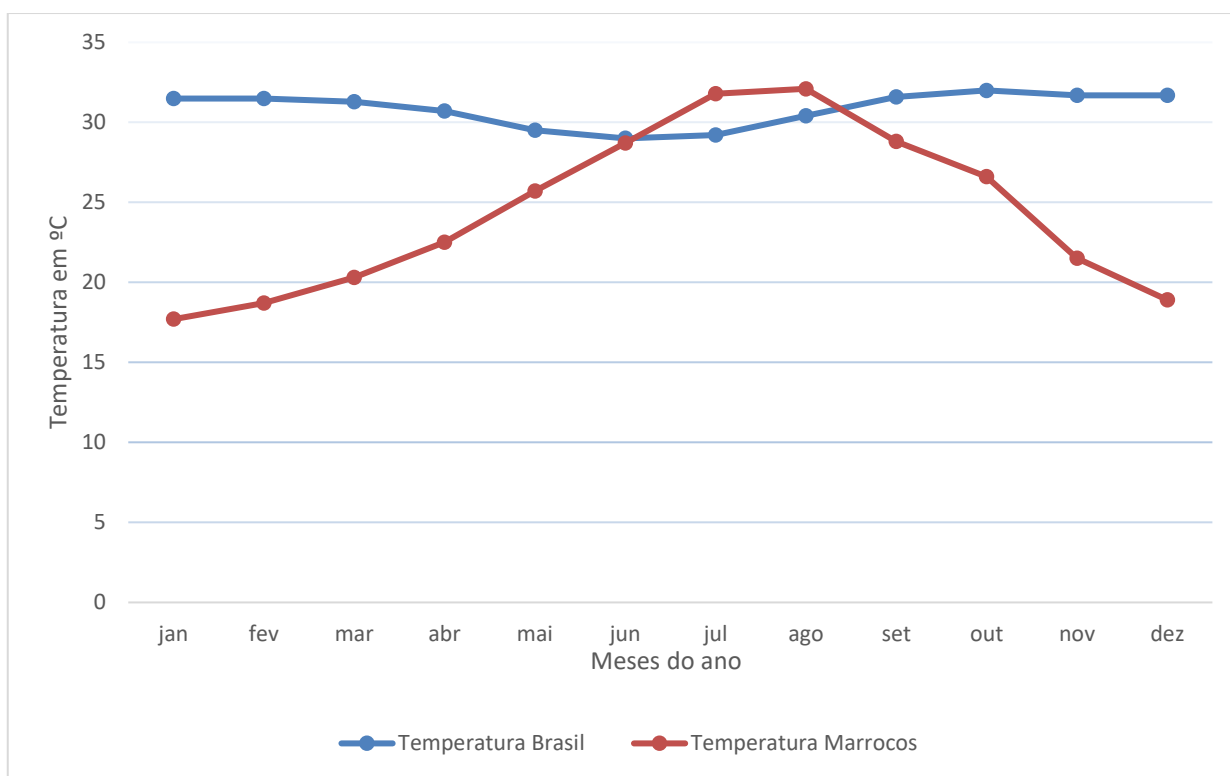


Figura 34 - Comparação da temperatura diurna alta dos últimos 20 anos entre Brasil e Marrocos

