

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

ANÁLISE DE SISTEMA DE OBTENÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DE
DESUMIDIFICAÇÃO DO AR COM USO DE CÉLULA PELTIER

Luiz Carvalho Rocha
Raphael Tavares Cachoeira

Projeto de Graduação apresentado ao curso
de Engenharia Mecânica do CEFET/RJ, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Prof. Orientador: Carlos Eduardo Guedes Catunda

Rio de Janeiro
Novembro de 2016

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaríamos de agradecer a Deus por proporcionar saúde e sabedoria para seguir em nossa caminhada rumo à graduação em Engenharia Mecânica.

Agradecemos, também, nossos familiares que nos apoiaram, mesmo que nos momentos mais difíceis, sendo o alicerce que nos manteve firme durante toda nossa vida. Pais, mães, irmãos, enfim todos que, a sua maneira, puderam contribuir para que lográsssemos êxito e sucesso em nossa trajetória.

Agradecemos também nossas companheiras que nos proporcionaram conforto, carinho e principalmente compreensão, pois dias e dias afinco estudando, escrevendo nosso projeto e realizando os experimentos, que consumiram muitas horas de nosso dia, mas mesmo assim elas, sempre otimizadas, não nos deixou desistir muito menos desanimar.

Aos mestres, que nos acompanham desde o primeiro semestre, que contribuíram com suas experiências, sabedoria nos proporcionando o melhor ensino possível. Ficamos orgulhosos em dizer que estudamos no CEFET-RJ e estamos nos formando aqui. A todos os docentes fica aqui nossa gratidão eterna.

Ao nosso orientador Carlos Eduardo Guedes Catunda, que desde o início apostou em nosso projeto, nos ajudou sempre que solicitado, mesmo tarde da noite ou de manhã cedo, sempre solícito e disposto a nos ajudar. Agradecemos as palavras duras nos momentos necessários, as broncas que nos acordaram nos momentos de sono, mas também vimos a sua gratidão por um projeto experimental bem feito e inovador em nossa academia.

A banca que nos avaliou de maneira bastante criteriosa, dando sugestões valiosíssimas, criticando de maneira construtiva, fica aqui nossa imensa gratidão por ter lido e avaliado nosso projeto.

Resumo

O presente estudo tem por objetivo analisar um sistema de obtenção de água a partir do vapor presente no ar atmosférico. Para tal foi construído um protótipo de sistema capaz de gerar água através do resfriamento do vapor contido no ar. Para isso foi utilizada uma célula Peltier como bomba de calor para resfriar uma superfície buscando obter condensação de vapor. Foram realizadas medições da performance do protótipo construído e as mesmas foram comparadas com cálculos realizados utilizando modelos matemáticos psicrométricos adaptados para esse estudo. Os resultados obtidos mostram que o modelo psicrométrico utilizado pelos autores está bem correlacionado com o sistema utilizado no estado. Foi obtida uma capacidade média de extração de água de 22,40 kg/m²/dia, o que apresenta concordância com experimentos realizados por outros autores para sistemas do mesmo tipo. O consumo médio de energia foi de 0,11 kWh durante os experimentos, o que indica um potencial de viabilidade econômica alto para o sistema proposto. Comparando os valores de condensado obtido e esperado, obteve-se uma eficiência média de extração de 3%, o que indica que o modelo matemático proposto e o protótipo ainda podem ser melhorados de modo a refinar os dados obtidos.

Palavras chaves: Célula Termoelétrica, Desumidificação, Efeito Peltier, Psicrometria, Vapor D'água.

Abstract

The objective of the present study is to analyze a system for water extraction from the vapour present in the Atmospheric air. For this study, the authors constructed a prototype of this system capable of generating water through the cooling of the vapor contained in the air. A Peltier cell was used as a heat pump to cool a surface in order to obtain water condensation. The performance of the system was measured and compared with calculations made with a psychrometric model adapted for this study. The results obtained show the psychrometric model utilized by the authors is well correlated with the system. An average water extraction capacity of 22,40 kg/m²/day was obtained, which agrees with experiments performed by other authors for systems of the same type. The average energy consumption was 0.11 kWh during the experiments, indicating a potential economic feasibility for the proposed system. Comparing the obtained and expected condensate values, an extraction average of 3% was obtained, which indicates that the utilized mathematical model and the prototype can still be improved in order to refine the obtained data.

Keywords: Thermoelectric Cell, Dehumidification, Peltier Effect, Psychrometry, Water Vapour.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivo	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Psicrometria.....	3
2.2 Formação do Orvalho	5
2.3 Qualidade da Água	10
2.4 Sistemas de Processamento de Vapor de Água (AWVP).....	11
2.4.1 Condensador por Resfriamento de Superfície	12
2.4.1.1 Resfriamento de Superfície Através de Bomba de Calor	13
2.4.1.2 Resfriamento de Superfície Através de Radiação.....	14
2.4.2 Condensador por Absorção e Regeneração de Vapor.....	15
2.4.3 Condensador por Convecção Controlada ou Induzida.....	16
2.5 Células de Refrigeração Através do Efeito Peltier	17
2.5.1 Efeito Peltier	17
2.6 Camada Limite Térmica	22
2.7 Modelos Matemáticos.....	23
2.7.1 Modelo Psicrométrico.....	23
2.7.1.1 Pressão de Saturação.....	23
2.7.1.2 Umidade Absoluta	24
2.7.1.3 Umidade Relativa.....	25
2.7.1.4 Entalpia	25
2.7.1.5 Balanço de Energia e Massa	26
2.7.2 Modelo Termoelétrico	26
2.7.2.2 Efeito Peltier	27

2.7.2.3 Efeito Joule	28
2.7.2.4 Condução de Calor entre as Faces da Placa.....	28
2.7.2.5 Calor Total trocado pelas Faces	29
2.7.3 Modelo de Camada Limite Térmica	30
3. METODOLOGIA	30
3.1 Calculadora Psicrométrica.....	30
3.2 Ensaio em Escala de Bancada	33
3.3 Aquisição e Medição dos Dados	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 Aspectos Climatológicos	37
4.2 Resultados dos Experimentos com o Protótipo	39
5. CONCLUSÃO	50
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	52
Referências	54

Lista de Figuras

<i>Figura 1: Disponibilidade de Água no Planeta [2] adaptado.....</i>	<i>1</i>
<i>Figura 2: Proporção dos Componentes do Ar [8] Adaptado</i>	<i>3</i>
<i>Figura 3: Carta Psicrométrica para o Nível do Mar [9]</i>	<i>4</i>
<i>Figura 4: Efeito da Temperatura da Superfície de Refrigeração na Performance de Evaporador [12] Adaptado.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 5: Influência de Maior Área de Superfície de Condensação na Performance de Evaporador [12] Adaptado.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 6: Influência da Vazão do Ar na Performance de Evaporador [12] Adaptado.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 7: Aparato Experimental com Garrafas PET [4]</i>	<i>8</i>
<i>Figura 8: Massa de Orvalho Produzida [4] Adaptado.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 9: Massa de Condensado Aquoso para Diferentes Velocidades de Vento [11]</i>	<i>10</i>
<i>Figura 10: Visão Geral dos Tipos de Processador de Vapor de Água [7] Adaptado.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 11: Ciclo de Bomba de Calor [12] Adaptado.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 12: Esquema de Resfriamento Radiativo [20] Adaptado</i>	<i>14</i>
<i>Figura 13: Condensador por Resfriamento Radiativo [15]</i>	<i>15</i>
<i>Figura 14: Esquema de Coletor de Água por Absorção e Regeneração [22] Adaptado</i>	<i>16</i>
<i>Figura 15: Esquema de Célula Peltier [25] Adaptado.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 16: COP em Função do Gradiente de Temperatura entre as Faces de Célula Peltier [27].....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 17: COP em Função da Corrente Elétrica [27]</i>	<i>19</i>
<i>Figura 18: Relação entre Gradiente de Temperatura e Capacidade de Refrigeração de Célula Peltier Modelo TEC 12706 [29]</i>	<i>20</i>
<i>Figura 19: Relação entre Tensão Aplicada e Gradiente de Temperatura de Célula Peltier Modelo TEC 12706 [29]</i>	<i>21</i>
<i>Figura 20: Ilustração Camada Limite Térmica.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 21: Representação das Formas de Troca Térmica na Placa Peltier [30] Adaptado ..</i>	<i>29</i>
<i>Figura 22: Correção da Área de Troca Térmica via Camada Limite</i>	<i>32</i>
<i>Figura 23: Fluxograma da Metodologia de Cálculo.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 24:Exemplo de Cálculo Utilizando a Calculadora Psicrométrica</i>	<i>33</i>
<i>Figura 25:Protótipo de Sistema de Obtenção de Água para Testes de Bancada.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 26: Diagrama de Funcionamento do Protótipo Simplificado.....</i>	<i>35</i>

<i>Figura 27: Umidade Relativa do Ar no Rio de Janeiro - Média Mensal entre 2006 e 2016</i>	
[34].....	37
<i>Figura 28: Temperatura Máxima Média no Rio de Janeiro - Média Mensal entre 2006 e 2016</i>	
[34].....	38
<i>Figura 29: Temperatura Mínima Média no Rio de Janeiro - Média Mensal entre 2006 e 2016</i>	
[34].....	38
<i>Figura 30: Curva Normal de Condensado Obtido</i>	40
<i>Figura 31: Curva Normal de Condensado Esperado.....</i>	40
<i>Figura 32: Curvas de Condensado Esperado e Condensado Obtido por Dia de Experimento</i>	
.....	41
<i>Figura 33: Gráfico de Condensado x Temperatura.....</i>	41
<i>Figura 34: Gráfico de Condensado x Umidade Relativa</i>	42
<i>Figura 35: Gráfico Condensado x Umidade após expurgo do ponto.....</i>	43
<i>Figura 36: Gráfico de Capacidade de Extração x Temperatura Ambiente e Umidade Relativa</i>	
.....	44
<i>Figura 37: Formação de Filme Líquido na Superfície de Condensação durante Experimento</i>	
.....	45
<i>Figura 38: Curva Normal de Capacidade de Extração.....</i>	46
<i>Figura 39: Correção da Figura 32 por Camada Limite.....</i>	47
<i>Figura 40: Correção da Figura 33 por Camada Limite.....</i>	48
<i>Figura 41: Correção da Figura 34 por Camada Limite.....</i>	48

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1: Comparação de Tecnologias de Condensação de Vapor [26] Adaptado</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 2: Especificações da Célula Peltier Modelo TEC1 12706 [29] Adaptado</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 3: Parâmetros Utilizados e Resultados Obtidos nos Experimentos.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 4: Comparação entre Capacidades de Extração de Diversos Autores.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 5: Correção da Tabela 3 por Camada Limite.....</i>	<i>49</i>

1. INTRODUÇÃO

A água é essencial para a vida, e, portanto, o homem independentemente do tempo e da região em que esteja localizado sempre precisou se preocupar em obter novos modos de extrair água do ambiente. Agora que a humanidade se vê cada vez mais próxima de uma crise de recursos naturais, é cada vez mais necessário avaliar novos métodos de se obter água. O vapor contido no ar atmosférico possui um potencial grande ainda a ser explorado e que pode ajudar a complementar as reservas hídricas de muitas comunidades.

1.1 Motivação

Das reservas de água que dispomos no nosso planeta, apenas 2,5% são de água potável. Dessa água, em torno de 1% é de fácil acesso, pois a maior parte está presa em geleiras, sendo apenas 0,25% em rios ou lagos [1, 2]. No gráfico da Figura 1 podem-se ver as proporções dos diferentes tipos de reservas hídricas do planeta e também estão apresentadas as diferentes reservas de água potável:

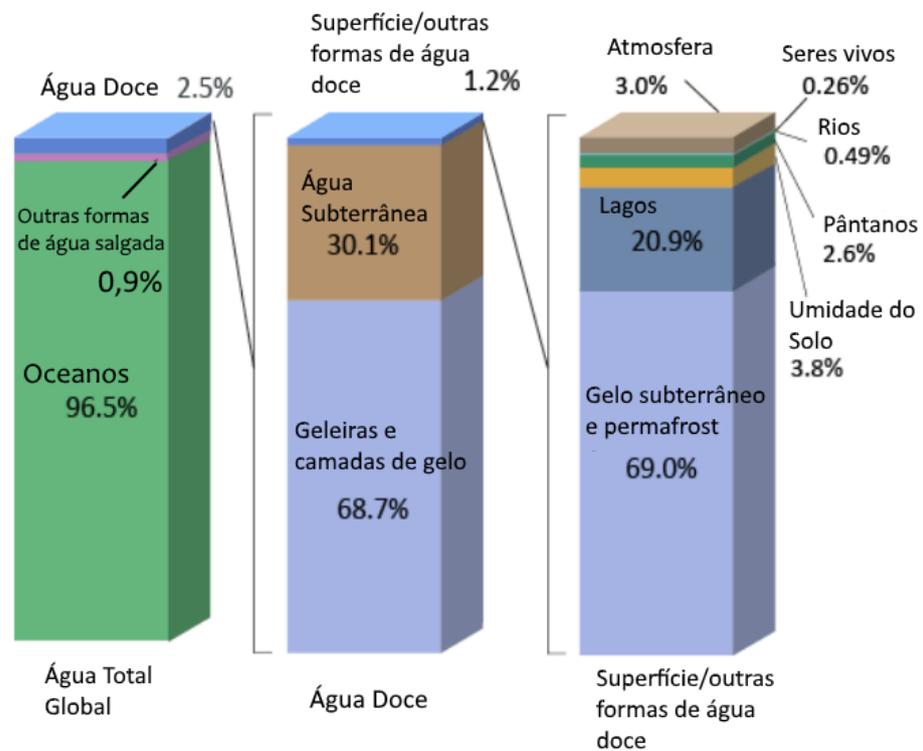


Figura 1: Disponibilidade de Água no Planeta [2] adaptado.

Sabe-se atualmente, que 85% da população mundial vive nas regiões mais secas do planeta e que aproximadamente 783 milhões de pessoas não tem acesso à água limpa [3]. Somando-se a isso, o fato de que a população mundial cresce em ritmo acelerado, o consumo de água para produção de comida e para consumo humano só tende a aumentar [3]. Sendo assim, é imperativo que se busquem novas formas de obtenção de água de modo a se criar ambientes mais propícios para a habitação humana e evitar possíveis crises de abastecimento hídrico.

1.2 Justificativa

Os primeiros cinco quilômetros da atmosfera contêm aproximadamente 90% da massa total de vapor d'água do planeta, o que corresponde a seis vezes o volume de água contido nos rios como pode ser visto na Figura 1. A utilização do vapor presente na atmosfera para geração de água pode ser muito benéfica para comunidades carentes em reservas hídricas, propiciando uma melhora na qualidade de vida dessas pessoas. O primeiro aparato experimental de que se tem registro para obtenção de água a partir da condensação de vapor foi construído pelo engenheiro russo F. I. Zibold em 1912 [4, 5, 6]. Desde então, muitos outros estudos foram conduzidos e graças à melhora da tecnologia e uma maior compreensão física do problema, se tornou possível produzir água a partir do vapor com mais facilidade utilizando diferentes métodos, os quais serão exemplificados ao longo desse trabalho. As tecnologias para processamento de vapor de água atmosférica (Atmospheric Water Vapour Processing ou AWVP) ainda estão em desenvolvimento, mas elas têm potencial para se adequar a comunidades como as de países em desenvolvimento, além de serem mais simples e fáceis de operar do que concorrentes como os sistemas de dessalinização [7].

1.3 Objetivo

Esse trabalho busca apresentar e analisar um protótipo de sistema capaz de gerar água através do resfriamento do vapor contido no ar. Para isso será utilizada uma célula Peltier para resfriar uma superfície buscando obter condensação de vapor. Serão realizadas medições da performance desse protótipo e as mesmas serão comparadas com cálculos realizados utilizando modelos experimentais e teóricos disponíveis e adaptados para esse estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O campo da psicrometria compreende o estudo das propriedades tanto físicas quanto termodinâmicas de misturas gás-vapor. Para se obter água através do ar atmosférico é necessário condensar essa água, o que gera mudanças físicas, alterando as propriedades termodinâmicas do ar, que é uma mistura de gases e vapor d'água. Dessa forma, o estudo da psicrometria é essencial para a compreensão dos fenômenos envolvidos. A célula Peltier utilizada no protótipo utiliza o efeito termoelétrico para o seu funcionamento, o qual também será estudado.

2.1 Psicrometria

O ar atmosférico é composto por diversos gases como oxigênio, nitrogênio, gás carbônico e gases nobres, mas também possui proporções variáveis, dependendo das condições meteorológicas e geográficas, de vapor d'água. Na Figura 2 podemos ver as diferentes proporções dos constituintes do ar atmosférico:

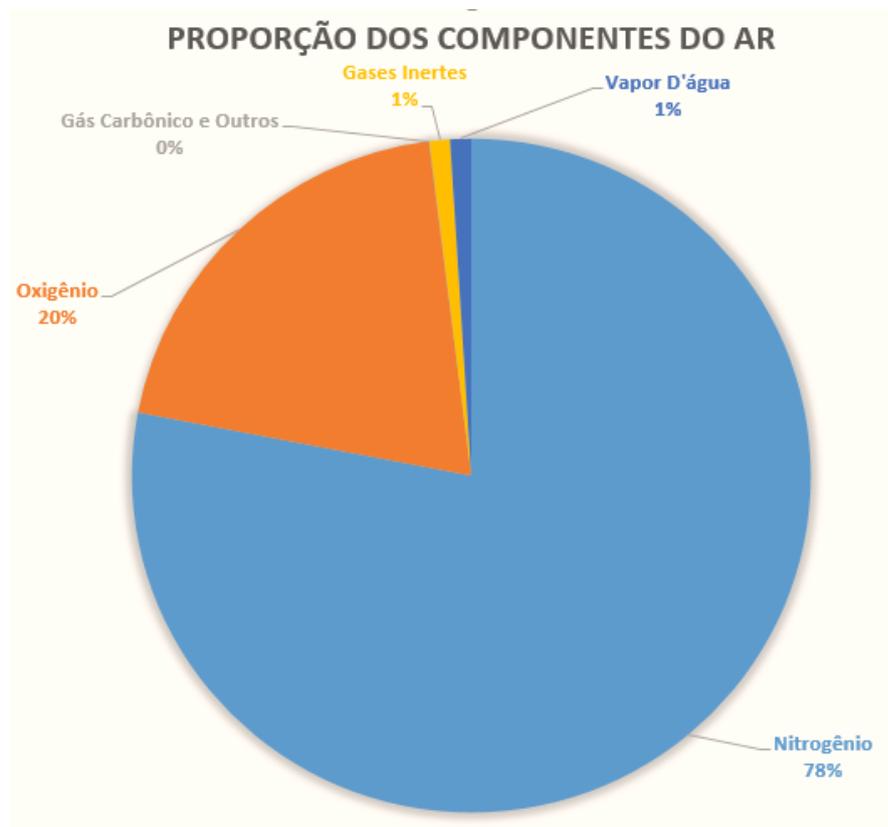


Figura 2: Proporção dos Componentes do Ar [8] Adaptado

Para melhor estudar as misturas gás-vapor, a psicrometria separa o ar em “ar seco” e “ar úmido”, aonde o ar úmido consiste do vapor d’água e o ar seco consiste dos outros gases. A proporção entre o ar seco atmosférico e o ar úmido é chamada de umidade absoluta. Para uma determinada temperatura e pressão ambientes, existe uma umidade absoluta máxima. Quando o ar se encontra nesse estado, ele se diz saturado e a temperatura e pressão correspondentes são chamadas de temperatura e pressão de saturação. A fração que corresponde a proporção entre a umidade absoluta atual e a máxima para uma determinada temperatura e pressão é chamada de umidade relativa. As diferentes propriedades físicas e termodinâmicas da mistura ar-vapor e como elas se relacionam com as variações de temperatura podem ser avaliadas em uma carta psicrométrica. Essa carta é desenhada para uma pressão específica, pois a variação da pressão também altera as propriedades da mistura ar-vapor. Na Figura 3 pode-se ver um exemplo de carta psicrométrica para a pressão ao nível do mar:

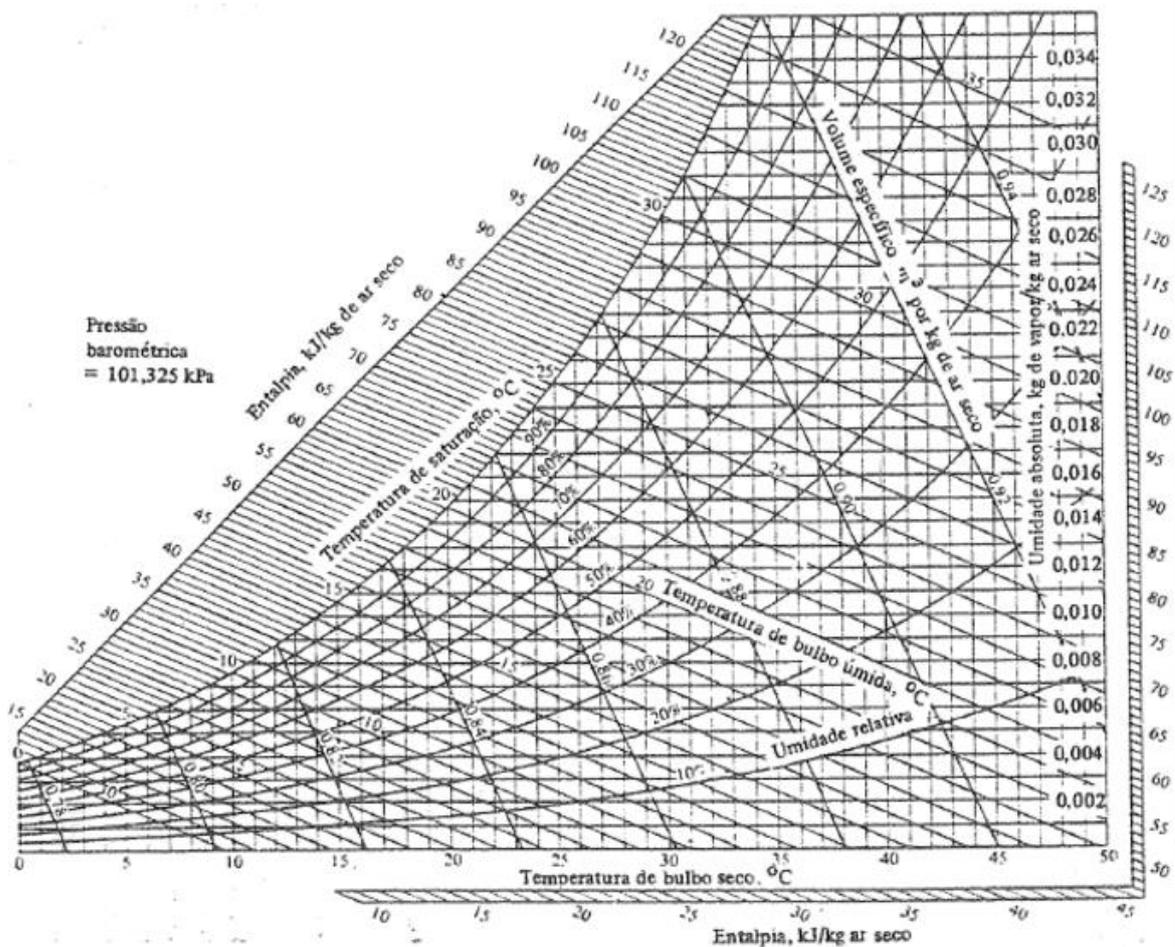


Figura 3: Carta Psicrométrica para o Nível do Mar [9]

Um ponto na carta psicrométrica equivale a um estado de um sistema, sendo, portanto, todas as propriedades como por exemplo umidade absoluta e temperatura de saturação específicas para aquele ponto. Em um sistema para obtenção de água como o estudado, buscase que o estado final do sistema esteja à esquerda da curva de temperatura de saturação de modo que a umidade absoluta seja máxima para aquele dado sistema, ficando em uma temperatura abaixo da temperatura de saturação. Quando isso ocorre, o ar não suporta mais umidade, condensando o excedente até que o novo estado final fique sobre ou à direita da curva de temperatura de saturação. Deseja-se também que o estado final do sistema esteja o mais abaixo possível do estado inicial, pois isso aumenta a variação de umidade absoluta entre os dois estados, o que por sua vez aumenta a quantidade de condensado.

2.2 Formação do Orvalho

O orvalho é a mudança de fase do vapor para líquido, ou a condensação da água presente no ar atmosférico [10]. O orvalho geralmente se forma em uma superfície quando a sua temperatura está abaixo da chamada temperatura de orvalho, que é a temperatura de saturação do ar úmido à pressão constante [10, 11]. Adicionalmente, a formação de orvalho é facilitada por:

1. Alta umidade absoluta no ar
2. Alta diferença de temperatura entre a superfície de condensação e o ar
3. Aumento nas dimensões da superfície de condensação
4. Aumento da pressão à qual o ar está submetido
5. Utilizando superfícies hidrofílicas
6. Maior Vazão de Ar

Uma maior umidade absoluta aumenta o ponto de orvalho, aproximando a temperatura de saturação da temperatura ambiente. Dessa forma, menos resfriamento do ar é necessário para a formação do orvalho. A temperatura da superfície de condensação influencia diretamente na troca de calor com o ar. Uma diminuição na temperatura da superfície eleva a troca de calor e conseqüentemente resfria mais o ar, aproximando a sua temperatura da temperatura de saturação. Pode-se observar como o estado final do sistema fica mais abaixo do estado inicial na carta psicrométrica, ou seja, com menor umidade absoluta, quanto menor for a temperatura da superfície de refrigeração na Figura 4:

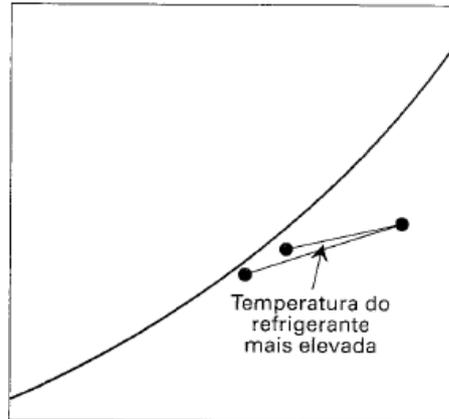


Figura 4: Efeito da Temperatura da Superfície de Refrigeração na Performance de Evaporador [12]

Adaptado

Uma maior superfície de condensação aumenta a área de troca de calor, intensificando o resfriamento do ar, aproximando a sua temperatura da temperatura de saturação e diminuindo a sua umidade, ou seja, gerando condensado. Isso pode ser visto na Figura 5:

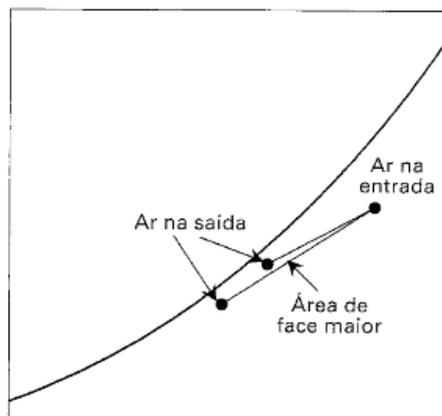


Figura 5: Influência de Maior Área de Superfície de Condensação na Performance de Evaporador [12]

Adaptado

O aumento da pressão diminui a quantidade de vapor que a mistura suporta, aumentando assim sua umidade relativa, até que ela atinja o ponto de saturação. As superfícies hidrofílicas por sua vez auxiliam na nucleação do orvalho, diminuindo a energia necessária para sua formação [10]. Uma maior vazão de ar tende a aumentar o volume de condensado obtido, pois a quantidade de ar sendo resfriado no mesmo intervalo de tempo aumenta. Elevar a vazão de ar também aumenta a troca de calor da superfície de condensação com o ar, contudo isso ocorre com mais intensidade na superfície de condensação, pois quanto mais se eleva a velocidade do fluxo de ar, menor o tempo disponível para remover o calor latente do mesmo e

gerar condensado. Dessa forma, aumentar a vazão do ar inicialmente tende a elevar o volume de condensado obtido devido ao maior volume de ar sofrendo troca térmica e ao maior coeficiente convectivo resultante das elevadas velocidades da corrente de ar, porém gradualmente essa tendência diminui conforme a velocidade do ar se eleva devido ao menor tempo disponível para transferência do calor latente, o que causa diminuição do volume de condensado gerado. Idealmente deve-se utilizar baixas velocidades de vento, como pode ser visto na Figura 6:

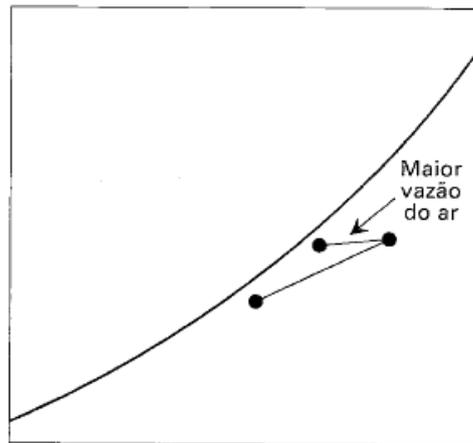


Figura 6: Influência da Vazão do Ar na Performance de Evaporador [12] Adaptado

G. da Silva e F. d. A. S. de Sousa [4] realizaram um estudo onde congelaram água contida em Garrafas PET e as deixaram expostas ao ar, de modo que as mesmas serviriam de superfície de condensação e formação de orvalho, o qual seria posteriormente coletado por uma tubulação, como pode ser visto na Figura 7:

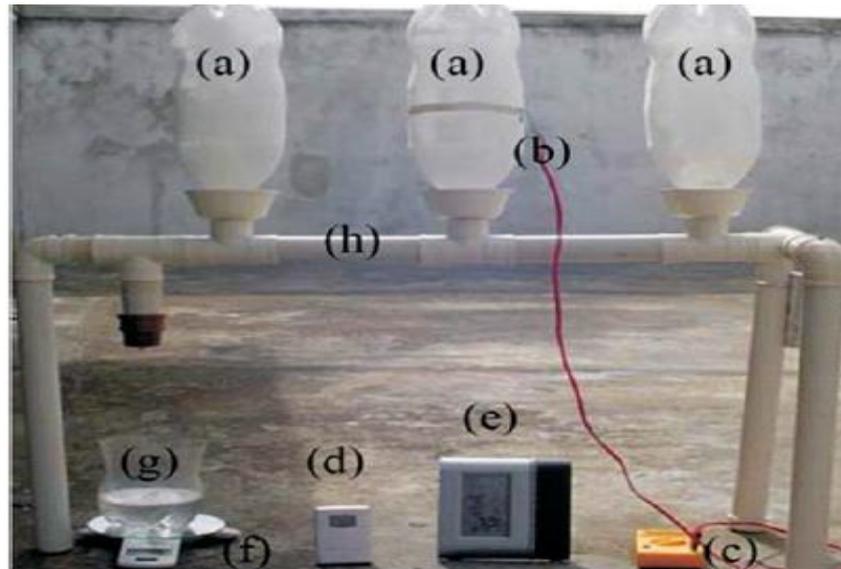


Figura 7: Aparato Experimental com Garrafas PET [4]

Através dos seus experimentos os autores chegaram a conclusão que a massa de orvalho gerada está diretamente relacionada à diferença de umidade entre a superfície de condensação e o ar ambiente, ou seja, conforme as umidades da superfície de condensação e do ar se aproximam, a massa de orvalho gerada diminui, como pode ser visto no gráfico da Figura 8:

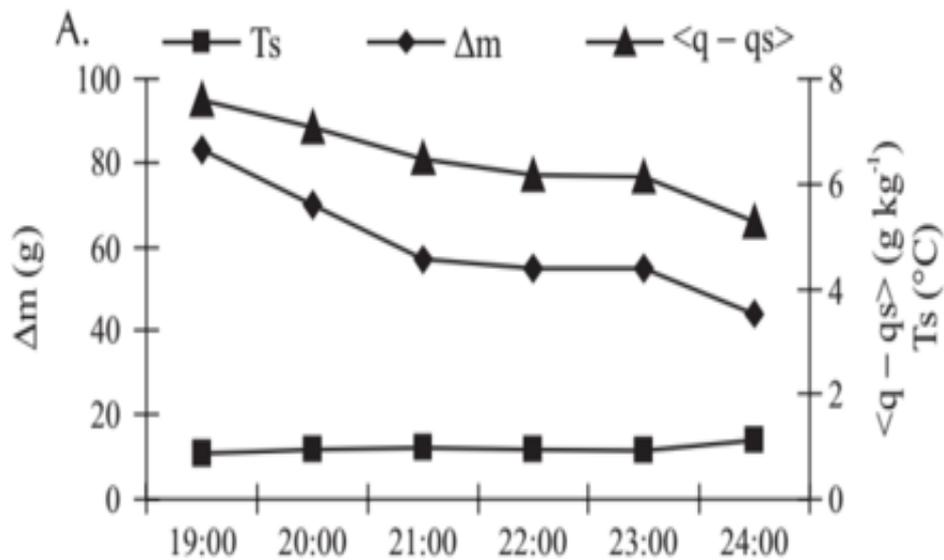


Figura 8: Massa de Orvalho Produzida [4] Adaptado

Na Figura 8, a temperatura da superfície de condensação é T_s , a massa de orvalho produzida é Δm e a diferença entre as umidades é $\langle q - q_s \rangle$.

Para a formação de condensado é necessário que ocorra a transferência do calor latente do vapor para a superfície de condensação, pois somente com a remoção de todo o calor latente ocorre a mudança de fase de vapor para líquido. Devido à transferência de calor latente do ar para a superfície de condensação, ocorre um aumento na temperatura da superfície de condensação, o que diminui a sua eficiência. A capacidade de refrigeração da superfície deve levar em conta essa perda de eficiência de modo a não diminuir a performance da mesma [7]. Resfriamento do fluxo de ar após o início da formação de orvalho não produz efeito, pois o calor transferido é convertido em calor sensível que é posteriormente removido do sistema pelo fluxo de ar não gerando condensado adicional [7]. Adicionalmente, para formação do condensado deve ocorrer a nucleação do mesmo, ou seja, a formação de uma gota termodinamicamente estável [13]. Para que isso ocorra é necessário não somente que a temperatura da superfície esteja no ponto de orvalho para que a pressão de saturação na superfície de condensação fique abaixo da pressão de saturação do ar, mas também é necessário vencer uma barreira de energia que está relacionada à interface líquido-vapor [7, 13]. Normalmente, devido a essa barreira, a nucleação ocorreria muito abaixo da temperatura de orvalho, mas na natureza ela ocorre a temperaturas mais próximas devido às propriedades de nucleação das superfícies de condensação que diminuem ou eliminam a energia necessária para vencer a tensão de interface líquido-vapor [13].

O processo de formação de orvalho pode ser atrasado ou até mesmo impedido caso a capacidade de refrigeração do sistema de condensação seja insuficiente devido à grandes velocidades de corrente que diminuem o tempo de exposição do ar à troca térmica, impedindo que todo o calor latente seja removido [10, 11]. B. Habeebullah [11] realizou um experimento onde utilizou serpentinas de um evaporador de sistema de climatização como superfície de condensação. O autor realizou o experimento para diferentes velocidades de ar, como pode ser visto na Figura 9:

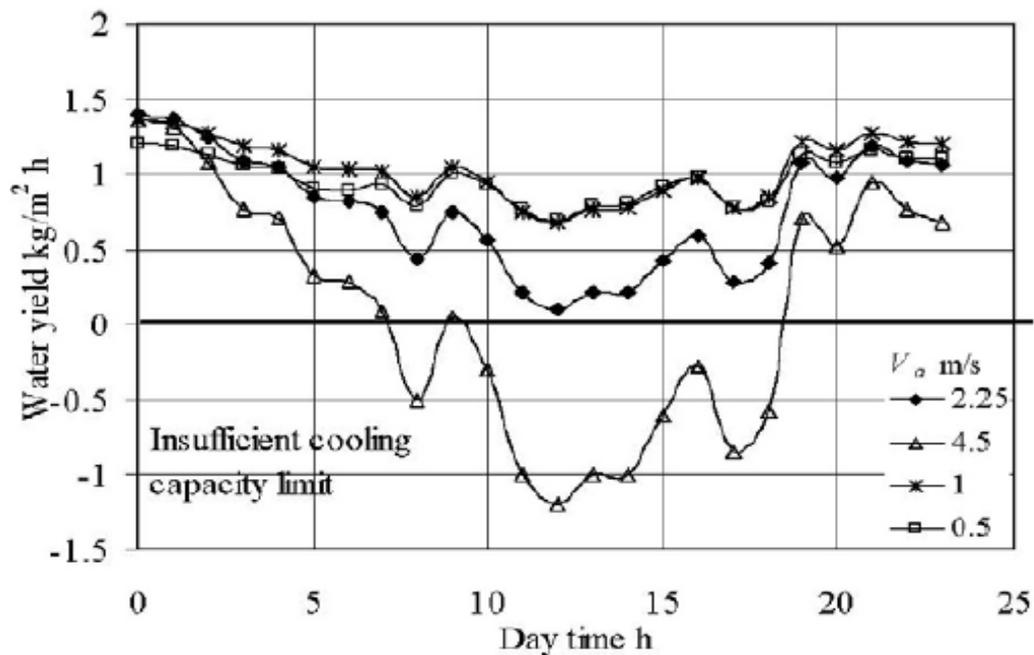


Figura 9: Massa de Condensado Aquoso para Diferentes Velocidades de Vento [11]

Através dos resultados, podem-se notar que as maiores quantidades de condensado ocorrem nas menores velocidades de ar, como é esperado. Porém a quantidade de água condensada à velocidade do ar de 0,5 m/s é menor do que à velocidade de 1,0 m/s devido à baixa troca térmica com o ar, o que gerou congelamento parcial da superfície de condensação e o surgimento de uma resistência térmica adicional no sistema devido à presença do gelo, acarretando em uma diminuição do condensado [11]. Para velocidades de 4,5 m/s nota-se que não ocorreu condensado durante um período devido ao pouco tempo de exposição do ar à troca térmica. Dessa forma, a capacidade de refrigeração da serpentina não foi suficiente para remover todo o calor latente no tempo disponível [11]. Pode-se concluir que a velocidade do ar deve ser alta o suficiente para manter uma troca térmica que impeça o congelamento do condensado formado, mas que também não seja alta a ponto de impedir a transferência total do calor latente do vapor para a superfície de condensação.

2.3 Qualidade da Água

A água produzida por condensação deve ser própria para o consumo ou de fácil adequação, para que o sistema de geração de água seja viável. A água coletada da atmosfera pode não ser própria para o consumo, pois o processamento de grandes volumes de água podem encontrar agentes patogênicos e detritos [14]. A presença de bactérias originadas

naturalmente da atmosfera é em geral pouco danosa para os seres humanos [10], mas as condições locais podem aumentar o grau de contaminação e os riscos potenciais.

Quando o orvalho se forma, é possível existir a presença de bactérias como coliformes fecais e *Escherichia Coli* [10, 15], elementos pesados como alumínio e ferro, além de sais dissolvidos [16]. A presença dessas substâncias e organismos afeta propriedades da água como turbidez, condutividade e índice de saturação, podendo desqualificar o consumo da água de acordo com padrões internacionais [17].

No caso de coletores de orvalho, estes devem ser expostos ao ar livre, ficando, portanto, sujeitos a contaminação por bactérias, íons e sais [16, 15]. O experimento realizado por D. A. Beysens e M. Muselli [16] em Ajaccio na França, com um coletor de orvalho encontrou evidências de elementos como alumínio, ferro, chumbo entre outros, elevando a turbidez e causando 41 não-conformidades de acordo com os critérios estabelecidos por parâmetros europeus. O mesmo estudo explica que a presença desses elementos e das consequentes não-conformidades pode ser explicado pelo transporte de poeira do deserto do Saara ou podem ser de origem orgânica, sendo assim, atribuídos principalmente ao fato da geração de água ser realizada ao ar livre. Nos estudos de D. A. Beysens e M. Muselli [16] e Girja Sharan [15] foram encontradas diversas bactérias e suas origens podem ser tanto humanas quanto de animais que vivem na vizinhança do condensador.

Nos estudos de R. V. Wahlgren [7], não foram encontradas quantidades significativas de bactérias ou detritos de acordo com as normas americanas, mas o autor não descarta a necessidade de desinfecção através de adição de cloro ou luz ultravioleta.

Quando utilizando uma bomba de calor para efetuar a troca térmica com o ar ambiente, não há necessidade de deixar o sistema ao ar livre, diminuindo a exposição à agentes contaminantes. Nos experimentos de E. Henker [14], não foram encontrados vestígios de coliformes totais e *Escherichia Coli*. Os demais parâmetros como pH, condutividade e turbidez também indicavam pureza da água gerada. A água gerada devido à sua baixa mineralização é corrosiva e isso deve ser levado em consideração quando for feita a escolha do material da tubulação por onde a água passará [16]. Uma forma de solucionar esse problema é utilizar uma tubulação de material inerte como PVC ou vidro.

