



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



UTILIZAÇÃO DO EFEITO PELTIER PARA RESFRIAMENTO DE AMBIENTES

Thaynara Pedrosa Silva

Uberlândia – MG
2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



UTILIZAÇÃO DO EFEITO PELTIER PARA RESFRIAMENTO DE AMBIENTES

Thaynara Pedrosa Silva

Orientador: Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Uberlândia – MG
2021

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

| | |
|--------------|---|
| S586 2021 | <p>Silva, Thaynara Pedrosa, 1994- Utilização do efeito Peltier para resfriamento de ambientes [recurso eletrônico] / Thaynara Pedrosa Silva. - 2021.</p> <p>Orientador: Luiz Gustavo Martins Vieira. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.669 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia química. I. Vieira, Luiz Gustavo Martins, 1976-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 66.0</p> |
|--------------|---|

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto – CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química



Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica,
Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

| | | | | | |
|------------------------------------|--|-----------------|-------|-----------------------|-------|
| Programa de Pós-Graduação em: | Engenharia Química | | | | |
| Defesa de: | Dissertação de Mestrado, 22/2021, PPGEQ | | | | |
| Data: | 20 de dezembro de 2021 | Hora de início: | 13:30 | Hora de encerramento: | 15:25 |
| Matrícula do Discente: | 11922EQU012 | | | | |
| Nome do Discente: | Thaynara Pedrosa Silva | | | | |
| Título do Trabalho: | Utilização do efeito <i>Peltier</i> para resfriamento de ambientes | | | | |
| Área de concentração: | Desenvolvimento de Processos Químicos | | | | |
| Linha de pesquisa: | Processos de Separação | | | | |
| Projeto de Pesquisa de vinculação: | Estudo de Concentradores Solares | | | | |

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Yanne Novais Kyriakidis - FEMEC/UFU; Diogo Ítalo Segalen da Silva - IFTM/Rondonópolis; Danylo de Oliveira Silva - PPGEA/UFU; Rafael Bruno Vieira - PPGEQ/UFU e Luiz Gustavo Martins Vieira - PPGEQ/UFU, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Gustavo Martins Vieira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/12/2021, às 15:29, conforme horário oficial de



Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **Rafael Bruno Vieira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/12/2021, às 15:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Danylo de Oliveira Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/12/2021, às 15:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Yanne Novais Kyriakidis, Professor(a) Substituto(a) do Magistério Superior**, em 20/12/2021, às 15:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Italo Segalen da Silva, Usuário Externo**, em 20/12/2021, às 17:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3268805** e o código CRC **0F8417C2**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo a Deus, por sempre estar presente em cada passo dessa caminhada, me proporcionando capacidade.

Aos meus pais, pelo apoio infinito em todas as minhas escolhas, ajudando da maneira como podem. Ao meu irmão, por sempre acreditar em mim. E a toda minha família, por todo o incentivo ao longo do caminho.

Serei eternamente grata aos meus tios e tias: Poliana, Carlos, Elaine, José Olivaldo; às minhas irmãs de coração: Mariana, Cecília, Thais, Daniele e ao Thiago por serem meu suporte em Uberlândia, me ajudando quando eu mais precisei e me acolhendo em seus lares e suas famílias.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Gustavo pela orientação e ajuda no trabalho, pela paciência e por todo o aprendizado.