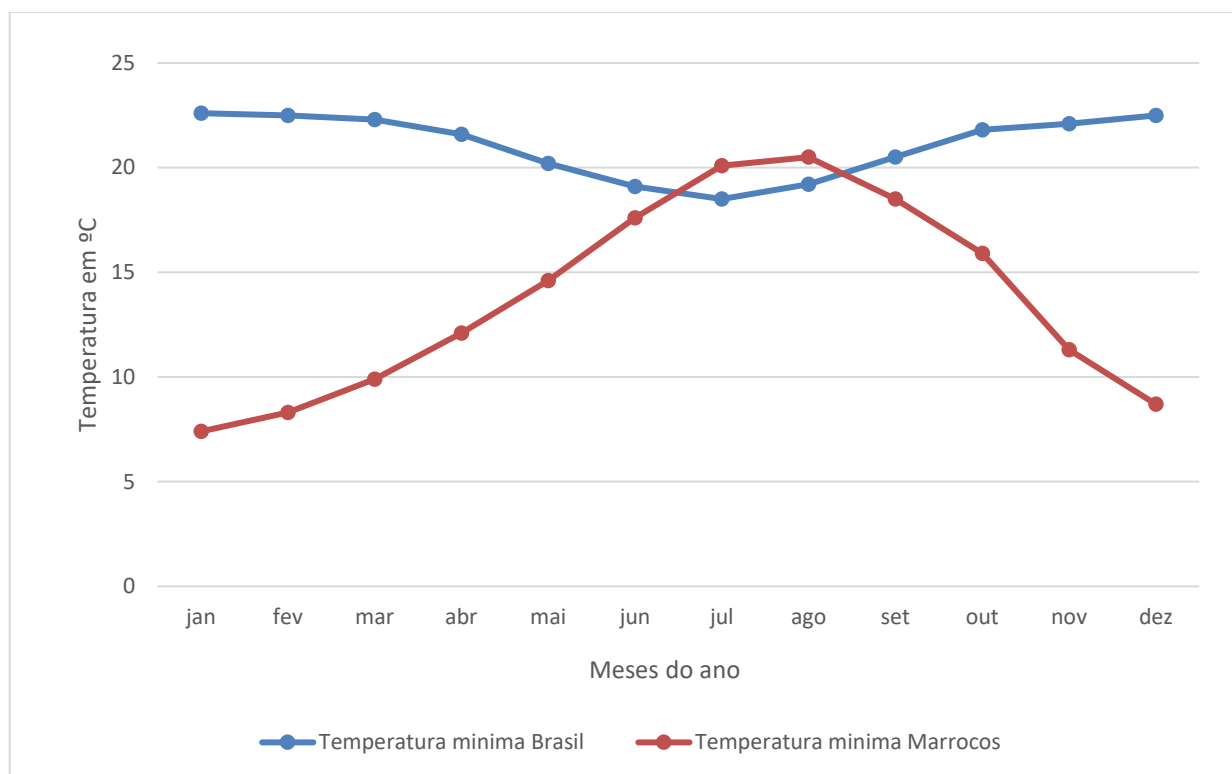


Figura 35 - Comparação da temperatura noturna mínima dos últimos 20 anos entre Brasil e Marrocos

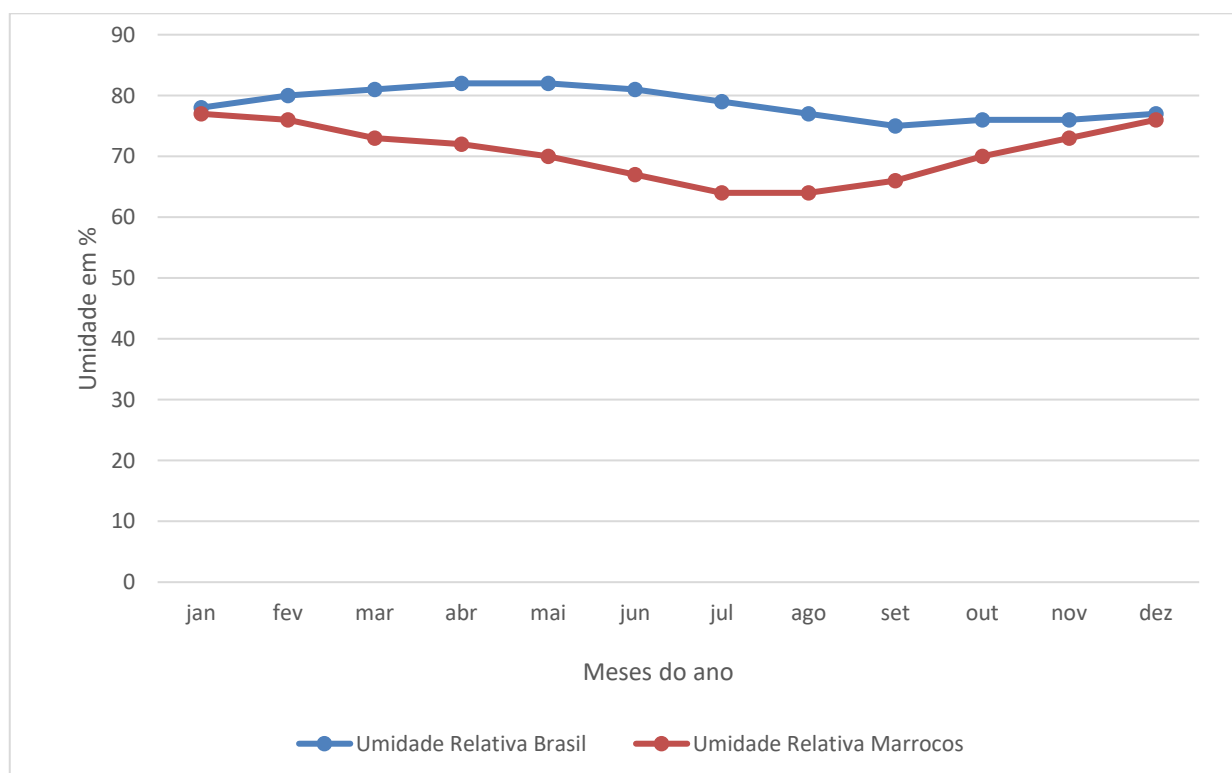


Figura 36 - Comparação da umidade relativa dos últimos 20 anos entre Brasil e Marrocos

Capítulo 7

7. Conclusão

Este estudo teve como objetivo principal avaliar a eficiência de um protótipo para a geração de água a partir do ar atmosférico, utilizando um módulo termoelétrico. Para atingir este objetivo, foram desenvolvidos dois protótipos, um físico/experimental e um numérico, que foram comparados em termos de consumo energético por geração de condensado, eficiência de condensação de água e a geração de água.