2.4 Sistemas de Processamento de Vapor de Água (AWVP)

Os sistemas de processamento de vapor de água têm sido amplamente discutidos na comunidade científica como sendo uma possível solução para áreas áridas e/ou semiáridas em

termos de abastecimento de água potável, devido às altas temperaturas e umidade relativa, o que aumenta a eficiência de condensação nesses ambientes. [7].

O processamento de vapor d'água envolve duas etapas [7]. Primeiro, o vapor é levado até uma superfície ou volume de condensação, depois é criado um gradiente de pressão de vapor entre o ar e a superfície de condensação, que força as moléculas de vapor a fluírem do ar para a superfície ou volume de condensação [7]. O que diferencia um método de processamento de vapor de outro é a forma como esse gradiente de pressão de vapor é gerado.

R. V. Wahlgren [7] discute diferentes configurações para esses sistemas os dividindo em três modalidades: resfriamento de superfícies através de bombas de calor ou radiação, uso de desidratantes sólidos ou líquidos para concentrar vapor e sistemas de convecção induzida ou controlada em uma estrutura. A Figura 10 mostra um diagrama com todos os tipos de sistemas:

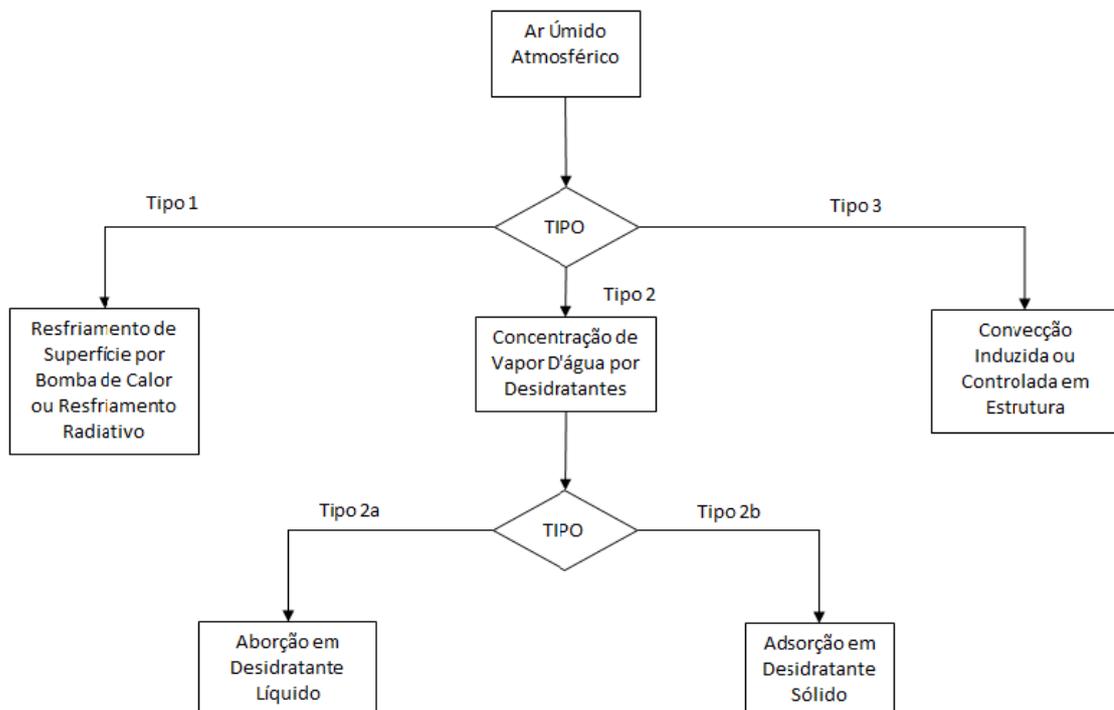


Figura 10: Visão Geral dos Tipos de Processador de Vapor de Água [7] Adaptado

2.4.1 Condensador por Resfriamento de Superfície

O método tipo 1 estabelece o gradiente de pressão de vapor através do resfriamento de uma superfície de condensação abaixo do ponto de orvalho usando um trocador de calor. Esse tipo de sistema pode se dividir entre os que usam bombas de calor ou efeito termoelétrico para realizar a troca térmica ou superfícies que são resfriadas através de radiação. Habeebullah [11] utilizou espiras de um evaporador como bomba de calor e superfície de condensação. Utilizando um ventilador para gerar um fluxo de ar a 2,5 m/s de velocidade de vento ele

obteve uma condensação máxima de 17,6 kg/m² por dia de água. G. da Silva e F. d. A. S. de Sousa [4] utilizaram um congelador para formar gelo em garrafas PET e utilizaram as mesmas como superfície de condensação expostas ao ar livre obtendo uma taxa máxima de condensação de 29,52 kg/m² de água por dia. Elsarrag e Horr [18] coletaram a água gerada por sistemas de condicionamento de ar na região do Golfo e obtiveram resultados de 7,2 kg de água por dia com um consumo de 1kW. Empregando uma célula termoelétrica de refrigeração que utiliza o efeito Peltier para resfriar uma superfície de condensação Eliezer Henker [14] foi capaz de gerar em média 62,4 kg/m² de água potável por dia. Utilizando um composto de sílica e titania (SiO_2/TiO_2) como superfície de condensação a qual se resfriaria através de radiação Niklasson et al [19] foram capazes de gerar 4.7 kg/m² de água por dia. Sharan [15] utilizou uma superfície de dióxido de titânio (TiO_2) com microesferas de sulfato de bário ($BaSO_4$) para condensar água através de resfriamento radiativo e obteve 23 kg/m² de condensado de água por dia. Esses resultados mostram que o método de resfriamento de superfície possui resultados que já permitem sua aplicação e considerando que a tecnologia ainda possui bastante espaço para ser desenvolvida, pode fornecer resultados ainda melhores no futuro.

2.4.1.1 Resfriamento de Superfície Através de Bomba de Calor

As bombas de calor são um tipo de tecnologia já bem desenvolvida e empregada há muito tempo em ares-condicionados e desumidificadores [7]. Nesse tipo de sistema, é empregado trabalho para gerar um fluxo de calor que diminui a temperatura de uma superfície até abaixo da temperatura de orvalho. Isso pode ser feito através de serpentinas de geladeira [11], refrigeradores [4] ou até mesmo pelo efeito termoelétrico usando células de efeito Peltier [14]. O tipo mais comum de sistema de resfriamento por bomba de calor ocorre em ares-condicionados onde ocorre a condensação nas serpentinas do evaporador. Um fluido refrigerante é comprimido, chegando a altas temperaturas e depois passa pelo condensador onde cede calor para o ambiente. Em seguida, passa por uma válvula de expansão onde diminui sua pressão e temperatura para enfim chegar ao evaporador. Nele, passa por serpentinas a uma temperatura baixa e resfria o ar ambiente, que em contato com a serpentina atinge a temperatura de orvalho e gera condensado. Abaixo na Figura 11 pode-se ver um esquema do ciclo de uma bomba de calor:

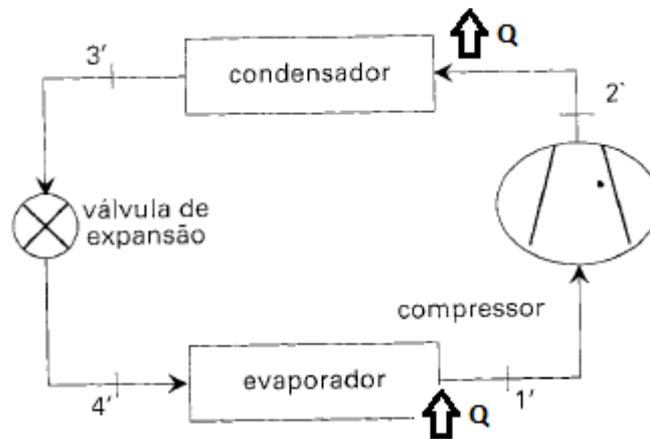


Figura 11: Ciclo de Bomba de Calor [12] Adaptado

A troca de calor também pode ser realizada por meio do chamado efeito termoelétrico que consiste no resfriamento de uma das faces de um semicondutor quando este está submetido a uma corrente elétrica. Esse efeito se chama efeito Peltier. Uma vantagem desse tipo de sistema é que a sua eficiência é relativamente alta quando existe um alto gradiente de temperatura entre o ar condensado e a superfície de condensação [7]. Porém, se o resfriamento for muito intenso, pode ocorrer congelamento do vapor condensado, o que geraria também uma superfície congelada que inibe trocas térmicas, como notam B. Habeebullah [11] e R. V. Wahlgren [7].

2.4.1.2 Resfriamento de Superfície Através de Radiação

Esse tipo de sistema utiliza uma superfície ampla de condensação que tem como princípio emitir mais calor através de radiação do que absorve do ambiente [19, 15], dessa forma no balanço de energia, a superfície será gradualmente resfriada até se encontrar abaixo do ponto de orvalho. Na Figura 12 pode-se ver um esquema que ilustra o método:

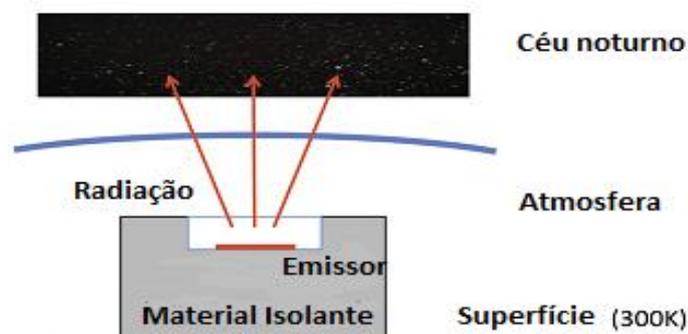


Figura 12: Esquema de Resfriamento Radiativo [20] Adaptado

As superfícies são poliméricas e pintadas com titânia (TiO_2) por esse composto possuir uma alta emissividade no espectro do infravermelho, o que permite uma perda de calor considerável e também uma alta refletividade da luz solar. Essa refletividade é importante para diminuir o calor absorvido devido à luz solar permitindo a coleta de orvalho durante o dia além de evitar a evaporação do condensado formado [19]. O condensador também deve ser fino para diminuir a inércia térmica e deve possuir pouco contato térmico com o solo, pois apresenta uma temperatura mais baixa que o solo durante a maior parte do dia, sendo assim aquecido pelo mesmo [6]. À noite o condensador possui a maior eficiência, pois não existe a presença da luz solar para esquentar o sistema e o vento noturno é frio, refrigerando ainda mais o sistema. Esse método, ao contrário dos sistemas com bomba de calor, não necessita de uma fonte de energia externa [7], o que reduz o custo de utilização à compra das peças e a manutenção das mesmas. Na Figura 13 é mostrada a foto de um condensador que utiliza resfriamento radiativo:



Figura 13: Condensador por Resfriamento Radiativo [15]

2.4.2 Condensador por Absorção e Regeneração de Vapor

No método tipo 2, desidratantes agem como concentradores de condensado, estabelecendo um gradiente de pressão de vapor, o que por sua vez causa um fluxo de moléculas de água para a superfície do condensador extraindo o vapor do ar [7]. Quando os desidratantes não sofrem reação química ou alteração física nesse processo, eles são chamados de adsorventes, caso contrário, são chamados de absorventes [7]. Adsorventes geralmente são sólidos e atraem as moléculas de vapor com os seus campos elétricos para

capilares, onde ocorre condensação. Após a desidratação do ar, a superfície é aquecida pela luz e calor do sol, o que faz a água coletada evaporar. A água evaporada passa por superfícies frias, sendo novamente revertida para o estado líquido e finalmente coletada [7]. Os absorventes por sua vez, são em geral líquidos e atraem o vapor gerando um gradiente de pressão de vapor. Dentro do líquido, o vapor sofre mudança de fase e condensa. Posteriormente, técnicas de dessalinização como destilação e eletrodialise são utilizadas para separar os dois líquidos e obter água [7]. O método pode ainda ser potencializado com o uso de um portador como a areia. O desidratante é disposto de forma homogênea dentro do portador e o mesmo age como um adsorvente secundário [21]. Na Figura 14 podemos ver um esquema representativo de um condensador que utiliza adsorventes. Esse sistema coleta água que está contida no solo e essa água é aquecida pela luz solar incidente até evaporar. O vapor gerado é condensado na superfície de vidro do sistema e escorre para o coletor na lateral.

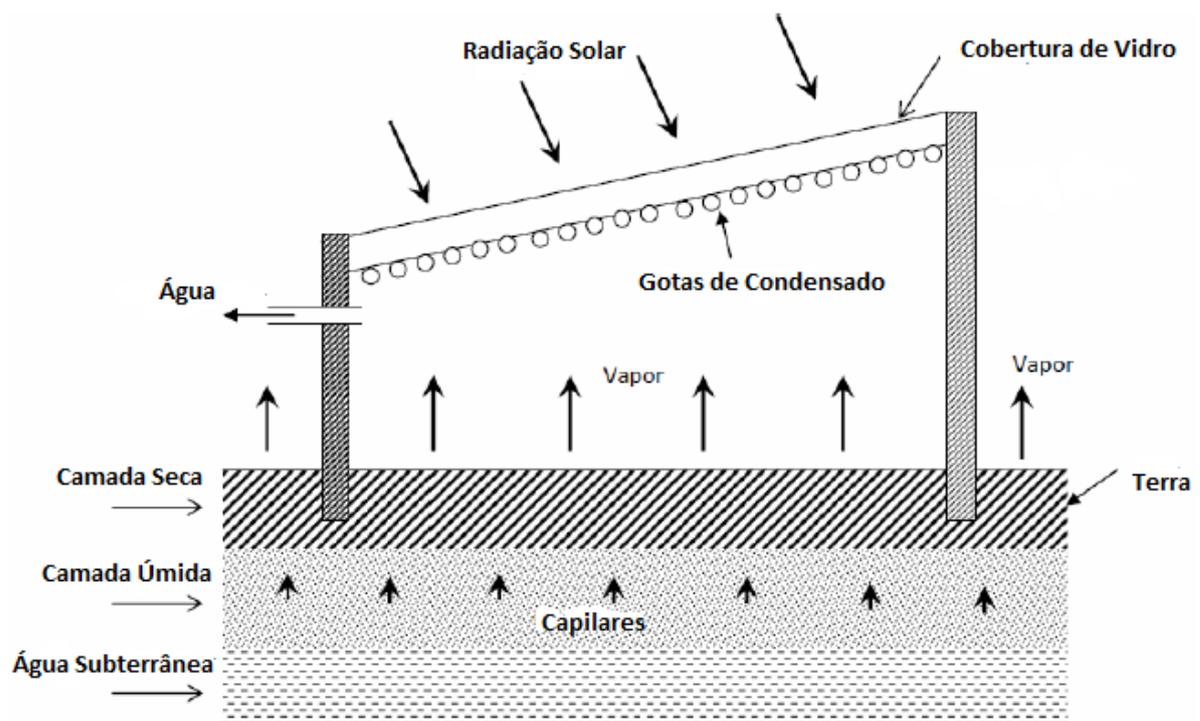


Figura 14: Esquema de Coletor de Água por Absorção e Regeneração [22] Adaptado

2.4.3 Condensador por Convecção Controlada ou Induzida

O método tipo 3 de condensação consiste em expandir o ar atmosférico. Assim, graças a variação de volume, parte da energia interna do ar se converte em trabalho, o que o resfria e gera condensação do vapor presente. Em 1971, Victor P. Starr e David A. Anati [23] propuseram um condensador vertical com aproximadamente 100 metros de diâmetro e quilômetros de extensão para coleta de água através do vapor presente no ar. O fluxo de ar

dentro do sistema é gerado pela diferença de pressão entre o interior e o exterior, assim, o ar tenderá a se mover de baixo para cima. Ao subir, o ar se resfria até chegar no ponto de condensação. Conforme o ar continua a subir, ele se resfria ainda mais, removendo calor latente e conseqüentemente formando água [23]. Nessa proposta os autores afirmam que é possível produzir uma grande quantidade de água de uma maneira mais fácil do que quando comparado com coleta de água da chuva. Porém, eles também afirmam que as dimensões do coletor são um impedimento econômico para a viabilidade do sistema. O sistema pode ser intensificado com a adição de núcleos de condensação ao longo do condensador, o que ajudaria a diminuir o tamanho do mesmo [23]. Em outro estudo, V. P. Starr, D. A. Anati et al [24] citam o uso desse sistema com a adição de ventiladores ao longo do caminho para remover ar quente de uma mina, produzindo água. Esse sistema possui um diâmetro de 3,5 metros, sendo muito menor do que o proposto pelos autores, mas produzindo quantidades consideráveis de água [24].

2.5 Células de Refrigeração Através do Efeito Peltier

Nesse trabalho será utilizado o método de geração de água a partir do resfriamento de superfície, ou tipo 1 conforme proposto por R. V. Wahlgren [7]. Para tal, será usado uma célula termoelétrica que utiliza o efeito Peltier acoplada a uma superfície aonde ocorrerá a condensação do vapor. As células de efeito Peltier são utilizadas em diversas aplicações de refrigeração compactas como bebedouros, filtros e mini geladeiras [14, 25] devido à sua fácil aplicação. Apesar do tamanho reduzido, elas conseguem gerar grandes gradientes térmicos entre suas duas faces, o que as torna opções válidas para resfriamento.

2.5.1 Efeito Peltier

Um módulo termoelétrico consiste na união de vários pares de semicondutores tipo P e tipo N [26]. O efeito termoelétrico consiste em se aplicar calor em uma face do elemento e resfriar a outra. Esse diferencial de temperatura acarreta o surgimento de uma força eletromotriz que gera uma corrente elétrica no circuito [26]. A esse fenômeno é dado o nome de efeito Seebeck. O processo inverso, aonde se obtém um gradiente de temperatura através da utilização de corrente elétrica se chama efeito Peltier. O efeito Peltier foi descoberto em 1834 por Jean Charles Peltier e consiste no aquecimento de uma das faces de um semicondutor e no resfriamento da face oposta quando este é atravessado por uma corrente elétrica [14, 25, 26]. Dessa forma, é possível gerar um gradiente de temperatura entre as duas faces, chegando a face fria, em alguns casos, a atingir -12°C e a quente 51°C [14]. As células podem ser empregadas em diversas configurações, como por exemplo, duas ou mais pastilhas

em série para aumentar o gradiente de temperatura obtido [14, 26]. Na Figura 15, pode-se ver um esquema de célula termoelétrica que utiliza o efeito Peltier para refrigeração:

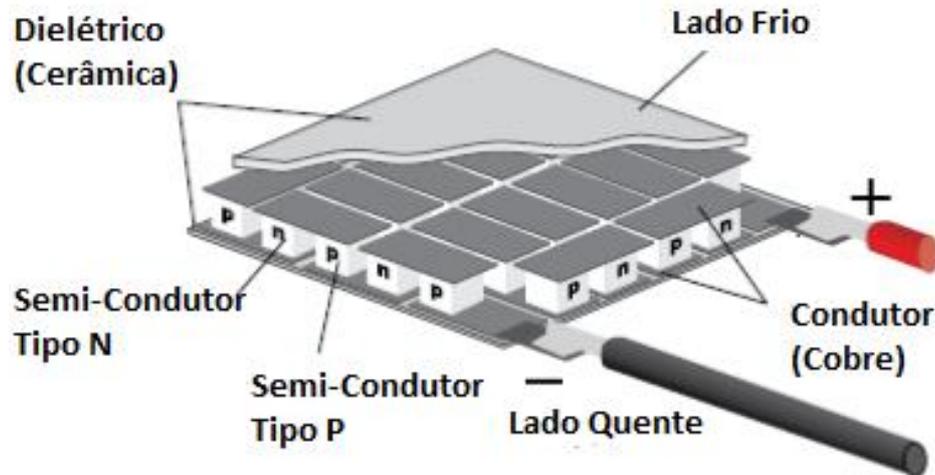


Figura 15: Esquema de Célula Peltier [25] Adaptado

Em um módulo Peltier, existem quatro variáveis que caracterizam o sistema, segundo Pindado [26]:

1. A diferença de temperatura entre a face quente e a face fria
2. O calor absorvido pela face fria
3. A corrente que alimenta a célula Peltier
4. A tensão aplicada

O coeficiente de performance de uma célula Peltier é inversamente proporcional a diferença de temperatura entre as suas faces [27]. Pode-se observar isso no gráfico da Figura 16:

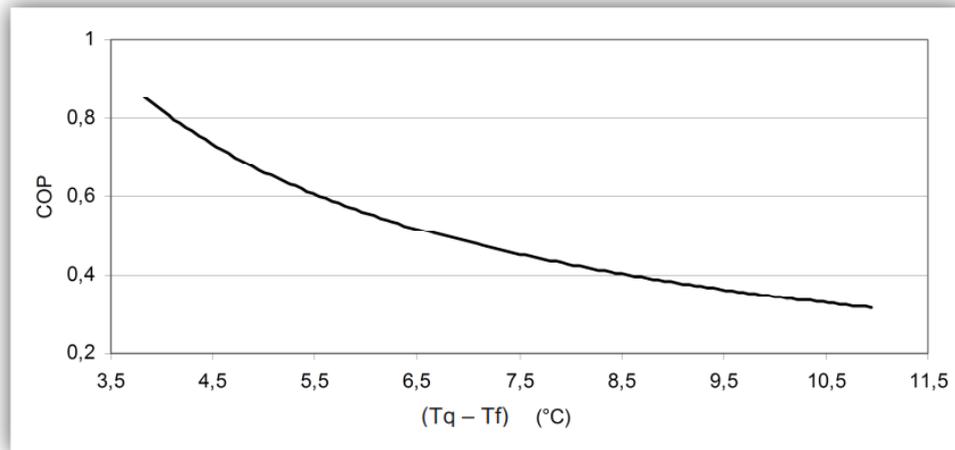


Figura 16: COP em Função do Gradiente de Temperatura entre as Faces de Célula Peltier [27]

Devido a essa tendência, quando o objetivo do módulo termoeétrico for a refrigeração, deve-se elevar ao máximo a capacidade de refrigeração da face quente da célula Peltier, utilizando dissipadores de calor e altas velocidades de corrente, de modo a diminuir ao máximo a diferença de temperatura entre as faces [28]. O calor absorvido pela face fria é inversamente proporcional à diferença de temperatura entre as faces quente e fria da célula Peltier. Conforme se diminui o gradiente de temperatura, maior é a quantidade de calor absorvido pela face fria, aumentando assim a capacidade de refrigeração do módulo, sendo a mesma máxima quando a diferença for nula [26]. O coeficiente de performance da placa Peltier diminui conforme se aumenta a corrente elétrica que passa pelo módulo. Isso pode ser observado no gráfico da Figura 17:

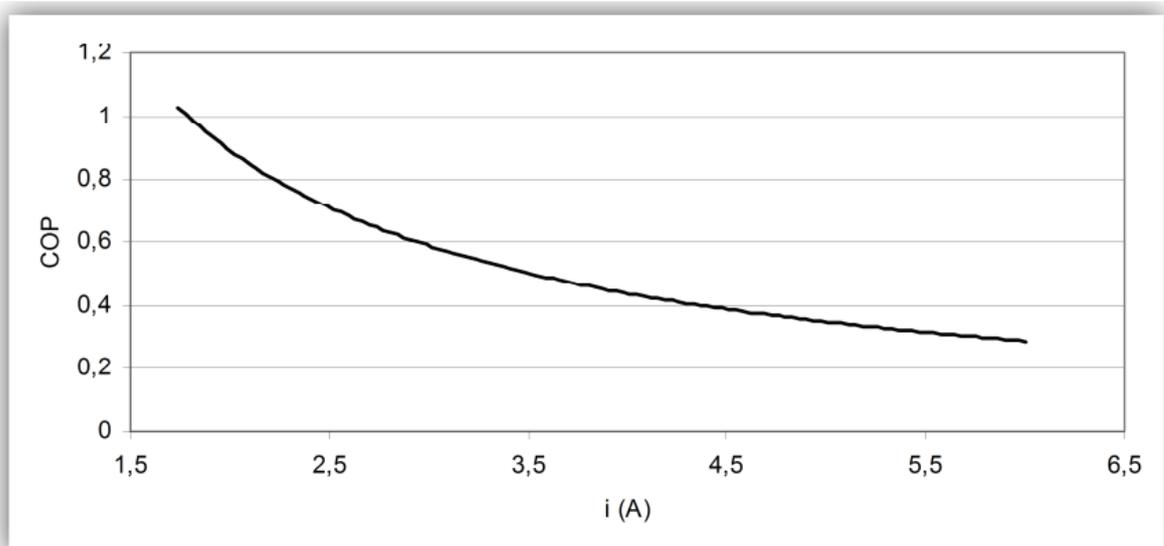


Figura 17: COP em Função da Corrente Elétrica [27]

O coeficiente de performance é dado pela razão entre o trabalho requerido pelo sistema e a sua capacidade de absorver calor. Quanto maior for a corrente utilizada, maior a potência consumida pelo sistema, e portanto, menor o seu coeficiente de performance [27]. O módulo também está sob a ação do efeito Joule que gera calor e contribui para diminuir a capacidade de refrigeração da placa. Dessa forma, existe um valor de corrente máxima a partir da qual o efeito Joule sobrepõe o efeito Peltier e a capacidade de refrigeração passa a diminuir conforme se aumenta a corrente fornecida [26, 28]. Na Figura 18 são mostradas curvas do módulo Peltier TEC 12706 que relacionam a diferença de temperatura entre as faces, a corrente que atravessa o sistema e a capacidade de refrigeração:

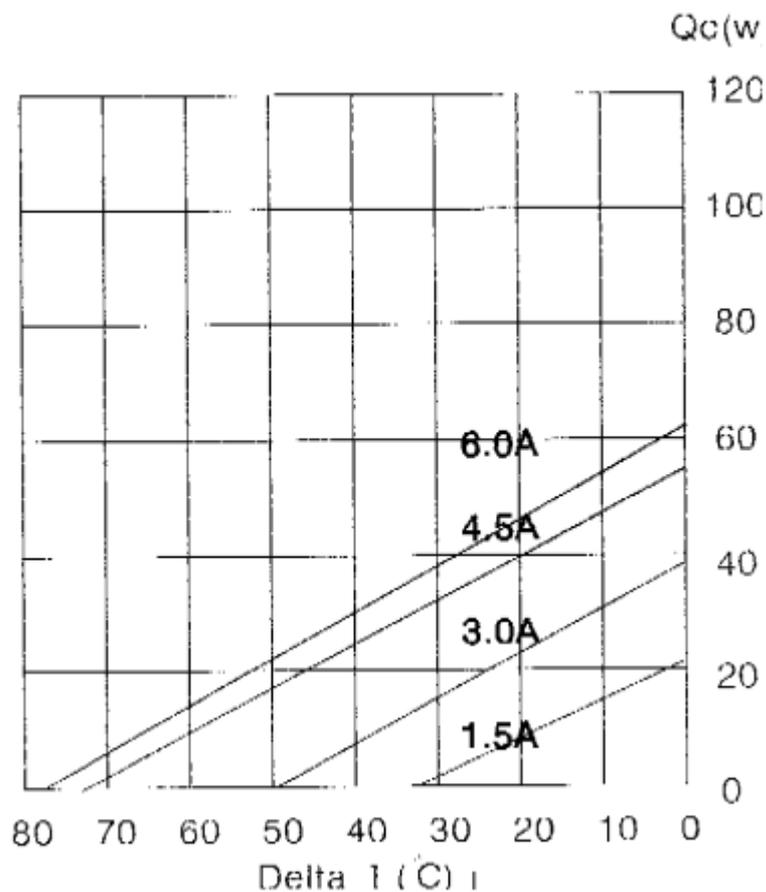


Figura 18: Relação entre Gradiente de Temperatura e Capacidade de Refrigeração de Célula Peltier Modelo TEC 12706 [29]

Pode-se verificar que para uma mesma corrente, quanto menor a diferença de temperatura entre as faces, maior a capacidade de refrigeração. Pode-se verificar também como a capacidade de refrigeração inicialmente aumenta conforme se eleva a corrente fornecida para o sistema. Porém, acima do valor de corrente máxima, que para esse módulo é 6,4 A, a corrente não mais aumenta a capacidade de refrigeração. A tensão aplicada assim como a corrente é

diretamente proporcional à potência consumida. Dessa forma, quanto mais se aumenta a tensão, menor é o coeficiente de performance da célula. Contudo, para uma mesma corrente, quanto maior for a tensão aplicada ao módulo, maior é a diferença de temperatura entre as faces e, portanto, menor será a sua capacidade de refrigeração como pode ser visto na Figura 19:

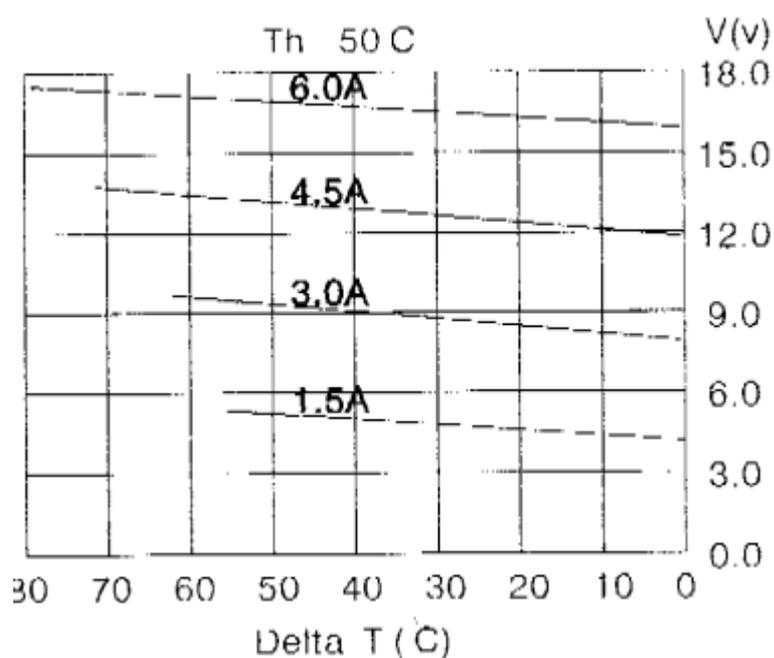


Figura 19: Relação entre Tensão Aplicada e Gradiente de Temperatura de Célula Peltier Modelo TEC 12706 [29]

As células termoelétricas possuem diversas vantagens com relação a outros métodos mais convencionais de refrigeração devido à uma série de fatores [27, 30, 25]:

- O controle das temperaturas de operação é feito facilmente através da corrente elétrica aplicada.
- Não possuem elementos móveis nem utilizam fluidos refrigerantes, o que diminui o custo de manutenção, além de possuir alta durabilidade.
- A refrigeração independe do posicionamento das placas, o que confere flexibilidade ao desenho dos sistemas.
- Possuem tamanho e peso reduzidos, o que confere vantagens aonde esses fatores são essenciais como por exemplo, dispositivos móveis.

No seu trabalho, Pindado [26] fez uma tabela onde compara as diferentes tecnologias de condensação de vapor e apresenta as vantagens das células termoelétricas. A tabela pode ser vista na Tabela 1:

Tabela 1: Comparação de Tecnologias de Condensação de Vapor [26] Adaptado

Critério	Bomba de Calor	Equipamento de Absorção	Termoeletricidade
COP	Alto	Médio	Baixo
Custo	Alto	Alto	Baixo
Requerimentos	Nenhum	Fonte de Calor	Nenhum
Ruído	Muito	Baixo	Pouco (Ventilador)
Portátil	Não	Não	Sim
Dimensões	Médio	Grande	Pequeno
Instalação	Médio	Complexa	Simple
Impacto Ambiental	Médio	Baixo	Nenhum

2.6 Camada Limite Térmica

Quando um fluido escoar sobre uma superfície que se encontra em uma temperatura diferente, forma-se a camada-limite térmica. A camada de fluido diretamente em contato com a superfície e as partículas que compõem esta atingem equilíbrio térmico e se encontram na temperatura da superfície. Contudo, a camada de fluido imediatamente acima troca calor com a que está em contato com a superfície, e assim sucessivamente, gerando um gradiente de temperatura na direção normal à superfície por onde o fluido escoar. A camada-limite térmica é a distância na direção normal ao escoamento do fluido a partir da qual a troca térmica entre o fluido e a superfície é desprezível. Pode-se ver uma ilustração do conceito na Figura 20:

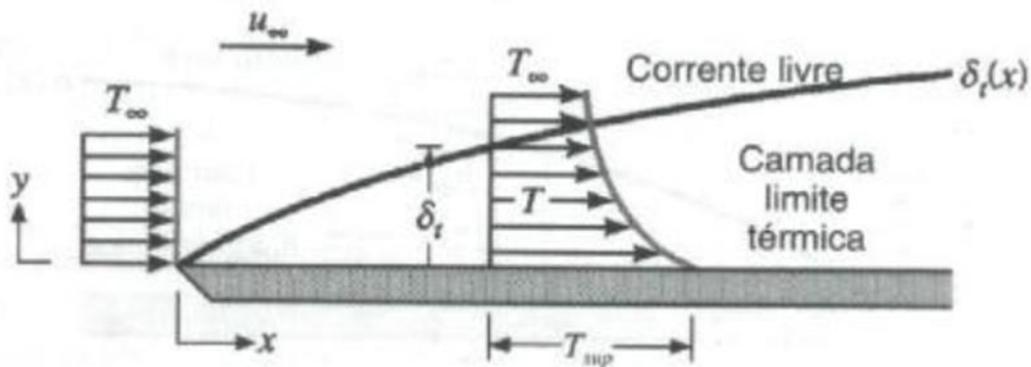


Figura 20: Ilustração Camada Limite Térmica

2.7 Modelos Matemáticos

Para prever o comportamento tanto da mistura ar-vapor quanto das células Peltier foram utilizados modelos matemáticos que descrevem ambos os sistemas. Com a ajuda desses modelos é possível com a utilização de alguns dados de entrada tentar estimar a resposta do sistema para posteriormente, através do protótipo, tentar confirmar a validade das previsões.

2.7.1 Modelo Psicrométrico

O modelo psicrométrico aplica os conceitos da termodinâmica para avaliar o comportamento das misturas ar-vapor. As equações utilizadas foram obtidas no manual ASHRAE Fundamentals Handbook [31].

2.7.1.1 Pressão de Saturação

A pressão exercida pela fração de vapor na mistura ar-vapor é denominada pressão de vapor. A pressão de vapor de uma mistura é diretamente proporcional à quantidade de água que o ar contém. A máxima pressão de vapor que o ar pode conter é proporcional à sua temperatura, o que significa que quanto maior a temperatura do ar, mais água ele consegue suportar. Podemos calcular a pressão de saturação de uma mistura para o intervalo de temperaturas entre -100 e 0°C da seguinte forma:

$$\ln P_{ws} = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 T^4 + C_7 \ln T \quad (2.1)$$

Onde,

P_{ws} - Pressão de saturação (kPa)

T – Temperatura (K)

$C_1 = -5.674\ 535\ 9\ E+03\ \text{kPa.K}$

$C_2 = 6.392\ 524\ 7\ E+00\ \text{kPa}$

$C_3 = -9.677\ 843\ 0\ E-03\ \text{kPa/K}$

$C_4 = 6.221\ 570\ 1\ E-07\ \text{kPa/K}^2$

$C_5 = 2.074\ 782\ 5\ E-09\ \text{kPa/K}^3$

$C_6 = -9.484\ 024\ 0\ E-13\ \text{kPa/K}^4$

$C_7 = 4.163\ 501\ 9\ E+00\ \text{kPa/K}$

A pressão de saturação também pode ser calculada para a faixa entre 0 e 200°C, e seu valor é dado por:

$$\ln P_{ws} = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln T \quad (2.2)$$

Onde,

$$C_8 = -5.800\ 220\ 6\ \text{E}+03\ \text{kPa.K}$$

$$C_9 = 1.391\ 499\ 3\ \text{E}+00\ \text{kPa}$$

$$C_{10} = -4.864\ 023\ 9\ \text{E}-02\ \text{kPa/K}$$

$$C_{11} = 4.176\ 476\ 8\ \text{E}-05\ \text{kPa/K}^2$$

$$C_{12} = -1.445\ 209\ 3\ \text{E}-08\ \text{kPa/K}^3$$

$$C_{13} = 6.545\ 967\ 3\ \text{E}+00\ \text{kPa/K}$$

2.7.1.2 Umidade Absoluta

A umidade absoluta de um sistema é a razão entre a massa de água e a quantidade de ar seco que se encontra na mistura ar-vapor. Seu valor é representado por:

$$w = \frac{M_{\text{água}}}{M_{\text{ar seco}}} \quad (2.3)$$

Onde,

w – Umidade absoluta

$M_{\text{água}}$ - Massa de vapor (kg)

$M_{\text{ar seco}}$ - Massa de ar seco (kg)

Como a pressão de vapor também representa a quantidade de água presente em uma mistura, pode-se representar a umidade absoluta em termos da mesma:

$$w = 0,62198 \cdot \frac{P}{P - P_v} \quad (2.4)$$

Onde,

P – Pressão ambiente (kPa)

P_v - Pressão de vapor (kPa)

2.7.1.3 Umidade Relativa

O grau de saturação de uma mistura também pode ser chamado de umidade relativa. Ela pode ser encontrada relacionando à pressão atual de vapor da mistura com sua pressão de saturação da seguinte forma:

$$\phi = \frac{P_v}{P_{ws}} \quad (2.5)$$

Onde,

ϕ - Umidade relativa

2.7.1.4 Entalpia

A entalpia de uma mistura é dada pela soma das entalpias dos seus componentes [31]. Dessa forma a entalpia da mistura ar-vapor é dada por:

$$h = h_{ar\,seco} + wh_v \quad (2.6)$$

Onde,

h – Entalpia da mistura (kJ/kg)

$h_{ar\,seco}$ - Entalpia da porção de ar seco (kJ/kg)

h_v - Entalpia de vapor (kJ/kg)

A entalpia de ar seco pode ser calculada da seguinte forma:

$$h_{ar\,seco} = 1,006 \cdot t \quad (2.7)$$

Onde,

t – Temperatura (°C)

A entalpia de vapor é dada pela seguinte fórmula:

$$h_v = 2501 + 1,805 \cdot t \quad (2.8)$$

A entalpia da água líquida é dada por:

$$h_{\acute{a}gua} = 4,186 \cdot t \quad (2.9)$$

Onde,

$h_{\acute{a}gua}$ - Entalpia da água líquida (kJ/kg)

2.7.1.5 Balanço de Energia e Massa

Para determinar as demais propriedades do sistema, é necessário realizar um balanço de energia e massa, avaliando dois momentos distintos do mesmo. O sistema avaliado nesse estudo passa por um resfriamento até atingir seu ponto de orvalho, ocorrendo condensação, e conseqüentemente, uma precipitação de parte da massa de água presente no ar. Dessa forma, no balanço de massa deve constar essa parcela de água:

$$\dot{m}_{ar} \cdot w_1 = \dot{m}_{ar} \cdot w_2 + \dot{m}_{\acute{a}gua} \quad (2.10)$$

Onde,

\dot{m}_{ar} - Vazão de ar (kg/s)

$\dot{m}_{\acute{a}gua}$ - Taxa de condensação de água (kg/s)

A taxa de condensação de água, ou massa de condensado gerada, pode ser obtida diretamente da Eq. (2.9) e é dada por:

$$\dot{m}_{\acute{a}gua} = \dot{m}_{ar} \cdot (w_1 - w_2) \quad (2.11)$$

Aplicando a primeira lei da Termodinâmica ao sistema, deve constar no segundo momento, a quantidade de calor que foi removida do sistema, além da parcela de energia que corresponde à água condensada:

$$\dot{m}_{ar} \cdot h_1 = \dot{m}_{ar} \cdot h_2 + Q + \dot{m}_{\acute{a}gua} h_{\acute{a}gua} \quad (2.12)$$

Onde,

Q – Calor retirado do sistema (kW)

2.7.2 Modelo Termoelétrico

O modelo termoelétrico descreve a troca de calor resultante do fluxo de corrente elétrica pela placa Peltier ou Efeito Peltier. O fluxo de calor gerado é influenciado por outras fontes de calor, como o efeito Joule e a transferência de calor entre as próprias faces da célula Peltier. Sendo assim, para se chegar à melhor performance da placa, é necessário levar em conta todos esses fatores. As equações foram retiradas do manual Thermoelectric Handbook da Laird Technologies [32].