Além disso, quero agradecer ao Joaquim Moroni e à Despa por todo apoio conferido a esse trabalho, as ideias e sugestões que, com certeza, engrandeceram a pesquisa.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os funcionários e professores da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia e à CAPES, órgão de fomento da minha bolsa durante esse tempo.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| LISTA DE FIGURAS | i |
| LISTA DE TABELAS | iii |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | iv |
| RESUMO..... | vi |
| ABSTRACT | vii |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Objetivos | 3 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 4 |
| 2.1. Efeito Peltier | 4 |
| 2.2. Resfriamento de ambientes – história | 6 |
| 2.3. Transferência de calor | 7 |
| 2.3.1. Condução | 7 |
| 2.3.2. Convecção | 8 |
| 2.4. Trabalhos com efeito Peltier | 10 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 13 |
| 3.1. Testes preliminares..... | 13 |
| 3.2. Dimensionamento de um novo dissipador | 19 |
| 3.3. Planejamento experimental | 21 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 25 |
| 4.1. Resultados dos testes preliminares | 25 |
| 4.2. Escolha do fluido de circulação | 27 |
| 4.3. Localização dos termômetros nos ambientes de teste | 28 |
| 4.4. Testes do Planejamento Composto Central (PCC) | 29 |
| 4.5. Testes do segundo planejamento | 35 |
| 4.6. Avaliação da influência do cooler no interior dos ambientes | 39 |
| 4.7. Comparação com os resultados obtidos por Dias (2020) | 40 |
| 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES..... | 42 |
| 5.1. Conclusões | 42 |
| 5.2. Sugestões | 43 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 44 |
| APÊNDICE A..... | 48 |
| APÊNDICE B..... | 50 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Mudança climática observada na superfície terrestre e terra-oceano entre 1850 e 2018..... | 1 |
| Figura 1.2 – Participação do uso aparelhos de ar-condicionado na energia elétrica em alguns países e previsão para 2050..... | 2 |
| Figura 2.1 – Representação esquemática do funcionamento de uma pastilha Peltier, mostrando a direção do calor e os pares de semicondutores tipo-P e tipo-N..... | 4 |
| Figura 2.2 – Exemplos de possíveis arranjos de pastilhas Peltier com três estágios..... | 5 |
| Figura 2.3 – Diferentes tipos de aletas: (a) longitudinal de perfil retangular; (b) tubo cilíndrico com aletas de perfil retangular; (c) longitudinal com perfil trapezoidal; (d) longitudinal com perfil parabólico; (e) tubo cilíndrico com aleta radial de perfil retangular; (f) tubo cilíndrico com aleta radial de perfil cônico truncado; (g) pino cilíndrico; (h) saliência cônica truncada; (i) saliência parabólica..... | 8 |
| Figura 2.4 – Transferência de calor a partir de uma superfície quente para o fluido por condução e convecção..... | 9 |
| Figura 3.1 – Modelo esquemático dos testes de resfriamento de ambientes por efeito Peltier: (a) vista lateral, (b) frontal e (c) posterior..... | 14 |
| Figura 3.2 – Modelo esquemático dos testes de resfriamento de ambientes por efeito Peltier: vista lateral sem o dissipador no interior do ambiente para melhor visão das pastilhas Peltier..... | 15 |
| Figura 3.3 – Desenho esquemático da dissipador com canais em sua base e as denominações de largura, comprimento e altura da base e altura e espessura das aletas..... | 16 |
| Figura 3.4 – Dissipador utilizado no terceiro sistema montado, conectado às faces frias das pastilhas Peltier..... | 17 |
| Figura 3.5 – Terceiro sistema de testes de forma esquemática: com ar comprimido circulando no canal do dissipador quente..... | 17 |
| Figura 3.6 – Sistema com água circulando no canal do dissipador quente..... | 18 |