A avaliação de consumo energético nos dois modelos, mostrou que o prevê um consumo energético por geração de condensado igual a $1,15 \times 10^{-6}$ kWh/ml, enquanto o modelo experimental teve um consumo energético por geração de condensado igual a 5×10^{-5} kWh/ml. Estes valores indicam a quantidade de energia necessária para produzir a quantidade de 1 ml de água nos dois modelos estudados. É importante notar também que o modelo experimental requereu 43,5 vezes a energia consumida no modelo numérico para produzir a mesma quantidade de água.

A avaliação de eficiência de condensação de água mostrou que o modelo numérico opera com uma eficiência de condensação aproximada de 77,15%, enquanto o modelo experimental teve uma eficiência de condensação de água de aproximadamente 9%. Em outras palavras, a eficiência de condensação de água do modelo numérico é extremamente alta quando comparada com o modelo experimental, ou seja, o modelo numérico é 8,6 vezes mais eficiente em condensar o vapor de água contido no ar que o modelo experimental.

A avaliação de geração de água permitiu observar que o modelo numérico é capaz de condensar de 1400 ml/h, enquanto o modelo experimental consegue condensar 1,7 ml/h. Isso significa que, para cada hora de operação, o modelo numérico foi capaz de produzir 1400 ml de água e o experimental condensa 1,7 ml.

As três (3) comparações feitas acima, sugerem na sua globalidade que o modelo experimental ainda está longe de ser tão eficiente quanto o modelo numérico nos aspectos de consumo energético por geração de condensado, eficiência de condensação e geração de água.

Além disso, o estudo do protótipo foi estendido para incluir regiões semiáridas e áreas em situação de estresse hídrico no continente africano. A análise das condições climáticas nessas regiões permitiu afirmar a viabilidade de implementação do protótipo estudado nesses locais. Este é um resultado significativo, pois sugere que o protótipo pode ser útil não apenas nas regiões investigadas, mas em todas as regiões do mundo onde a geração de água a partir do ar atmosférico é necessária.

É importante lembrar que o protótipo foi desenvolvido em escala reduzida. Embora o modelo físico/experimental, tenha demonstrado a capacidade de condensar e coletar água do ar, ainda há espaço para melhorias significativas com base no modelo numérico nos aspectos avaliados. Essas melhorias podem ser alcançadas através de otimizações no design do sistema,

na seleção de materiais e na operação do sistema, com o objetivo de fabricar um sistema de desumidificação para geração de água em escala maior.

Apesar dos desafios, os autores deste trabalho estão convencidos da viabilidade do protótipo para a geração de água em escala maior, especialmente quando combinado com fontes de energia renováveis, como a energia solar.

Para futuras pesquisas, sugere-se a realização de medições contínuas de várias variáveis, incluindo a temperatura do dissipador quente, a temperatura do dissipador frio, a vazão volumétrica do ar úmido na entrada do sistema e na frente do dissipador frio, e a umidade relativa do ar atmosférico durante todo o processo, desde a entrada até a saída. Isso permitirá uma análise mais precisa do protótipo e ajudará a identificar áreas para melhorias adicionais.

Bibliografia

- AL HERR, Y.; ELSARRAG, E. Experimental Investigations on Water Recovery from the Atmosphere in Arid Humid Regions. **Academia**.
- ALEXANDRE, P. Camada Limite – Projeto e Otimização. **Engenharia Aeronáutica**, 2020. Disponível em: <<https://engenhariaaeronautica.com.br/curiosidades-engenharia-aeronautica/camada-limite-projeto-e-otimizacao/>>. Acesso em: 31 Março 2024.
- ALI, A. S. et al. A review on the water-energy nexus for drinking water production from humid air. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. Volume 120, p. p. 109627, 2020.
- ALMEIDA, D. P. F. Apontamentos de apoio às aulas de tecnologia pós-colheita. **Slideshare**, 2004.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, R. A. A. C. E. **ASHRAE Handbook - Fundamentals**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2009.
- ANDREW, M.; TIEN, S.; SARAH, A. M. Três Mapas que Ajudam a Explicar a Crise da Água em São Paulo, Brasil. **World Resources Institute**, Novembro 2014. Disponível em: <<https://www.wri.org/insights/tres-mapas-que-ajudam-explicar-crise-da-agua-em-sao-paulo-brasil>>. Acesso em: 30 Março 2024.
- ATUL, E. et al. Solar Powered Atmospheric Water Generator and overview on AWG technologies. **International Journal of Creative Research Thoughts**, v. Volume 9, 2021.
- BADR, H. A. Potential use of evaporator coils for water extraction in hot and humid areas. **Desalination**, v. 237, n. 3, p. 330-345, Fevereiro 2009.
- BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7ª. ed. Rio de Janeiro: Grupo Editor Nacional, 2014.
- BILENKO, N.; TITLOV, O. Improving energy efficiency of the systems for obtaining water from atmospheric air. **Jornal da Europa Oriental de Tecnologias Avançadas**, v. vol 2, p. 31-40, 2021.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. 5ª. ed. [S.l.]: Mc Graw-Hill, 1998.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo: AMGH Editora Ltda., 2012.
- DA SILVA, L. C. C. Captação de água da atmosfera-análise do potencial brasileiro e desenvolvimento de protótipos, 2018.
- DISERO, B. Brasil ainda é esperança hídrica no mundo. **Jornal da USP**, 2019. Disponível