2.7.2.1 Efeito Seebeck

Quando um fio está submetido a um gradiente de temperatura, ocorre o efeito Seebeck, que corresponde à conversão desse gradiente em uma força eletromotriz. Essa relação é dada por:

$$E_{mf} = -S \cdot \Delta T \quad (2.13)$$

Onde,

E_{mf} - Força Eletromotriz (V)

s - Coeficiente de Seebeck (V/K)

T - Temperatura (K)

Um dos parâmetros da placa Peltier é sua voltagem Seebeck. Ela depende da quantidade de elementos termoelétricos que constituem a placa:

$$S = 2sN \quad (2.14)$$

Onde,

S – Voltagem Seebeck (V/K)

N – Número de elementos termoelétricos

2.7.2.2 Efeito Peltier

O efeito Peltier é o efeito inverso ao Seebeck. Ele corresponde à um gradiente de temperatura gerado por uma corrente elétrica. Em uma placa Peltier, o gradiente de temperatura ocorre entre as duas faces da placa. Isso significa que uma face será resfriada e a outra receberá calor. O calor absorvido devido ao efeito Peltier na face fria é dado por:

$$Q_p = S \cdot I \cdot T_f \quad (2.15)$$

Onde,

Q_p - Calor absorvido devido ao efeito Peltier (W)

I – Corrente Elétrica (A)

T_f - Temperatura da face fria (K)

Ocorre geração de calor na face quente da placa, e a mesma pode ser encontrada de forma similar:

$$Q_p = S \cdot I \cdot T_q \quad (2.16)$$

Onde,

T_q - Temperatura da face quente (K)

2.7.2.3 Efeito Joule

Devido à passagem de corrente elétrica no semicondutor, também ocorre geração de calor devido ao efeito Joule:

$$Q_j = \frac{I^2 \cdot R}{2} \quad (2.17)$$

Onde,

Q_j - Calor gerado devido ao efeito Joule (W)

R - Resistência elétrica do Semicondutor (Ohm)

A resistência elétrica do semicondutor depende da sua forma e pode ser encontrada com a seguinte equação:

$$R = \frac{2\rho N}{G} \quad (2.18)$$

Onde,

ρ - Resistividade do semicondutor (Ohm.m)

G – Fator de forma da placa Peltier

2.7.2.4 Condução de Calor entre as Faces da Placa

Devido ao gradiente de temperatura gerado entre as faces da placa Peltier, ocorre transferência de calor no sentido da face quente para a face fria. Esse calor pode ser calculado pela equação de Fourier:

$$Q_c = K \cdot \Delta T \quad (2.19)$$

Onde,

Q_c - Calor transferido devido à condução entre as faces (W)

K - Condutância Térmica da Placa (W/K)

A condutância térmica da placa também é um fator da sua geometria e é dada pela seguinte relação:

$$K = 2N \cdot k \cdot \Delta T \cdot G \quad (2.20)$$

Onde,

k – Condutividade Térmica do semiconductor (W/m.K)

2.7.2.5 Calor Total trocado pelas Faces

Unindo todos os termos encontrados, pode-se determinar o fluxo de calor líquido tanto na face fria quanto na face quente. Considerando que para a face fria, o efeito Peltier absorve calor, enquanto a condução e o efeito Joule esquentam a face:

$$Q_f = Q_p - Q_j - Q_c \quad (2.21)$$

Onde,

Q_f - Calor Absorvido pela face fria da placa (W)

Para a face quente, o efeito Peltier e o efeito Joule geram calor, enquanto a condução remove calor da placa:

$$Q_q = Q_p + Q_j - Q_c \quad (2.22)$$

Abaixo, na Figura 21, pode-se ver uma representação de todas as formas de troca de calor na placa:

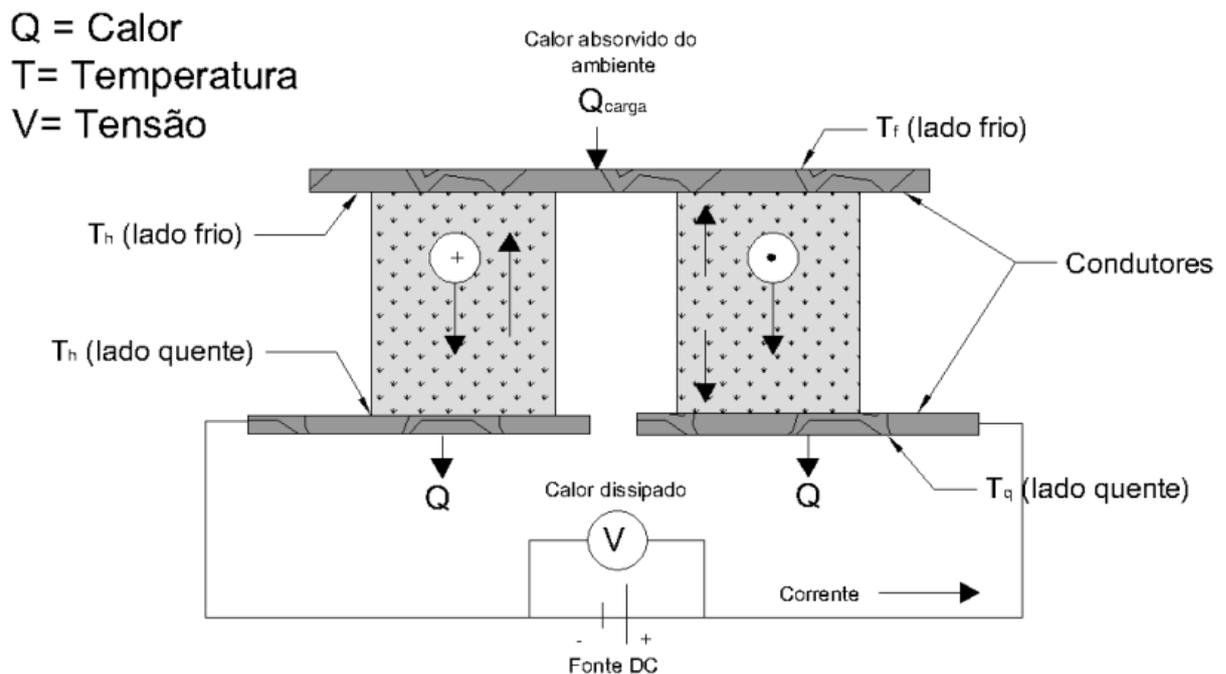


Figura 21: Representação das Formas de Troca Térmica na Placa Peltier [30] Adaptado

2.7.3 Modelo de Camada Limite Térmica

O cálculo da camada-limite térmica depende das condições do escoamento, que são definidas pelo número de Reynolds e pelas propriedades do fluido, mais precisamente seu número de Prandtl:

$$\delta_t = 4,91xL(Pr^{\frac{-1}{3}})(Re^{\frac{-1}{2}}) \quad (2.23)$$

Onde,

δ_t – Camada-limite Térmica

L – Comprimento da Superfície

Pr – Número de Prandtl

Re – Número de Reynolds

3. METODOLOGIA

A metodologia para esse estudo foi dividida nas seguintes etapas:

1. Desenvolvimento de uma calculadora psicrométrica capaz de realizar as previsões de condensado obtido.
2. Construção de um protótipo do sistema de obtenção de água para realizar testes de bancada.
3. Medição dos dados obtidos através dos experimentos e aquisição dos dados meteorológicos relevantes para o experimento.

3.1 Calculadora Psicrométrica

Foi desenvolvida uma calculadora psicrométrica utilizando a linguagem de programação Visual Basic para efetuar os cálculos apresentados na seção 2.6. No programa são inseridos os dados meteorológicos e medidos durante o experimento, os quais são necessários para os cálculos que fornecem a massa total de condensado esperada e a taxa de condensação. Os dados de entrada que devem ser inseridos são:

- Pressão Atmosférica

- Temperatura de Bulbo Seco
- Umidade Relativa
- Temperatura da Face Fria da Placa Peltier
- Velocidade do Fluxo de Ar na Secção Fria da Placa Peltier
- Área da Superfície de Condensação
- Duração do Experimento
- Diâmetro do Ventilador

Para efetuar esse cálculo as seguintes premissas do modelo matemático foram adotadas devido a incapacidade de medição do estado de saída:

- Temperatura de saída do fluxo de ar possui a mesma temperatura da placa de condensação.
- Todo o fluxo mássico troca calor com a placa.
- Velocidade do fluxo de ar na entrada permanece constante durante todo processo.

Com isso, a massa de condensado pode ser estimada para uma situação ideal. Porém sabemos que essas premissas não refletem a realidade observada. Como dito anteriormente sem a medição direta dos parâmetros de saída, não podemos descartar as condições de escoamento durante o processo. Inclui-se então a análise de camada limite térmica de forma a corrigir a área útil do escoamento em relação a transferência de calor. Feito isso o cálculo do condensado pode ser corrigido de forma a mensurar de maneira mais real o condensado esperado no experimento e posteriormente a capacidade de extração de água. A Figura 22 mostra como foi realizada essa correção:

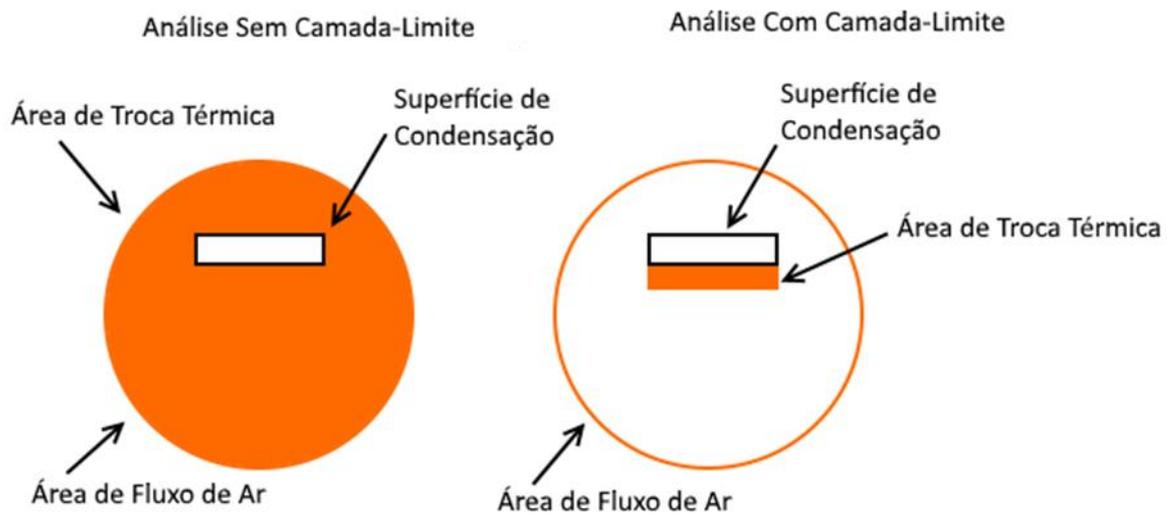


Figura 22: Correção da Área de Troca Térmica via Camada Limite

A seguir na Figura 23, temos um fluxograma da metodologia de cálculo e na Figura 24 uma foto do programa desenvolvido com um exemplo de cálculo:

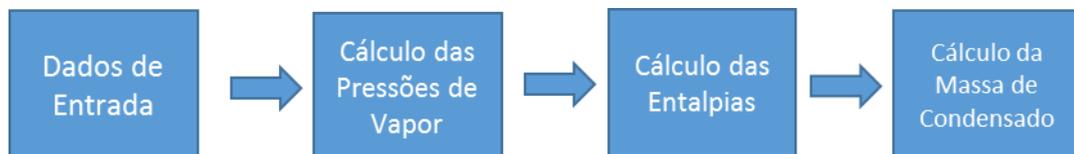


Figura 23: Fluxograma da Metodologia de Cálculo

Rain Maker

Escala de Temperatura
 Kelvin Celsius

Dados do Ambiente
 Pressão Atmosférica (KPa)
 Umidade Relativa
 Temperatura de Bulbo Seco (K)
 Velocidade do Vento (m/s)

Dados da Placa Peltier
 Temperatura Face Fria (K)
 Tempo do experimento (h)

Dimensões
 Área da superfície de condensação (m²)
 Diâmetro do tubo (m)

OK
 Limpar
 Cancelar

Resultados
Massa de Água Resultante (kg/s):
1,86412773877823E-05
Água produzida (ml):
268,434394384065
Condensado por hora por área (L/h/m²):
15,4272640450612

Figura 24: Exemplo de Cálculo Utilizando a Calculadora Psicrométrica

3.2 Ensaios em Escala de Bancada

Procurou-se desenvolver o protótipo com materiais de baixo custo ou reaproveitados visando maior relação custo benefício. A seguir tem-se a lista e materiais empregados no desenvolvimento do experimento:

- 01 Base de Isopor
- 01 Célula Peltier Modelo TEC 12706
- 01 Cooler de Processador 12 V
- 01 Cooler de Gabinete 12 V com 80 mm de diâmetro
- 01 Placa de Alumínio
- 02 Fontes de alimentação
- 01 Copo para coleta do condensado
- 01 Dissipador de calor de alumínio

A célula Peltier e os coolers foram ligados nas fontes de alimentação que permitem regular a tensão e a corrente fornecidas. A célula Peltier utilizada é o modelo TEC1 12706 e possui as seguintes especificações de acordo com o fabricante [29]:

Tabela 2: Especificações da Célula Peltier Modelo TEC1 12706 [29] Adaptado

Temperatura da Face Quente (°C)	25 °C	50 °C
Q _{máx} (W)	50	57
Gradiente Máximo de Temperatura (°C)	66	75
Corrente Máxima (A)	6.4	6.4
Tensão Máxima (V)	14.4	16.4
Resistência do Módulo (Ohms)	1.98	2.3

O módulo termoelétrico foi posicionado com a face fria voltada para baixo em contato com a placa de alumínio de 0,00435 m² de área, a qual por sua vez, serve de superfície de condensação devido à alta condutividade térmica do alumínio. A face quente do módulo termoelétrico foi posta em contato do dissipador que por sua vez é arrefecido pelo cooler de CPU. Todo o conjunto foi apoiado com a placa de alumínio sobre a base de isopor, a qual foi escolhida por possuir uma baixa condutividade térmica, permitindo desprezar a troca térmica entre a base de apoio e a superfície de condensação. O cooler de gabinete possui 80 mm de diâmetro nas suas pás e foi utilizado para gerar um fluxo de ar constante na superfície de condensação. O copo foi posicionado abaixo da placa de alumínio na abertura da base de isopor. Dessa forma, quando o fluxo de ar é resfriado e ocorre condensação na chapa de alumínio, a gravidade faz as gotas de condensado caírem no copo coletor. Abaixo, na Figura 25 pode-se visualizar uma foto do protótipo montado e em funcionamento e na Figura 26 mostra-se um diagrama do funcionamento do protótipo:

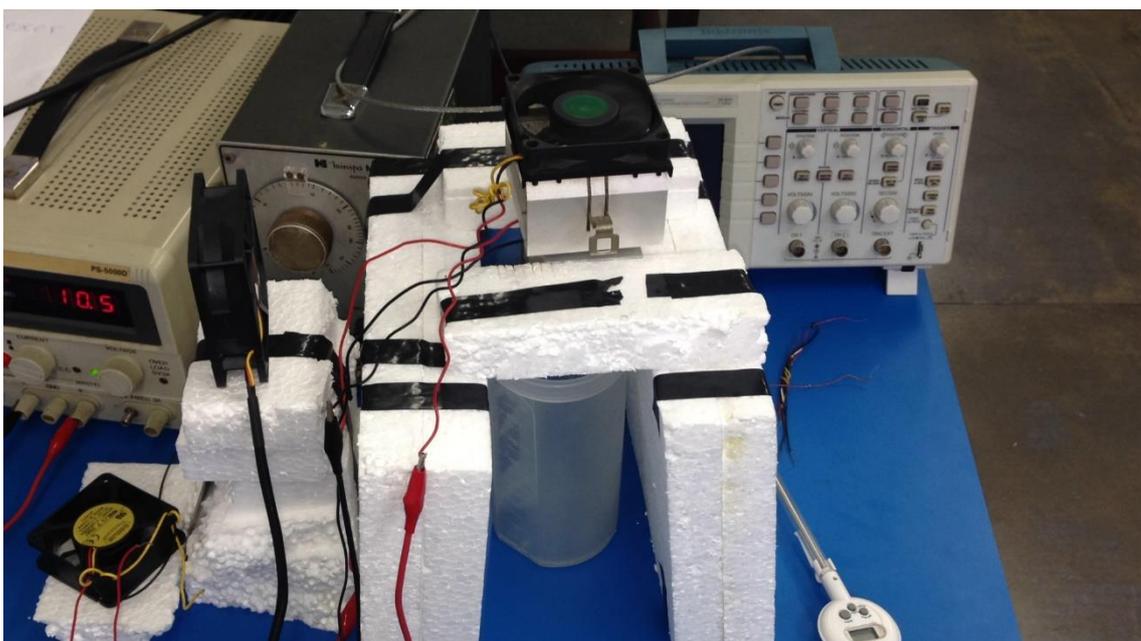


Figura 25: Protótipo de Sistema de Obtenção de Água para Testes de Bancada

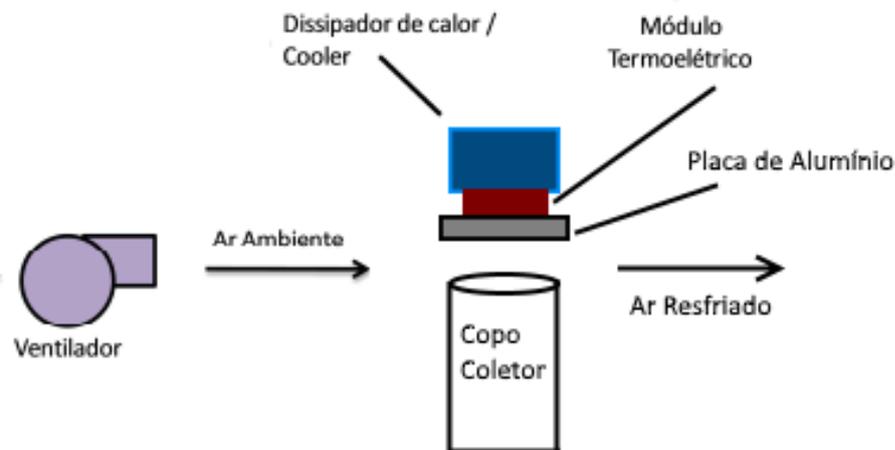


Figura 26: Diagrama de Funcionamento do Protótipo Simplificado

3.3 Aquisição e Medição dos Dados

Os parâmetros meteorológicos necessários para efetuar os cálculos psicrométricos foram obtidos no site Alerta RJ [33] mantido pela Prefeitura do Rio de Janeiro. Os dados de temperatura, umidade relativa e pressão são fornecidos de 15 em 15 minutos com atualizações diárias. Os dados extraídos são referentes aos dias de experimento para a região de São Cristóvão que dentre as disponíveis era a mais próxima de onde se encontra o Cefet/RJ, local onde foram realizados os experimentos. Ao realizar os cálculos foram utilizadas as médias aritméticas dos parâmetros durante o intervalo de tempo em que os experimentos foram realizados.