| Figura 3.7 – Representação esquemática do dissipador utilizado no lado frio das pastilhas Peltier..... | 20 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.8 – Desenho esquemático das localidades dos termopares dentro do ambiente (vista superior)..... | 23 |
| Figura 3.9 – Representação esquemática de como a mudança das áreas no ambiente de testes é feita..... | 24 |
| Figura 4.1 – Comparação do comportamento do sistema com uma e duas pastilhas Peltier..... | 26 |
| Figura 4.2 – Representação esquemática da visão interna da base do dissipador em contato com o lado quente das pastilhas Peltier..... | 27 |
| Figura 4.3 – Temperaturas em cada termopar..... | 29 |
| Figura 4.4 – Teste do PCC com área de 1,70 m ² e potência de 310 W..... | 29 |
| Figura 4.5 – Testes do PCC com área de 1,625 m ² | 30 |
| Figura 4.6 – Testes do PCC com área de 1,25 m ² | 31 |
| Figura 4.7 – Testes do PCC com área de 0,875 m ² | 31 |
| Figura 4.8 – Teste do PCC com área de 0,80 m ² e potência de 310 W..... | 32 |
| Figura 4.9 – (a) Superfície de respostas (b) e contorno em função do par P-S para os testes do Planejamento Composto Central (PCC)..... | 34 |
| Figura 4.10 – Gráficos dos valores observados vs. preditos para o planejamento composto central..... | 34 |
| Figura 4.11 – Testes do segundo planejamento com área de 0,80 m ² | 35 |
| Figura 4.12 – Testes do segundo planejamento com área de 0,50 m ² | 36 |
| Figura 4.13 – Testes do segundo planejamento com área de 0,20 m ² | 37 |
| Figura 4.14 – (a) Superfície de respostas (b) e contorno em função do par P-S para os testes do segundo planejamento..... | 38 |
| Figura 4.15 – Gráficos dos valores observados vs. preditos para o segundo planejamento..... | 39 |
| Figura 4.16 – Testes com apenas o <i>cooler</i> ligado nos ambientes..... | 40 |
| Figura A.1 – Sistema de testes sem o ambiente de isopor..... | 48 |
| Figura A.2 – Teste com a maior área (1,7 m ²)..... | 49 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 – Especificações máximas das pastilhas Peltier..... | 13 |
| Tabela 3.2 – Matriz de planejamento para o resfriamento por placas Peltier..... | 22 |
| Tabela 3.3 – Segunda matriz de planejamento dos testes experimentais..... | 22 |
| Tabela 4.1 – Resultados dos testes preliminares em que se utilizavam ar comprimido e água como como fluidos de circulação no dissipador com canais em sua base..... | 28 |
| Tabela B.1 – Datas e horários dos testes experimentais..... | 50 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------|---|
| A | área de transferência de calor [m ²] |
| A_c | área da aleta [m ²] |
| DT_{MAX} | máxima diferença de temperatura entre os lados quentes e frios de uma pastilha Peltier [°C] |
| h | coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m ² .K)] |
| I | corrente [A] |
| I_{MAX} | máxima corrente em uma pastilha Peltier [A] |
| k | condutividade térmica [W/(m.K)] |
| L | altura da aleta [m] |
| Nu | adimensional de Nusselt |
| q | taxa de transferência térmica [W] |
| Q_{MAX} | limite de calor que a pastilha Peltier pode transferir [W] |
| p | perímetro da aleta [m] |
| P | potência [W] |
| Pr | adimensional de Prandtl |
| Re | número de Reynolds |
| S | área da base [m ²] |
| T | temperatura do fluido [°C] |
| T_1 | temperatura do ponto 1 [°C] |
| T_2 | temperatura do ponto 2 [°C] |
| T_3 | temperatura do ponto 3 [°C] |
| T_4 | temperatura do ponto 4 [°C] |
| T_5 | temperatura do ponto 5 [°C] |
| T_∞ | temperatura do fluido suficientemente longe da superfície [K] |
| T_{amb} | temperatura ambiente [°C] |
| T_s | temperatura da superfície [K] |
| V | voltagem [V] |
| v_∞ | velocidade na seção transversal [m/s] |
| V_{MAX} | máxima voltagem em uma pastilha Peltier [V] |
| W | comprimento de cada aleta [m] |
| X_1 | valores codificados para potência |