em: <<https://jornal.usp.br/atualidades/mesmo-com-40-de-corpo-hidrico-ameacado-brasil-ainda-e-esperanca-para-crise-mundial/>>. Acesso em: 30 Março 2024.

ESLAMI, M.; TAJEDDINI, F.; ETAATI, N. Thermal analysis and optimization of a system for water harvesting from humid air using thermoelectric coolers. **Energy Conversion and Management**, v. 174, p. 417-429, 2018.

GATLEY, D. P. Understanding Psychrometrics, Atlanta, 2013.

GENERATEPRESS. Thermoelectric Cooling Devices (Peltier). **Electricity - Magnetism**, 2024. Disponível em: <<https://www.electricity-magnetism.org/thermoelectric-cooling-devices-peltier/>>. Acesso em: 3 Março 2024.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v. 2, 2002.

HENKER, E. et al. Água potável com desumidificação do ar e energia solar: adaptação ao stress hídrico no RS. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. vol. 19, p. 345-352, 2014.

IBERDROLA. A dessalinização da água do mar: um método para lutar contra a escassez? **Iberdrola**, 09 Setembro 2021. Disponível em:

<<https://www.iberdrola.com/inovacao/dessalinizacao#:~:text=Consiste%20em%20mover%20a%20C3%A1gua,a%20convencional%20e%20a%20reversa>>. Acesso em: Março 2023.

INBENC. **Watergen**, 2020. Disponível em: <<https://www.inbec.com.br/blog/empresa-tecnologia-israelense-que-produz-agua-ar-recebe-importante-premiacao-las-vegas>>. Acesso em: 30 Março 2024.

JOHN WILEY & SONS, INC. IT: Interactive Thermodynamics software. **Wiley**, 2000-2024. Disponível em: <<https://bcs.wiley.com/he-bcs/Books?action=resource&bcsId=8892&itemId=1118412931&resourceId=36232>>. Acesso em: 3 Março 2024.

KADHIM, T. J.; ABBAS, A. K.; HAYDER, J. K. Experimental Study of Atmospheric Water Collection Powered By Solar Using the Peltier Effect. **3rd International Conference on Engineering Sciences**. IOP, 2020.

KASHIF, I. et al. Experimental Study of a Thermoelectric Air Duct Dehumidification System for Tropical Climate. **Heat Transfer Engineering**, v. Volume 42, p. p. 1159-1171, 2021.

LAWRENCE, M. G. The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications. **Bulletin of The American Meteorological Society**, v. 86, n. 2, p. 225-234, Fevereiro 2005.

MANUAL da Química. **Massa Molecular**, 2018. Disponível em:

<<https://www.manualdaquimica.com/quimica-geral/massa-molecular.htm>>. Acesso em: 10

Abril 2024.

MELO, B. D. A. Dispositivo condensador de água. **Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.**

MORAN, M. J. et al. Princípios de Termodinâmica para Engenharia. **LTC Editora**, v. capítulo 12, n. 7ª edição, p. exercício 12.82, 2014.

MUDANÇAS Climáticas Globais. **Centro de Ciências Computacionais**, 2018. Disponível em:

<http://www.mudancasclimaticas.c3.furg.br/index.php?Itemid=913&option=bloco_texto&id_site_componente=1332>. Acesso em: 30 Março 2024.

PONTIOUS, K. et al. Design of an atmospheric water generator: Harvesting water out of thin air. **IEE, Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS), Charlottesville**, p. p. 6-11, 2016.

PORTAL São Francisco. **Umidade Absoluta**, 2020. Disponível em:

<<https://www.portalsaofrancisco.com.br/meio-ambiente/umidade-absoluta>>. Acesso em: 10 Abril 2024.

ROSSI, S. J. **Psicrometria**. [S.l.]: FUNAPE - Fundação de Apoio à Pesquisa e à Extensão João Pessoa, 1987.