Durante os experimentos foram medidos os resultados obtidos utilizando os seguintes equipamentos:

1. 01 Termômetro
2. 01 Anemômetro
3. 01 Seringa milimetrada

A temperatura da superfície de condensação foi medida utilizando o termômetro e extraindo a média de 05 medidas realizadas nos 4 cantos da placa de alumínio e no seu centro, buscando dessa forma, uma medida que representasse uma temperatura homogênea ao longo da superfície. As medições foram realizadas de 15 em 15 minutos até que a diferença entre as temperaturas médias obtidas fosse menor do que 0,1 °C. O tempo de duração dos experimentos foi considerado a partir da estabilização das temperaturas. O cooler de gabinete utilizado para gerar o fluxo de vento foi ligado em todos os experimentos com tensão de 10,5

V e corrente de 0,1 A. Nessa configuração, foi medida a velocidade do fluxo de ar com o anemômetro e se obteve um fluxo de ar constante com velocidade média de 1,4 m/s. Após a deposição do condensado no copo coletor, a água foi extraída com o auxílio de uma seringa milimetrada que permitiu medir o volume de água obtido. A tensão utilizada para ligar a célula Peltier foi de 12,5 V e a corrente de 1,6 A.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Aspectos Climatológicos

As condições climatológicas da região aonde os sistemas de desumidificação são utilizados influem de maneira decisiva na sua performance. Os experimentos foram realizados na cidade do Rio de Janeiro/RJ aonde devido à proximidade do mar a média de umidade relativa é sempre alta, em torno de 70% como pode ser visto na Figura 27:

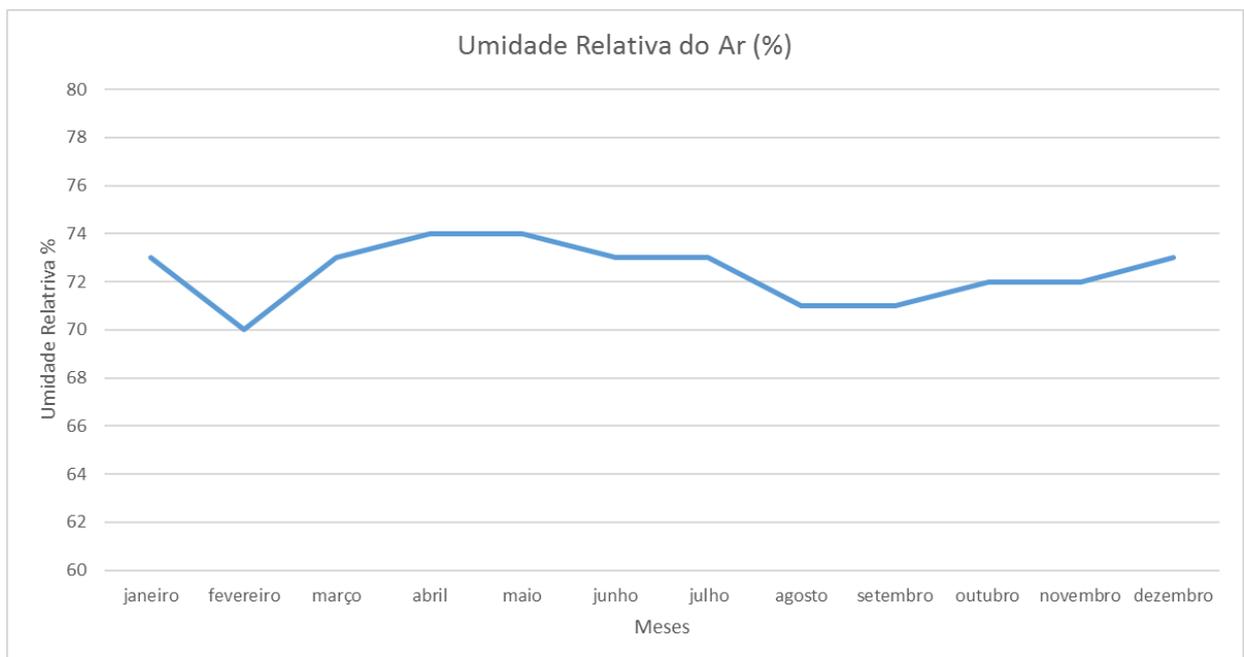


Figura 27: Umidade Relativa do Ar no Rio de Janeiro - Média Mensal entre 2006 e 2016 [34]

A alta umidade relativa aproxima a temperatura de orvalho da temperatura ambiente, aumentando a eficiência do sistema de desumidificação e facilitando a formação de condensado. As temperaturas máximas e mínimas na cidade do Rio de Janeiro também são altas como poder ser visto nas Figuras 28 e 29:

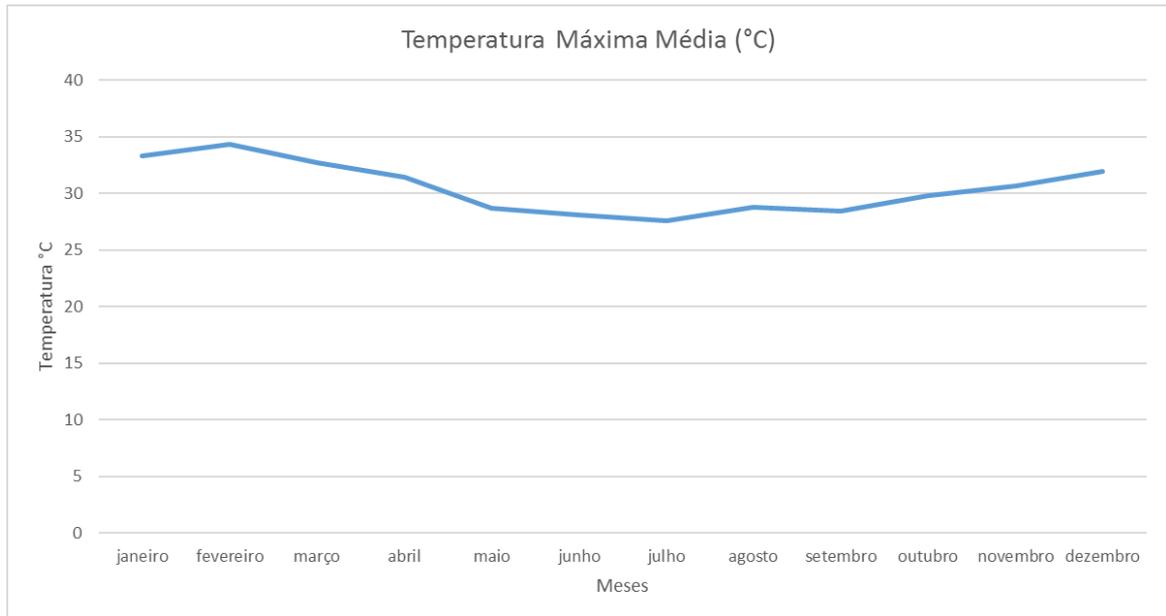


Figura 28: Temperatura Máxima Média no Rio de Janeiro - Média Mensal entre 2006 e 2016 [34]

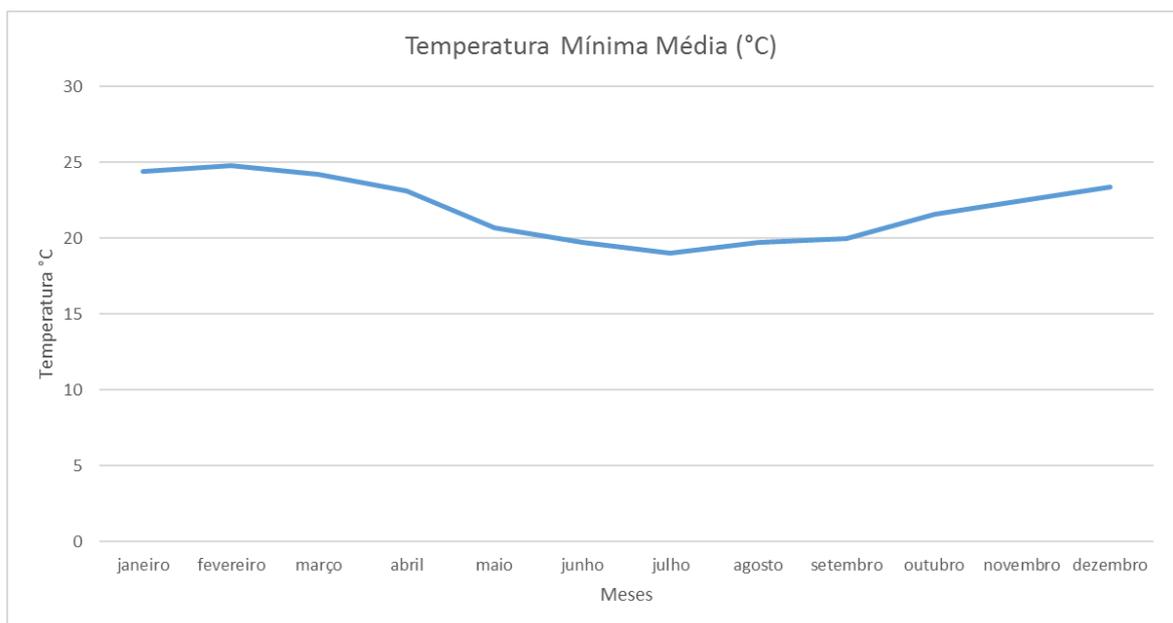


Figura 29: Temperatura Mínima Média no Rio de Janeiro - Média Mensal entre 2006 e 2016 [34]

As temperaturas elevadas quando aliadas à altas umidades relativas tendem a aumentar a eficácia do sistema, pois a temperatura de orvalho fica mais elevada e, portanto, a temperatura da superfície de condensação estará mais à esquerda da curva de temperatura de saturação garantindo assim, maior formação de condensado. No período em que foram realizados os experimentos, foram registradas variações tanto de temperatura quanto de umidade relativa pelas estações meteorológicas do sistema Alerta RJ [33]. Essas variações são uma

característica intrínseca do clima [14], e por isso, utilizaram-se os valores médios para o período em que foram realizados os experimentos, conforme mencionado na seção 3.3.

4.2 Resultados dos Experimentos com o Protótipo

Foi realizado um total de 09 experimentos ao longo do mês de outubro com intervalos diferentes de duração. No período dos experimentos notou-se nos registros da estação meteorológica uma grande variabilidade de temperatura e umidade relativa. Notou-se, que apesar das elevadas médias de umidade relativa e temperatura características da região do Rio de Janeiro, em alguns dias foram obtidos baixos valores para esses parâmetros. Na Tabela 3 estão dispostos os valores médios para os parâmetros climatológicos nos dias em que foram realizados os experimentos e os valores de condensado obtidos e esperados de acordo com cada experimento:

Tabela 3: Parâmetros Utilizados e Resultados Obtidos nos Experimentos

Experimento	Data	Duração (h)	Temperatura Ambient	Umidade Relativa (%)	Temperatura da Superfície (°C)	Condensado Esperado (ml)	Condensado Obtido (ml)	Capacidade de Extração (Kg/m ² /dia)
1	06/10/2016	06:45	21.99	72%	12.8	535.94	12.1	9.89
2	10/10/2016	03:15	22.22	66%	12.3	209.86	8.25	14.01
3	11/10/2016	02:45	25.1	62%	11.4	326.6	9.25	18.56
4	18/10/2016	02:15	29.84	61%	12.4	477.31	9.2	22.56
5	20/10/2016	07:00	33.2	49%	11.4	1502.27	36	28.37
6	21/10/2016	02:00	27.64	68%	11.2	450.17	12.5	34.48
7	27/10/2016	07:00	31.35	53%	12.4	1311.09	48	37.83
8	31/10/2016	03:00	26.8	52%	11.8	253.86	9	16.55
9	01/11/2016	04:00	32.3	37%	12.3	268.43	14	19.31

A capacidade de extração é um parâmetro que relaciona o condensado obtido com o tempo de experimento e a área de superfície de condensação utilizadas. Dessa forma, podem-se eliminar distorções causadas por variações no tempo de duração e de área de superfície de condensação, permitindo comparar os dados com outros trabalhos. Nas Figuras 30 e 31 podem-se verificar as curvas normais, traçadas com o auxílio do programa Minitab 17, para os resultados de condensado obtido e esperado de acordo com os cálculos psicrométricos:

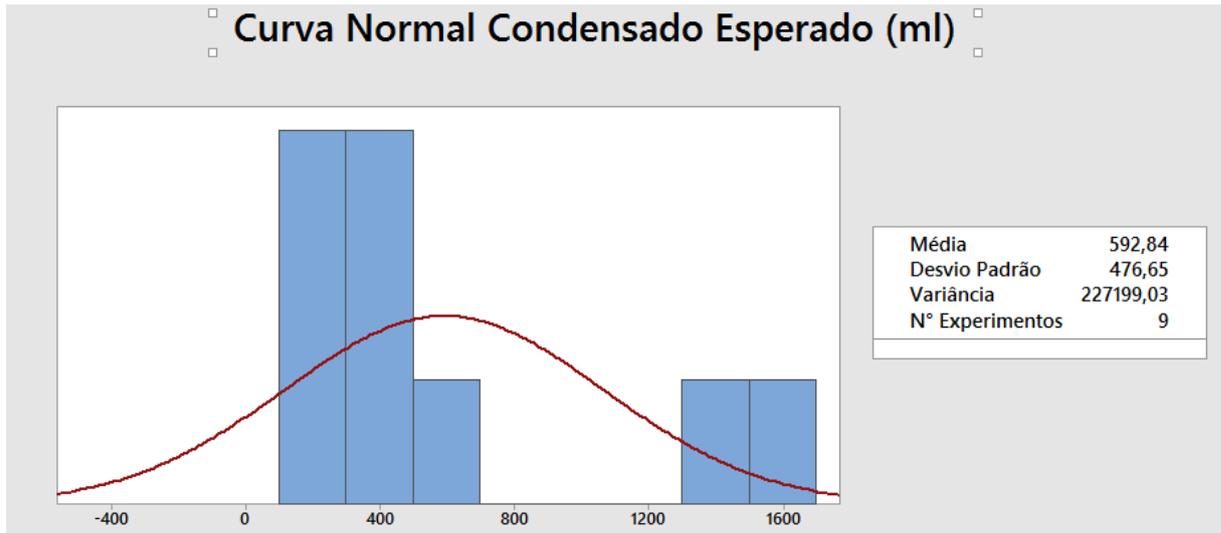


Figura 30: Curva Normal de Condensado Obtido

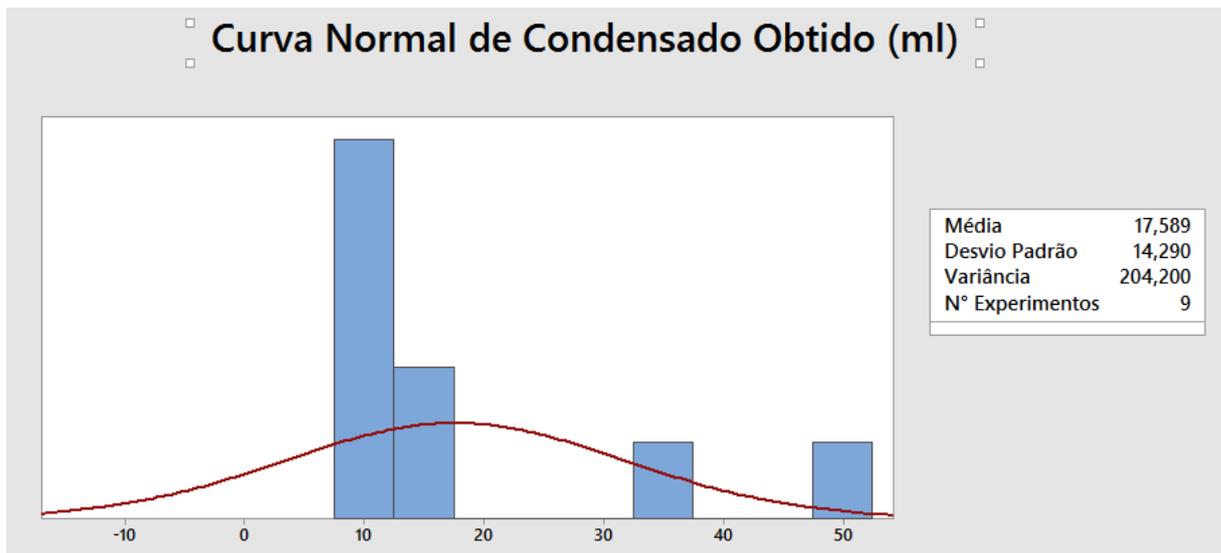


Figura 31: Curva Normal de Condensado Esperado

Através da análise das curvas normais, pode-se observar que os resultados obtidos apresentam alto desvio padrão, o que representa uma alta variabilidade dos dados com relação à média. Isso pode ser explicado pela alta variação dos parâmetros climatológicos de um dia para o outro como foi observado na Tabela 3. Podem-se observar na Figura 32 as curvas de condensado obtido e esperado para cada dia de experimento:

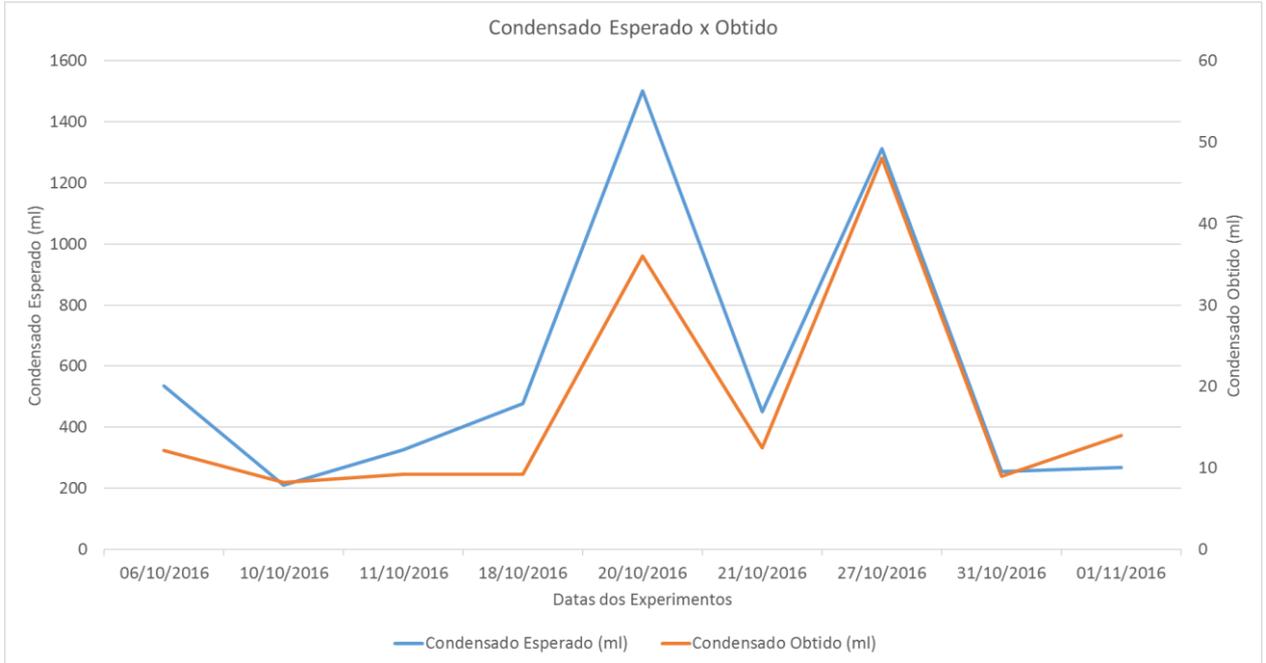


Figura 32: Curvas de Condensado Esperado e Condensado Obtido por Dia de Experimento

Podem-se observar que os resultados de condensado esperado foram muito superiores ao condensado obtido. Tomando como eficiência de extração a razão entre o condensado obtido e o condensado esperado, foi obtida uma eficiência de extração média de 3%. Apesar da baixa eficiência de extração, pode-se perceber que o valor de condensado previsto está bem correlacionado com o condensado obtido. Nas Figura 33 e 34 pode-se ver a variação dos valores de condensado com a temperatura e a umidade relativa:

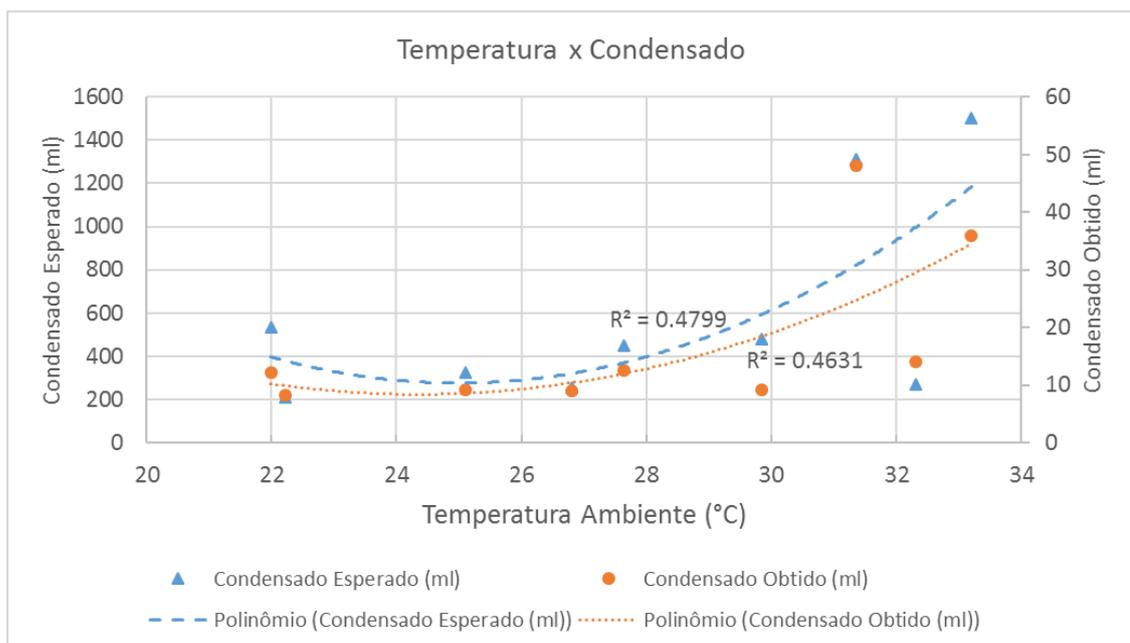


Figura 33: Gráfico de Condensado x Temperatura

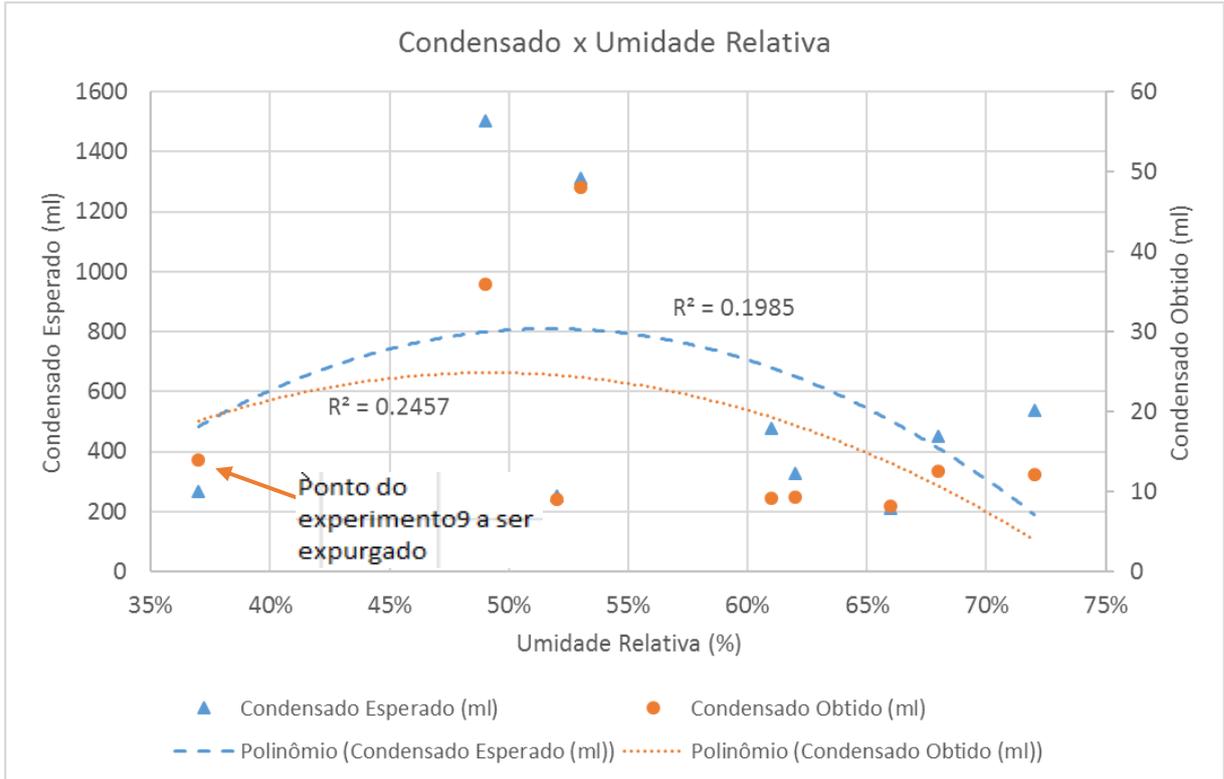


Figura 34: Gráfico de Condensado x Umidade Relativa

Ao se observar a Figura 34 claramente observamos que essa curva não é a curva característica que era esperada no primeiro momento. Avaliando a Figura 31 e comparado com a Figura 32 tendo em vista que, pela carta psicrométrica, temperatura e umidade tende a ter uma relação inversa de proporcionalidade, com isso esperava-se uma curva como função inversa ou algo próximo a menos de um fator de proporcionalidade.