RUNZE, D. et al. Experimental investigations on a portable atmospheric water generator for maritime rescue. **Journal of Water Reuse and Desalination**, p. p. 30-44, 2020.

SÂMELLA, P. L. P.; NÁTANE, O. D. C. Segurança E Vulnerabilidade Hídrica Em Moçambique - África. **International Journal Semiarid**, v. 2, p. 131-142, Janeiro 2020. ISSN ISSN.

SAMMIS, R. Equattoria. **Você sabe o que é estresse hídrico?**, 2018. Disponível em:

<<https://equattoria.blogspot.com/2018/08/voce-sabe-o-que-e-estresse-hidrico.html>>. Acesso em: 31 março 2024.

SEWELL, G. H. A importância da poluição do ar: Administração e controle da qualidade ambiental. **CETESB**, São Paulo, p. 161-178, 1978. Disponível em:

<<https://www.todamateria.com.br/composicao-do-ar/>>. Acesso em: 30 Março 2024.

SHANSHAN, L. et al. Experimental analysis of a portable atmospheric water generator by thermoelectric cooling method. **Energy Procedia**, v. Volume 142, p. p. 1609-1614, 2017.

SILVA, G.; SOUSA, A. F. Estudo da viabilidade da produção de água a partir do resfriamento do ar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. v. 13, p. p. 575-580, 2009.

THE TIMES OF ISRAEL. Une société israélienne veut éradiquer le problème de l'eau dans le

monde, 03 junho 2017. Disponível em: <<https://fr.timesofisrael.com/extraire-leau-de-lair-une-societe-israelienne-veut-eradiquer-la-soif-dans-le-monde/>>. Acesso em: outubro 2022.

UTTASILP, C. et al. **Optimal Solar Energy on Thermoelctric Cooler of Water Generator in Case Study on Flood Crisis**. [S.l.]: Japanese Journal of Applied Physics, v. 57, 2018.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinamica**. 8º Edição. ed. [S.l.]: Blucher, 2018.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Wake up to the looming water crisis report warns, 05 outubro 2021. Disponível em:

<<https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/un-rapport-met-en-garde-contre-la-crise-de-leau-qui-se-profile#:~:text=En%202020%2C%203%2C6%20milliards,acc%C3%A8s%20%C3%A0%201%27eau%20potable>>. Acesso em: Outubro 2022.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE. Dia Mundial da Água. **WWF**, 22 Março 2017.

Disponível em:

<https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/areas_prioritarias/pantanal/dia_da_agua/#:~:text=Do%20total%20de%20%C3%A1gua%20dispon%C3%ADvel,1%25%20est%C3%A1%20dispon%C3%ADvel%20para%20consumo>. Acesso em: Outubro 2022.

WRI BRASIL. Estresse Hídrico : Ranking mostra onde há maior risco de faltar água no Brasil e no mundo. **Tratamento de água**, 2022. Disponível em:

<<https://tratamentodeagua.com.br/artigo/estresse-hidrico-ranking/>>. Acesso em: 30 Março 2024.

Anexo 1

Exercício modelado no *Interactive Thermodynamics* (IT)

Ar a 27°C , 1 atm. e 64% de umidade relativa entra em um desumidificador que opera em regime permanente, com uma vazão mássica de 0.0425 kg/s. O ar úmido com umidade relativa de 63% e o condensado saem em fluxos separados, cada qual a 14°C . Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine:

- (a) a energia consumida.
- (b) a temperatura de ponto de orvalho.
- (c) o volume de condensado por unidade de área do dissipador frio durante 11 horas de operação.

Anexo 2

Código elaborado no *Interactive Thermodynamics (IT)*

Dados

```

*/
a = 64
b = 425
c = 63
t = 11 // Tempo de operação do sistema: 11 horas em (s)
T1 = 27 // Temperatura do ar atmosférico (°C)
phi1 = a/100 // Umidade relativa do ar atmosférico
T2 = 14 // Temperatura do ar em (2) (°C)
phi2 = c/100 // Umidade relativa do ar na saída do sistema
Ta = 14 // Temperatura do condensado (°C)
p = 101.3 // Pressão atmosférica (kPa)
m = b/10000 // Vazão volumétrica do ar úmido fornecido pelo ventilador na entarda (1) (m^3/s)
A = (40 * 40) + (26 * 40 * 18) // Área de contato do dissipador frio (mm^2)
D = 20000 // Quantidade de vapor de água em
contato com a superfície fria (ml)

```

//CÓDIGO

```

m1 = m / v1 // Vazão mássica do ar úmido (kg/s)
v1 = va_Tphi(T1,phi1,p) // Volume específico do ar em 1
(m^3/kg)
va = v_PT("Water/Steam", p, Ta) // Volume específico da água em 3 (m^3/kg)
w1 = w_Tphi(T1, phi1, p) //Umidade absoluta em (1) (kg_água/kg_ar)
w2 = w_Tphi(T2, phi2, p) //Umidade absoluta em (2) (kg_água/kg_ar)
h1 = ha_Tphi(T1, phi1, p) //Entalpia específica em (1) (J/kg)
h2 = ha_Tphi(T2, phi2, p) //Entalpia específica em (2) (J/kg)
ha = hlw_T(Ta) //Entalpia específica da água (J/kg)
m2 = m1 / ( 1 + w1) //Vazão mássica do ar em (2) (kg/s)
ma1 = m1 * w1 * v1 * t * 3600 * 10^6 //Volume de água no ar (ml)
ma2 = (w1 - w2) * m2 * va * 10^6 * t * 3600 //Volume de água condensada (ml)
ma = ma2 / A //Volume de condensado por unidade de área do dissipador frio (ml/mm^2)
Ec = ((h2 - h1 + (w1 - w2) * ha) * m2 * t) / 1000 //Energia consumida durante a operação do sistema (kWh)
Ec_1ml = Ec / ma2 //Consumo energético por geração de condensado
(kWh/ml)
Tpo = Tdp_Tphi(T1,phi1,p) //Temperatura de ponto de orvalho (°C)
e = (ma2 / D) * 100 // Eficiência de condensação de água (%)

```

Anexo 3

Resultados obtidos no *Interactive Thermodynamics* (IT) com as variáveis médias de entrada do modelo experimental

Variáveis	Valores
e	77.15
Ec	-0.01766
Ec_1ml	-1.15E-06
h1	63.69
h2	29.88
ha	58.51
m	0.0425
m1	0.04885
m2	0.04816
ma	0.7593
ma1	2.41E+07
ma2	1.54E+04
phi1	0.64
phi2	0.63
Tpo	19.58
v1	0.8699
va	0.001001
w1	0.01435
w2	0.006263
A	2.03E+04
a	64
b	425
c	63
D	2.00E+04
p	101.3
t	11
T1	27
T2	14
Ta	14

Anexo 4

Dados experimentais registrados

DATA	TESTES	HORÁRIOS	DURAÇÃO (H)	UMIDADE RELATIVA FINAL (%)	URmax (%)	URmin (%)	TEMPERATURA FINAL AMBIENTE (°C)	Tmax AMBIENTE (°C)	Tmin AMBIENTE (°C)	TEMPERATURA FINAL PLACA FRIA (°C)	Tmax PLACA FRIA (°C)	Tmin PLACA FRIA (°C)	Var. Méd. Pressão Atmosférica (hPa)	VOLUME DE CONDENSADO GERADO (ML)
08/07/2023	3	07H ÀS 18H	11	35	60	32	28.7	31.4	24.7	3.8	21	1	1016.72	5.5
24/08/2023	6	18H ÀS 05H	11	61	61	32	29	35	29	4.8	25.7	4.3	1001.45	12
28/09/2023	35	18H ÀS 05H	11	61	61	52	25.1	25.9	23.1	1.3	23.1	-0.7	1011.34	14
08/05/2023	1	03H ÀS 14H	11	55	72	54	26	26	22.3	1.7	23.7	-0.9	1019.47	15.5
09/08/2023	19	18H ÀS 05H	11	58	66	54	26.5	29.1	26.3	2.5	22.1	1.8	1017.05	15.5
09/09/2023	20	19H ÀS 06H	11	60	61	41	27.3	30	26.1	4.5	22.9	2.7	1015.51	15.5
19/09/2023	27	17H ÀS 04H	11	63	64	37	28.9	33.8	28.7	4.3	30.1	3.7	1013.41	15.5
21/08/2023	4	18H ÀS 05H	11	61	62	49	25.9	29.1	25.3	2.1	26.7	1	1012.74	16
31/08/2023	11	18H ÀS 05H	11	75	81	69	22.5	23.9	21.8	-0.1	22.1	-0.8	1018.56	16
09/01/2023	12	18H ÀS 05H	11	75	76	65	23.4	27.2	23.1	0.7	23.6	-0.2	1018.61	16
09/04/2023	15	18H ÀS 05H	11	53	63	50	31.3	33.5	31.3	5.7	27.4	5.5	1011.44	16