Porém analisando-se ponto a ponto da curva percebe-se que o primeiro ponto referente ao experimento 9 da Tabela 3, vemos que este não segue a tendência esperada, dado que ele inflexiona o gráfico e o transforma numa curva parabólica. Expurgando esse dado que, analiticamente, se mostra fora da análise física do protótipo tem-se a seguinte situação:

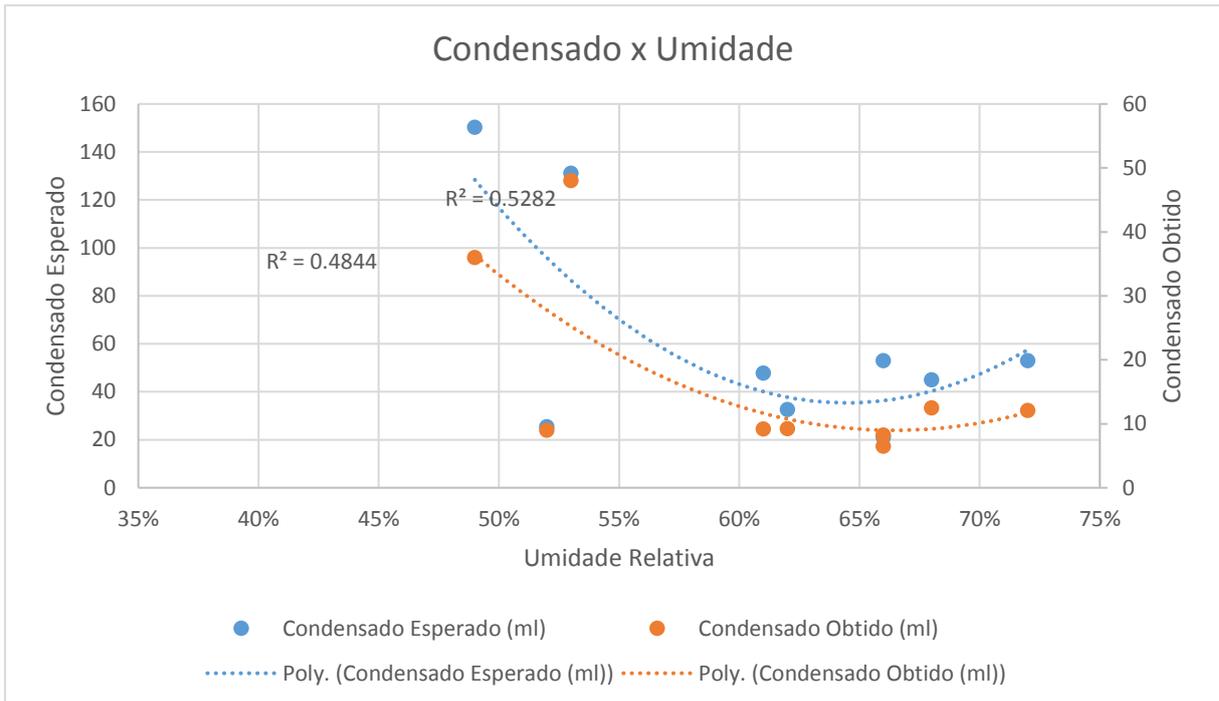


Figura 35: Gráfico Condensado x Umidade após expurgo do ponto

Uma forma de tentar diminuir as distorções causadas pelas diferentes durações dos experimentos é analisar a variação da capacidade de extração. Na Figura 36 foi traçado um gráfico que mostra a variação da temperatura e da umidade relativa em função da capacidade de extração.

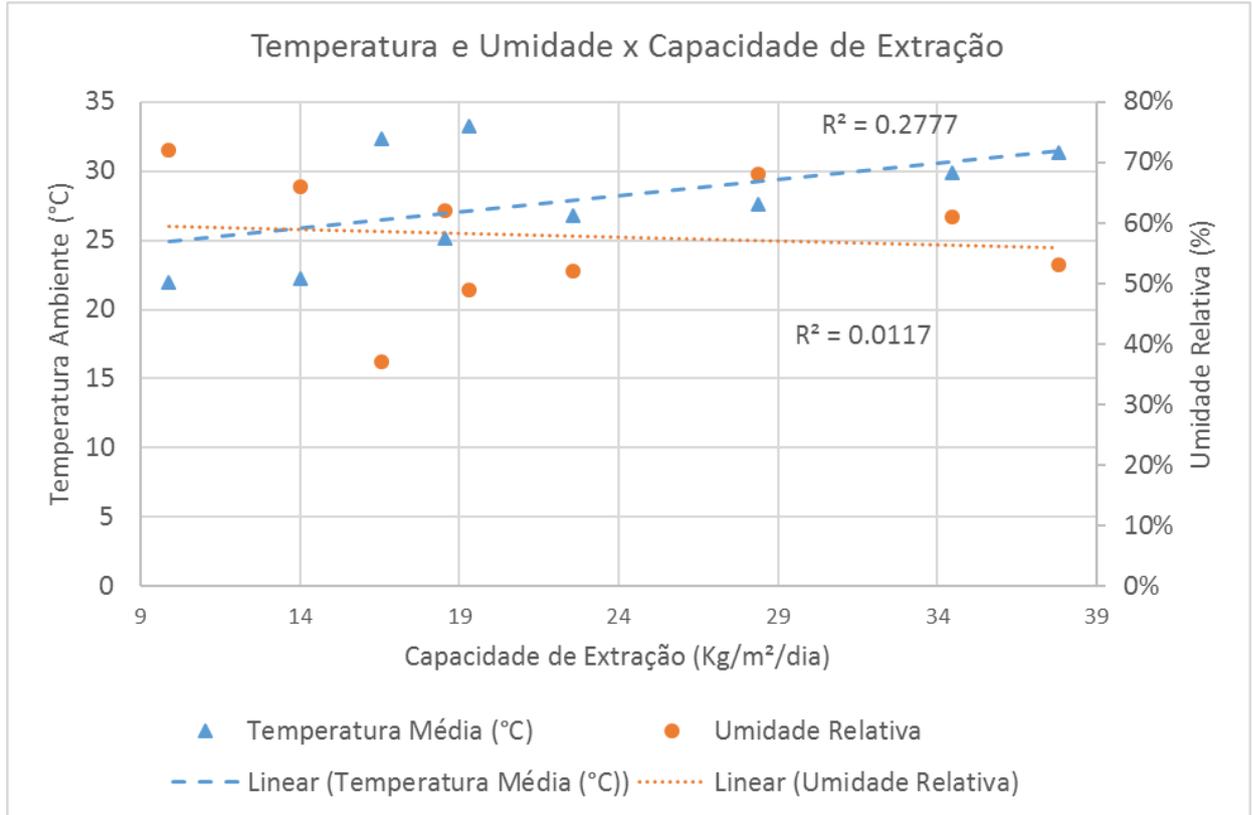


Figura 36: Gráfico de Capacidade de Extração x Temperatura Ambiente e Umidade Relativa

Analisando as curvas, pode-se notar que a capacidade de extração é diretamente proporcional ao aumento da temperatura, conforme esperado. Assim como o aumento do volume de condensado no gráfico da Figura 32, a tendência de aumento da capacidade de extração conforme se diminui a umidade relativa só ocorre devido ao aumento de temperatura ambiente compensar a diminuição da capacidade de extração causada pela menor umidade relativa. É possível notar que as curvas de temperatura ambiente e umidade relativa são inversamente proporcionais, o que está de acordo com a teoria psicrométrica, pois uma maior temperatura ambiente aumenta a quantidade de vapor que o ar consegue suportar, diminuindo assim sua umidade relativa.

A baixa eficiência de extração obtida, com média de 3%, é decorrente de uma série de fatores, entre eles os principais são:

1. Formação de filme líquido na superfície de condensação, diminuindo a troca térmica
2. Possíveis diferenças entre o microclima do ambiente do experimento e da estação meteorológica
3. Alta variação da umidade relativa no período do experimento

4. Não mensuração do escoamento tendo em vista a camada limite muito menor a considerada no modelos original.

Durante o experimento, pouco após a formação de condensado ocorre o surgimento de um filme de água cobrindo toda a superfície de condensação. Na literatura estima-se que quando ocorre convecção forçada com formação de filme a troca térmica é 10 vezes inferior a convecção forçada apenas com formação de gotas [35]. Como o modelo psicrométrico utilizado pressupõe que o ar resfriado se encontra na mesma temperatura da superfície de condensação, ou seja, com uma eficiência de troca térmica de 100%, existe uma perda de eficiência considerável devido à formação de filme líquido. A formação do filme líquido pode ser vista na Figura 37:



Figura 37: Formação de Filme Líquido na Superfície de Condensação durante Experimento

As possíveis diferenças entre os microclimas e a alta variação da umidade no período do experimento fazem com que os dados de condensado esperado sejam maiores do que o real, diminuindo a eficiência do protótipo. No experimento 7 a umidade relativa possui máxima de 82% e mínima de 39% durante o experimento e a temperatura ambiente varia entre 34,8 °C e 25,3 °C. Como pôde-se notar pelos resultados, a taxa de condensação é muito sensível a variações de umidade relativa e temperatura, o que indica que ao utilizar-se a média desses valores na ocorrência de altas variações o condensado esperado tende a ser maior do que o condensado obtido quando se considera todo o período do experimento.

Tabela 4: Comparação entre Capacidades de Extração de Diversos Autores

Referência	Método de Extração	Capacidade de Extração (Kg/m ² /dia)
Kabeel, A. [37]	Tipo 2 - Absorção com Regeneração	1.20
Habeebullah, B. [11]	Tipo 1 - Resfriamento com Bomba de Calor	17.60
Niklasson e Granqvist [19]	Tipo 1 - Resfriamento Radiativo	4.70
Silva e Souza [4]	Tipo 1 - Resfriamento com Bomba de Calor	29.52
Henker E. [14]	Tipo 1 - Resfriamento com Bomba de Calor	62.40
Sharan [15]	Tipo 1 - Resfriamento Radiativo	23.00
Elsarrag e Horr [18]	Tipo 2 - Absorção com Regeneração	4.80
Carvalho e Tavares	Tipo 1 - Resfriamento com Bomba de Calor	22.40

Na Tabela 4 estão dispostas as capacidades de extração de condensado de diversos autores e a capacidade de extração média obtida nos experimentos realizados nesse estudo, que foi de 22,40 Kg/m²/dia. Pode-se verificar que os valores obtidos estão concordantes com os experimentos de Tipo 1, o que indica que mesmo considerando as perdas de eficiência obtidas no protótipo o modelo proposto é eficaz. Na Figura 38 está disposta a curva normal das capacidades de extração para os 9 experimentos realizados:

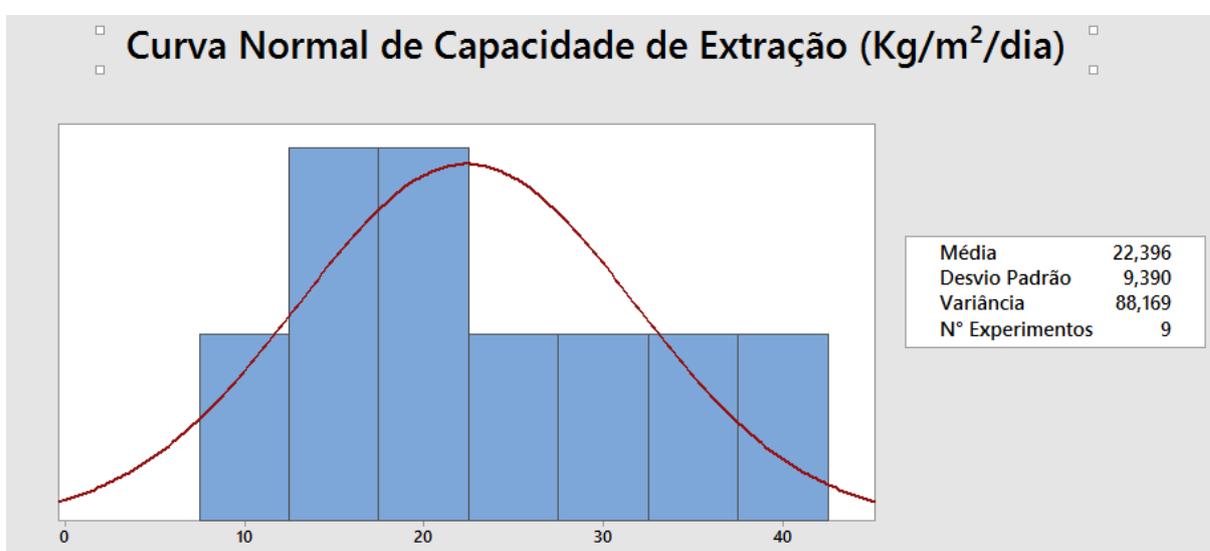


Figura 38: Curva Normal de Capacidade de Extração

Analisando a capacidade de extração, os dados apresentam um desvio padrão proporcionalmente menor e um histograma mais uniforme do que aqueles obtidos para o condensado esperado e obtido. Isso ocorre devido à menor dependência da capacidade de extração com relação ao tempo do experimento, ao contrário dos condensados obtido e esperado.

Após estas constatações verificamos que nossa simulação estava muito longe da realidade da bancada, com isso foi incluído o modelo de camada limite visando corrigir a área útil de troca térmica do escoamento com isso verificamos uma melhora considerável nos resultados. Abaixo segue os novos resultados segundo essa análise:

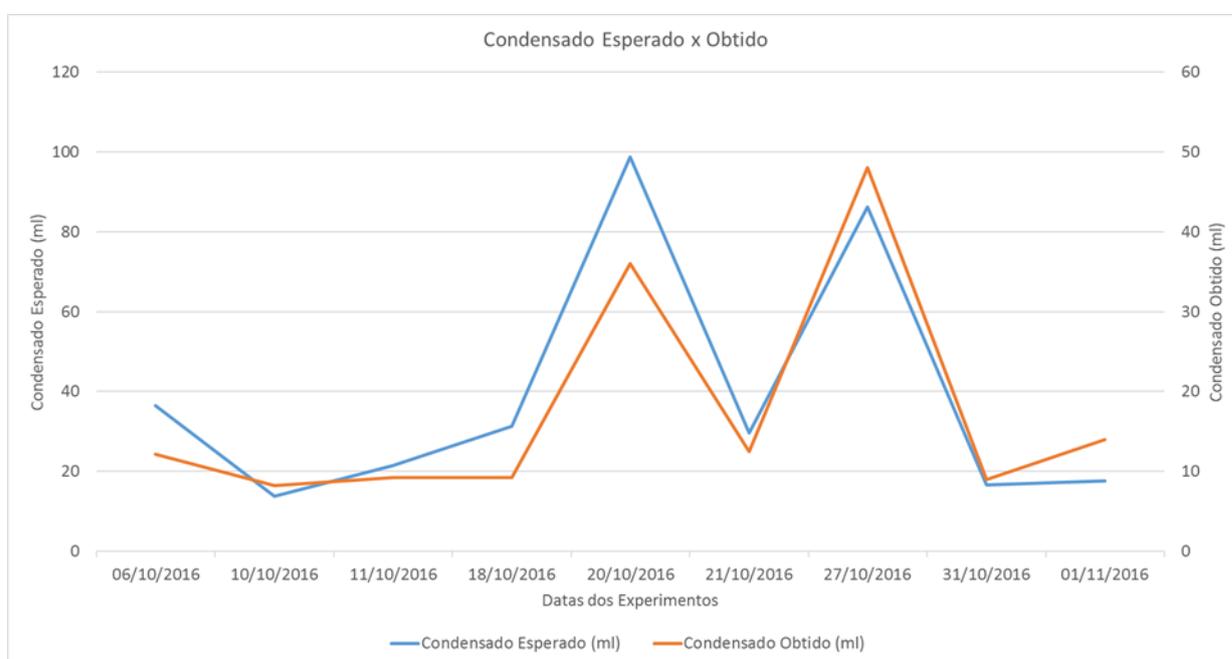


Figura 39: Correção da Figura 32 por Camada Limite

Pode-se verificar pelos eixos que os valores possuem mesma ordem de grandeza, ou seja, a discrepância de valores diminuiu drasticamente sem alterar as características físicas propostas no modelo matemático. Em suma a simulação com camada limite térmica se mostra promissora em termos de melhora da modelagem do problema.