09/05/20 23	16	18H ÀS 05H	11	62	70	55	26.1	30.6	25.5	1.8	25.3	1.6	1015.98	16
09/07/20 23	18	18H ÀS 05H	11	80	81	58	26	29	22.2	1	25.8	0.9	1023.28	16
29/09/20 23	36	21H ÀS 08H	11	67	67	61	23.8	24.9	23.4	1.2	21.1	0.8	1017.64	16.5
08/06/20 23	2	06H ÀS 17H	11	58	79	53	27.8	28.6	23.6	3.1	23.9	0.7	1019.53	17
26/08/20 23	8	21H ÀS 08H	11	67	83	59	21	23.4	19.4	-1.8	17.6	-3.5	1008.91	17
15/09/20 23	23	19H ÀS 06H	11	59	65	56	21.7	24.6	21	0.6	23.3	-0.4	1011.15	17
18/09/20 23	26	18H ÀS 05H	11	63	71	16	29.6	36.3	28.6	7.7	31.6	5.8	1013.64	17
20/09/20 23	28	17H ÀS 04H	11	76	78	56	25.9	29.2	25.9	2.8	22.8	2.8	1013.94	17.5
30/08/20 23	10	18H ÀS 05H	11	71	83	67	21.4	24	21.4	-1.2	21.8	-1.3	1014.25	18
09/02/20 23	13	18H ÀS 05H	11	73	74	49	26.6	29.8	26.4	2.9	25.5	2.3	1015.34	18
21/09/20 23	29	17H ÀS 04H	11	61	63	52	28.4	31	27.3	4.4	26.1	3.1	1014.6	18
24/09/20 23	31	16H ÀS 03H	11	63	64	49	31.3	35.5	31.3	6.6	29	6.5	1011.9	18
25/08/20 23	7	22H ÀS 09H	11	71	73	57	23.9	27.4	23.1	1.2	23.9	-0.1	1000.9	19
09/03/20 23	14	18H ÀS 05H	11	76	78	55	26.7	32.3	26.7	2.7	27.9	2.6	1013.58	19
09/06/20 23	17	19H ÀS 06H	11	72	81	63	22.7	24.3	21.8	0.6	20.8	-0.6	1024.51	19
23/09/20 23	30	13H ÀS 00H	11	71	71	55	27.8	32.6	27.6	4.7	28.8	4	1011.8	19
22/08/20	5	18H ÀS	11	57	62	48	27.4	30.5	27.4	4	24.8	3.8	1001.09	19.5

23		05H												
17/09/20		18H ÀS												
23	25	05H	11	64	72	40	29.3	33.6	27.8	6.3	27.4	5	1012.56	20
30/09/20		20H Às												
23	37	07H	11	84	88	63	23.6	26.2	22	2.3	22	0.6	1013.86	20
29/08/20		18H ÀS												
23	9	05H	11	89	89	82	21	21.8	20.9	-0.2	18.6	-0.3	1020.47	20.5
10/03/20		17H ÀS												
23	40	04H	11	78	78	73	23.8	24.2	23.6	2.1	21.6	1.5	1010.09	20.5
09/11/20		17H ÀS												
23	22	04H	11	61	63	48	27.3	30.8	26.3	4.8	22.3	3.6	1016.92	21
27/09/20		17H ÀS												
23	34	04H	11	68	69	56	26.5	33.3	26.5	3	29.6	2.7	1000.23	22
10/02/20		18H ÀS												
23	39	05H	11	80	80	72	23.1	23.9	23	1.3	21.1	0.8	1011.34	22.5
25/09/20		17H ÀS												
23	32	04H	11	81	87	58	27.1	31.8	25.9	4.5	23.9	3.2	1011.52	23
26/09/20		17H ÀS												
23	33	04H	11	80	80	58	29.2	32.3	29	6	27.4	5.6	1008.46	23.5
09/10/20		17H ÀS												
23	21	04H	11	67	70	53	26.9	30.7	26.9	4.5	21.6	4.4	1015.87	24
10/04/20		18H ÀS												
23	41	05H	11	82	82	65	27.3	31.7	27.1	4.9	26.6	4.5	1007.49	24
10/01/20		19H ÀS												
23	38	06H	11	79	85	79	23.4	25.3	23.3	1.2	22.4	1.2	1009.94	24.5
16/09/20		19H ÀS												
23	24	06H	11	72	79	60	25.8	27.9	23.8	4.5	23.9	3.2	1011.86	26
10/05/20		18H ÀS												
23	42	05H	11	82	84	68	27.3	29.9	26.8	5	26.5	4.5	1006.25	27

Anexo 5

Dados experimentais tratados

Data	TESTES	Var. Méd. Pressão Atmosférica (kPa)	Umidade relativa média	Temperatura do ambiente média (°C)	Temperatura do dissipador frio média (°C)	Temperatura de ponto de orvalho média (°C)	(Temp. amb) / (Temp. d. frio) média	Energia consumida em 11 horas	Volume de condensado por área do dissipador frio	Consumo energético por geração de condensado
26/08/2023	8	100.891	71	21.4	7.05	15.92	0.33	0.17	0.00084	0.000152112
08/07/2023	3	101.672	46	28.05	11	15.35	0.39	0.17	0.00027	2.25558E-05
29/08/2023	9	102.047	85.5	21.35	9.15	18.82	0.43	0.17	0.00101	7.20613E-05
09/08/2023	19	101.705	60	27.7	11.95	19.23	0.43	0.17	0.00076	4.92126E-05
09/06/2023	17	102.451	72	23.05	10.1	17.73	0.44	0.17	0.00094	6.03251E-05
09/10/2023	21	101.587	61.5	28.8	13	20.66	0.45	0.17	0.00118	7.62002E-05
30/08/2023	10	101.425	75	22.7	10.25	18.04	0.45	0.17	0.00089	5.71501E-05
29/09/2023	36	101.764	64	24.15	10.95	16.91	0.45	0.17	0.00081	5.07505E-05
09/11/2023	22	101.692	55.5	28.55	12.95	18.78	0.45	0.17	0.00103	6.45915E-05
09/09/2023	20	101.551	51	28.05	12.8	16.97	0.46	0.17	0.00076	4.76747E-05
28/09/2023	35	101.134	56.5	24.5	11.2	15.29	0.46	0.17	0.00069	4.3061E-05
20/09/2023	28	101.394	67	27.55	12.8	20.87	0.46	0.17	0.00086	5.38263E-05
09/01/2023	12	101.861	70.5	25.15	11.7	19.41	0.47	0.17	0.00079	4.92126E-05
31/08/2023	11	101.856	75	22.85	10.65	18.19	0.47	0.17	0.00079	4.77213E-05
10/02/2023	39	101.134	76	23.45	10.95	18.98	0.47	0.17	0.00111	6.51343E-05
24/08/2023	6	100.145	46.5	32	15	19.11	0.47	0.17	0.00059	3.47383E-05
30/09/2023	37	101.386	75.5	24.1	11.3	19.50	0.47	0.17	0.00098	5.78972E-05

25/09/2023	32	101.152	72.5	28.85	13.55	23.41	0.47	0.17	0.00113	6.65818E-05
08/06/2023	2	101.953	66	26.1	12.3	19.25	0.47	0.17	0.00084	4.78065E-05
25/08/2023	7	100.09	65	25.25	11.9	18.20	0.47	0.17	0.00094	5.19466E-05
08/05/2023	1	101.947	63	24.15	11.4	16.67	0.47	0.17	0.00076	4.23775E-05
09/05/2023	16	101.598	62.5	28.05	13.45	20.22	0.48	0.17	0.00079	4.37445E-05
10/03/2023	40	101.009	75.5	23.9	11.55	19.31	0.48	0.17	0.00101	5.60477E-05
10/01/2023	38	100.994	82	24.3	11.8	21.03	0.49	0.17	0.00121	6.34584E-05
22/08/2023	5	100.109	55	28.95	14.3	19.00	0.49	0.17	0.00096	5.05077E-05
09/02/2023	13	101.534	61.5	28.1	13.9	20.01	0.49	0.17	0.00089	4.66225E-05
21/09/2023	29	101.46	57.5	29.15	14.6	19.90	0.50	0.17	0.00089	4.66225E-05
15/09/2023	23	101.115	60.5	22.8	11.45	14.76	0.50	0.17	0.00084	4.29033E-05
09/04/2023	15	101.144	56.5	32.4	16.45	22.65	0.51	0.17	0.00079	3.93701E-05
21/08/2023	4	101.274	55.5	27.2	13.85	17.52	0.51	0.17	0.00079	3.93701E-05
09/03/2023	14	101.358	66.5	29.5	15.25	22.60	0.52	0.17	0.00094	4.56117E-05
09/07/2023	18	102.328	69.5	25.6	13.35	19.61	0.52	0.17	0.00079	3.84098E-05
16/09/2023	24	101.186	69.5	25.85	13.55	19.85	0.52	0.17	0.00128	6.09299E-05
17/09/2023	25	101.256	56	30.7	16.2	20.92	0.53	0.17	0.00098	4.47387E-05
10/04/2023	41	100.749	73.5	29.4	15.55	24.17	0.53	0.17	0.00118	5.24934E-05
24/09/2023	31	101.19	56.5	33.4	17.75	23.58	0.53	0.17	0.00089	3.85142E-05
26/09/2023	33	100.846	69	30.65	16.5	24.31	0.54	0.17	0.00116	4.92126E-05
27/09/2023	34	100.023	62.5	29.9	16.15	21.96	0.54	0.17	0.00108	4.51115E-05
19/09/2023	27	101.341	50.5	31.25	16.9	19.75	0.54	0.17	0.00076	3.17831E-05
23/09/2023	30	101.18	63	30.1	16.4	22.28	0.54	0.17	0.00094	3.81649E-05
10/05/2023	42	100.625	76	28.35	15.5	23.71	0.55	0.17	0.00133	5.11054E-05
18/09/2023	26	101.364	43.5	32.45	18.7	18.45	0.58	0.17	0.00084	3.09857E-05