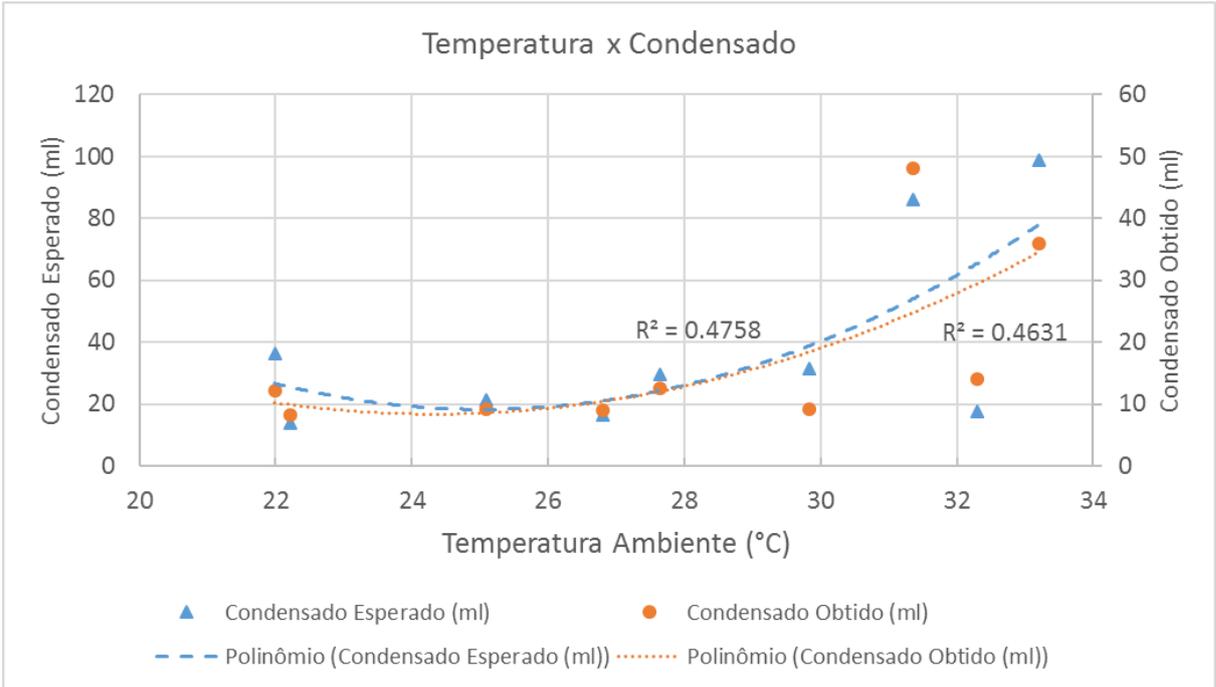


Figura 40: Correção da Figura 33 por Camada Limite

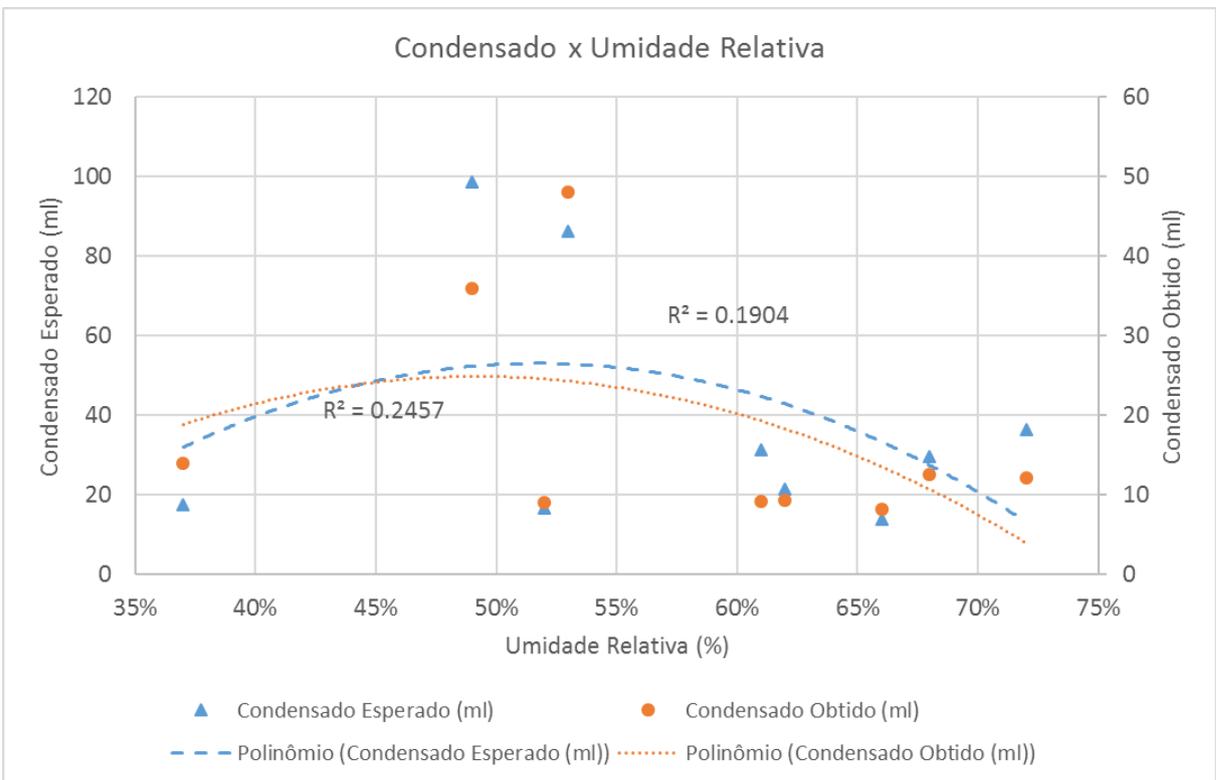


Figura 41: Correção da Figura 34 por Camada Limite

Acima percebemos o mesmo caráter visto com a análise psicrométrica apenas aproximando os dados obtidos via simulação e os dos testes de bancada. Como visto anteriormente o expurgo do ponto do experimento 9 continua necessário para que a curva de umidade tome o caráter inverso ao de temperatura. Por fim, após nova análise, traremos aqui o resultado entre condensado esperado e obtido juntamente com as respectivas capacidades de extrações de cada experimento:

Tabela 5: Correção da Tabela 3 por Camada Limite

Experimento	Data	Duração (h)	Temperatura Ambiente (°C)	Umidade Relativa (%)	Temperatura da Superfície (°C)	Condensado Esperado (ml)	Condensado Obtido (ml)	Capacidade de Extração (Kg/m ² /dia)
1	06/10/2016	06:45	21.99	72%	12.8	36.44	12.1	9.89
2	10/10/2016	03:15	22.22	66%	12.3	13.73	8.25	14.01
3	11/10/2016	02:45	25.1	62%	11.4	21.46	9.25	18.56
4	18/10/2016	02:15	29.84	61%	12.4	31.37	9.2	22.56
5	20/10/2016	07:00	33.2	49%	11.4	98.69	36	28.37
6	21/10/2016	02:00	27.64	68%	11.2	29.6	12.5	34.48
7	27/10/2016	07:00	31.35	53%	12.4	86.13	48	37.83
8	31/10/2016	03:00	26.8	52%	11.8	16.66	9	16.55
9	01/11/2016	04:00	32.3	37%	12.3	17.57	14	19.31

Nota-se que a média feita entre as capacidades de extração continua em 22.4 Kg/m²/dia, o que nos mostra que a metodologia referente ao escoamento apenas melhora a relação de condensado esperado e obtido, porem a capacidade de extração continua intacta. Corroborando que a análise de camada limite melhora apenas nossas expectativas em relação ao condensado obtido tendo valores mais condizentes.

5. CONCLUSÃO

Os experimentos permitiram obter uma capacidade de extração média de 22,40 kg/m²/dia com uma eficiência de extração média de 3% com relação ao condensado esperado. Como pode ser visto na Tabela 4 a capacidade de extração obtida está de acordo com os resultados obtidos por experimentos com sistemas de Tipo 1 de outros autores, ratificando o estudo em questão.

A análise gráfica dos dados obtidos e a comparação do volume de condensado obtido através dos experimentos com o volume de condensado esperado de acordo com o modelo matemático empregado no estudo permitiram concluir que apesar da baixa eficiência de extração do protótipo, existe uma correlação entre os fenômenos observados durante os experimentos e aqueles previstos pelo modelo psicrométrico. Pôde-se observar que o volume de condensado gerado e a capacidade de extração do protótipo são diretamente proporcionais ao aumento da temperatura ambiente. Verificou-se também uma tendência de aumento da capacidade de extração e do condensado gerado com a diminuição da umidade relativa. Contudo, conforme foi discutido na seção anterior, essa tendência somente ocorreu devido à uma elevação da temperatura ambiente concorrente com a diminuição da umidade relativa durante os experimentos, o que compensou a diminuição de volume de condensado causada pela menor umidade relativa, contribuindo para gerar um aumento líquido tanto do volume de condensado quanto da capacidade de extração. Pôde-se observar também que a temperatura ambiente e a umidade relativa são inversamente proporcionais, o que assim como os demais resultados mencionados acima, está de acordo com o modelo psicrométrico proposto para análise dos fenômenos.

A formação de filme líquido durante os experimentos contribuiu decisivamente para diminuir a eficiência de extração de condensado do protótipo. Esse fato torna evidente que apesar da boa correlação dos resultados com o modelo, ao não se considerar a formação de filme líquido na superfície de condensação e conseqüentemente uma diminuição da eficiência térmica do protótipo, gera-se um grande distanciamento do modelo com relação à realidade dos fenômenos estudados. Como os dados meteorológicos não foram medidos diretamente no local do experimento, mas sim obtidos de uma estação meteorológica, existe uma incerteza com relação aos dados aplicados no modelo psicrométrico para prever o condensado gerado, o que pode ter contribuído para diminuir a eficiência do protótipo.

O custo estimado para confecção do protótipo, considerando a compra dos equipamentos reciclados como chapa de alumínio e cooler de CPU, é de R\$ 100,00 ou \$ 29,53 [36]. O

consumo médio de energia durante os experimentos foi de 0,11 kWh, um consumo baixo quando comparado com a capacidade de extração do protótipo. Isso permite concluir que o sistema AWVP Tipo 1 estudado empregando células Peltier possui um excelente potencial econômico para geração de água, não só pelo baixo consumo energético, mas também pelo baixo custo dos materiais envolvidos na sua composição. É importante notar que para atingir uma capacidade de extração maior de 62,4 kg/m²/dia, Eliezer Henker [14] consumiu em média 7,92 kWh, pois utilizou duas células Peltier em série, dois ventiladores para aumento do fluxo de ar na face fria e uma lâmpada ultravioleta para tornar a água resultante potável. Mesmo desconsiderando a lâmpada ultravioleta que não influenciou o volume de condensado gerado, pode-se perceber que para a obtenção de acréscimos na capacidade de extração é necessário um consumo mais elevado de energia e a utilização de equipamentos melhores, encarecendo o sistema. Com relação à potabilidade da água gerada, não foram realizados testes para verificar a qualidade da água resultante, porém conforme já foi mencionado na seção 2.3, a inclusão de uma lâmpada ultravioleta no sistema ou a adição de cloro na água gerada para torna-la potável não aumentariam o custo do sistema a ponto de torna-lo economicamente inviável.

Devido à inclusão da análise da camada-limite térmica no modelo matemático que descreve o sistema e à correção da área de fluxo de ar que troca calor com a superfície de calor, obteve-se uma eficiência de extração média de água de 48%. Quando comparada a eficiência média anterior de 3%, pode-se concluir que a alteração do modelo representou uma grande melhoria dos resultados. A semelhança entre as curvas que relacionam o condensado com a temperatura ambiente e a umidade relativa antes e depois da alteração no modelo indicam, conforme esperado, que a correção da área de troca térmica não alterou as tendências previstas pelo modelo psicrométrico, corrigindo apenas a eficiência do protótipo. Contudo, quando se analisa a dispersão dos dados, nota-se que o melhor parâmetro para análise dos resultados obtidos ainda é a capacidade de extração de água em Kg/m²/dia, devido à menor influência do tempo de experimento nos resultados obtidos. Os resultados obtidos através da nova análise demonstram que ainda existem muitas melhorias a serem feitas tanto no modelo teórico quanto no protótipo de modo a se obter uma eficiência de extração ainda maior e uma melhor compreensão da correlação entre a capacidade de extração e os parâmetros do experimento.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Tendo em vista a melhoria do trabalho já realizado e a obtenção de novas conclusões, sugere-se as seguintes modificações ou melhorias:

- Medição direta dos parâmetros meteorológicos no ambiente dos experimentos

Devido à possíveis diferenças entre o microclima do ambiente do experimento e da estação meteorológica de onde os dados utilizados para a previsão da massa de condensado foram obtidos, houve incerteza com relação à massa de condensado prevista pelo software RainMaker, contribuindo para aumentar a diferença entre os dados previstos e os obtidos. A medição da temperatura ambiente e da umidade relativa com o auxílio de um higrômetro aumenta a confiabilidade dos dados utilizados na predição do volume de condensado gerado, o que por sua vez aumenta a confiabilidade da eficiência de extração do protótipo.

- Medição da temperatura de saída do fluxo de ar

Devido à formação de filme líquido na superfície de condensação, a eficiência de troca térmica do protótipo foi grandemente reduzida. Dessa forma, a premissa do modelo matemático utilizado de que a temperatura de saída do ar seria igual à temperatura da superfície de condensação confere um alto erro ao condensado esperado. A medição da temperatura de saída do fluxo de ar permite ignorar as perdas de troca térmica do sistema, considerando na previsão de volume de condensado apenas os estados inicial e final do sistema, o que confere maior confiabilidade ao modelo psicrométrico utilizado para descrever o sistema.

- Análise transiente do protótipo

A medição direta dos parâmetros meteorológicos permite também o acompanhamento das mudanças climáticas ao longo do tempo do experimento. Com o auxílio de termopares é possível medir as temperaturas do fluxo de ar tanto na saída quanto na entrada e acompanhar a evolução do sistema conforme as condições meteorológicas do experimento se alteram. Dessa forma os dados obtidos se aproximariam mais da realidade, pois o clima ao qual um sistema de obtenção de água estaria submetido também estaria sobre constantes mudanças. A análise da troca de calor por convecção em regime transiente na superfície de condensação permitiria chegar à dados referentes à eficiência térmica do protótipo, porém isso necessitaria

de se adaptar as equações para considerar a formação de filme líquido na superfície de condensação.

- Alterações na construção do protótipo

A utilização de ventiladores mais potentes e em diferentes velocidades de corrente permite a análise da sua influência no volume de condensado gerado. A utilização de duas ou mais células Peltier em série também permite a análise da variação da capacidade de extração com o consumo de energia do sistema, conferindo uma melhor análise da viabilidade econômica do sistema. Pode-se também estudar a influência da inclinação da superfície de condensação na deposição do condensado no coletor, o que faria com que o fluxo de ar entrasse em contato com a superfície de condensação mais rapidamente, aumentando o volume de condensado obtido. A utilização de materiais higroscópicos como superfície de condensação também pode auxiliar em diminuir o tempo de formação de condensado, aumentando a capacidade de extração do sistema. Uma melhoria na construção do protótipo também deve isolar o sistema de modo a minimizar as trocas térmicas do fluxo de ar e da superfície de condensação com o ambiente externo.

Referências

- [1] National Geographic, “National Geographic,” [Online]. Available: <http://environment.nationalgeographic.com/environment/freshwater/freshwater-crisis/>. [Acesso em 28 Março 2016].
- [2] USGS Water Science School, “The World's Water,” 02 Maio 2016. [Online]. Available: <http://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>. [Acesso em 22 Maio 2016].
- [3] United Nations, “United Nations World Water Day,” [Online]. Available: <http://www.unwater.org/water-cooperation-2013/water-cooperation/facts-and-figures/en/>. [Acesso em 28 Março 2016].
- [4] G. da Silva e F. d. A. S. de Sousa, “Estudo da viabilidade da produção de água a partir do resfriamento do ar,” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 13, nº 5, pp. 575-580, 2009.
- [5] D. Beysens, I. Milimouk, V. Nikolayev, M. Muselli e M. Jacques, “Using radiative cooling to condense atmospheric vapor: a study to improve water yield,” *Journal of Hydrology*, nº 276, pp. 1-11, 2003.
- [6] V. S. Nikolayev, D. Beysens, A. Gioda, I. Milimouk, E. Katiushin e J. -P. Morel, “Water recovery from dew,” *Journal of Hydrology*, nº 182, pp. 19-35, 1996.
- [7] R. V. Wahlgren, “Atmospheric Water Vapour Processor Designs for Potable Water Production: A Review,” *Water Research*, vol. 35, nº 1, pp. 1-22, 2001.
- [8] Science and Technology Concepts for Middle Schools, “Properties of Matter - Air Heads,” [Online]. Available: http://www.propertiesofmatter.si.edu/Air_Heads.html. [Acesso em 27 Maio 2016].
- [9] Stoecker, “Tabela A3,” em *Refrigeration and Air Conditioning*, McGraw-Hill, p. 40.
- [10] D. A. Beysen e M. A. Najm, “Dew as a Sustainable Non-Conventional Water Resource: A Critical Review,” *Environmental Reviews*, Setembro 2015.
- [11] B. Habeebullah, “Potential use of evaporator coils for water extraction in hot and humid areas,” *Desalination*, Fevereiro 2009.
- [12] W. F. Stoecker e J. M. Saiz Jabardo, “Influência de Parâmetros Operacionais e de Projeto Sobre as Condições de Saída do Ar da Serpentina,” em *Refrigeração Industrial*, Editora Edgar Blucher LTDA, 2002, p. 130.
- [13] D. Beysens, “The Formation of Dew,” *Atmospheric Research*, pp. 215-237, Outubro 1995.
- [14] E. Henker, *Estudo e Construção de Equipamentos Desumidificadores para Obtenção de Água Potável Utilizando Diferentes Sistemas*, Santa Cruz do Sul: Universidade de Santa Cruz do Sul, 2012.
- [15] G. Sharan, “Harvesting Dew with Radiation Cooled Condensers to Supplement Drinking Water Supply in Semi-arid Coastal Northwest India,” *International Journal for Service*

Learning in Engineering, vol. 6, nº 1, pp. 130-150, 2011.

- [16] D. A. Beysens e M. Muselli, “Is Dew Water Potable? Chemical and Biological Analyses of Water in Ajaccio (Corsica Island, France),” *Journal of Environmental Quality*, Setembro 2006.
- [17] World Health Organization, “World Health Organization: Water Sanitation Health,” [Online]. Available: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/en/. [Acesso em 29 Março 2016].
- [18] E. Elsarrag e Y. Horr, “EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON WATER RECOVERY FROM THE ATMOSPHERE IN ARID HUMID REGIONS,” em *CIBSE Technical Symposium*, Leicestern, 2011.
- [19] T. M. J. Nilsson, W. E. Vargas, G. A. Niklasson e C. G. Granqvist, “Condensation of Water by Radiative Cooling,” *Renewable Energy*, vol. 5, pp. 310-317, 1994.
- [20] Stanford University, “Nighttime Radiative Cooling: Harvesting the Darkness of the Universe,” Global Climate and Energy Project, Setembro 2014. [Online]. Available: <http://web.stanford.edu/group/gcep/cgi-bin/gcep-research/all/nighttime-radiative-cooling-harvesting-the-darkness-of-the-universe/>. [Acesso em 04 Junho 2016].
- [21] T. H. Helmer e J. F. Hyde, “Recovery of Water from Atmospheric Air in Arid Climates,” *Separation Science and Technology*, vol. 21, nº 3, pp. 251-266, 1986.
- [22] A. M. Hamed, A. E. Kabeel, E. B. Zeidan e A. A. Aly, “A Technical Review on The Extraction of Water from Atmospheric Air in Arid Zones,” *JP International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 4, nº 3, pp. 213-228, 2010.
- [23] V. P. Starr e D. A. Anati, “Experimental Engineering Procedure for the Recovery of Liquid Water from the Atmospheric Vapor Content,” *Pure and Applied Geophysics*, vol. 86, nº 1, pp. 205-208, 1971.
- [24] V. P. Starr, D. A. Anati e D. A. Salstein, “Effectiveness of Controlled Convection in Producing Precipitation,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 79, nº 27, pp. 4047-4052, 1974.
- [25] Kryotherm, “Catalog,” [Online]. Available: <http://kryothermtec.com/catalogs.html>. [Acesso em 04 Maio 2016].
- [26] R. H. Pindado, *Climatización Mediante Células Peltier*, Madrid: Universidade Pontificia Comillas, 2008.
- [27] L. B. Silverio, *Análise de um Condicionar de Ar Automotivo Utilizando o Efeito Termoelétrico*, Taubaté: Universidade de Taubaté, 2012.
- [28] V. Humel, *Potenciais Aplicações de Módulos Termoelétricos*, Lorena: Universidade de São Paulo, 2014.
- [29] Hebei I.T. Co., Ltd., “Index of Peltier Datasheet,” [Online]. Available: <http://www.hebeiltd.com.cn/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf>. [Acesso em 11 Novembro 2016].

- [30] V. Humel, *Potenciais Aplicações de Módulos Termoelétricos*, Lorena: Universidade de São Paulo, 2014.
- [31] ASHRAE, *ASHRAE Fundamentals Handbook*, Atlanta, 2001.
- [32] Laird Technologies, *Thermoelectric Handbook*, 2010.
- [33] Prefeitura do Rio de Janeiro, “Alerta RJ,” [Online]. Available: <http://alertario.rio.rj.gov.br/>. [Acesso em 13 Novembro 2016].
- [34] Instituto Nacional de Meteorologia, “Dados Climáticos Rio de Janeiro,” [Online]. Available: <https://www.rio2016.com/pregamestraining/pt/dados-climaticos/rio-de-janeiro>. [Acesso em 13 Novembro 2016].
- [35] Y. A. Çengel e A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer*, New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [36] Valor Econômico, “Valor Econômico,” Grupo Globo, [Online]. Available: www.valor.com.br. [Acesso em 11 Novembro 2016].
- [37] A. Maciel, *Development and Control of a Condensation System Using Peltier Cells*, Lisboa, 2014.
- [38] A. E. Kabeel, “Application of Sandy Bed Solar Collector System for Water Extraction from Air,” *International Journal of Energy Research*, Maio 2006.