X_2 valores codificados para área

Símbolos grego

∇T gradiente de temperatura [K]
 ν viscosidade cinemática [m²/s]
 ΔT diferença de temperatura entre dois pontos [°C]
 α alfa de ortogonalidade

RESUMO

Em um mundo onde o aquecimento global se faz presente, a população mundial busca cada vez mais um conforto térmico através dos sistemas de resfriamento de ar. A maneira mais usual encontrada nas casas e prédios são os aparelhos de ar condicionado, que liberam gases HFCs e CO₂, prejudiciais ao meio ambiente. Para que esses problemas sejam evitados, esse trabalho utiliza do efeito Peltier, que consiste na geração de um gradiente de temperatura quando uma corrente elétrica passa por dois elementos semicondutores, para resfriar ambientes sem a emissão de gases tóxicos à atmosfera. Foram produzidos protótipos de ambientes fabricados de folhas de isopor de espessura igual a 25 mm com áreas da base variando de 0,20 m² a 1,70 m², sendo que foi mantido um pé direito constante de 0,25 m. O sistema de resfriamento foi composto de quatro pastilhas Peltier ligadas a uma fonte elétrica de 50 A e 12 V e suas potências eram variadas de 285,8 W a 334,2 W. A dissipação de calor do lado quente do sistema foi feita por um dissipador de alumínio com uma corrente de água em sua base e um cooler soprando em suas aletas. Já no lado frio, o calor recebido era espalhado no sistema com o auxílio de um segundo dissipador de alumínio e um cooler circulando o ar no ambiente. Cinco termômetros foram posicionados em locais diferentes para analisar o comportamento do ar no interior. Os testes ocorreram por 120 minutos, sendo que nos primeiros 20 minutos ocorreram as maiores quedas de temperatura. O melhor resultado obtido foi no ambiente de menor área da base e maior potência, onde foi registrado uma queda de 9,4 °C. Constatou-se também que o cooler presente dentro dos ambientes influenciou no resfriamento, já que produzia calor. O teste feito em três diferentes áreas mostrou que, quanto menor o ambiente, mais efeito tinha o calor do cooler.

Palavras-chave: energia elétrica, dissipação térmica, sustentabilidade, troca de calor.

ABSTRACT

In a world where the global warming exists, the global population is increasingly seeking a thermal comfort through the air cooling systems. The most usual system found in houses and buildings is the air conditioners, which release HFCs and CO₂, gases harmful to the environment. To avoid these problems, this work uses the Peltier effect, which consists of generating a temperature gradient when an electrical current passes through two semiconductor elements, to cool environments without emitting toxic gases into the atmosphere. Environment prototypes were produced by sheets of Styrofoam with thickness equal to 25 mm, with base areas ranging from 0.20 m² to 1.70 m² and a constant ceiling height of 0.25 m. The cooling system had four Peltier cells connected to an electrical source of 50 A and 12 V and their powers ranged from 285.8 W to 334.2 W. The heat dissipation on the hot side of the system was done by an aluminum heat sink with a stream of water at its base and a fan blowing on its fins. On the cold side, the dissipation was exclusively made by a second aluminum heat sink and a fan circulating the air in the environment. Five thermometers were placed in different locations to analyze the behavior of indoor air. The tests happened for 120 minutes, but the greatest drops in temperature were in the first 20 minutes. The best result was in the environment with the smallest base area and the greater power, where a drop of 9.4 °C was recorded. It also was noticed that the fan inside the environments influenced the cooling, as it produced heat. Testing in three different areas showed that the smaller the environment, the higher was the effect of the fan's heat.

Keywords: electricity, thermal dissipation, sustainability, heat exchange.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos 50 anos, as atividades humanas – especialmente aquelas ligadas à queima de combustíveis fósseis – têm lançado na atmosfera quantidades de dióxido de carbono e gases estufa suficientes para afetar a temperatura ambiente. Em 130 anos, a temperatura global aumentou aproximadamente 0,85°C. As últimas três décadas foram mais quentes que qualquer década anterior desde 1850 (WHO, 2018). Na Figura 1.1 nota-se a mudança na temperatura do ar na superfície terrestre e na temperatura global média da superfície até 2018.

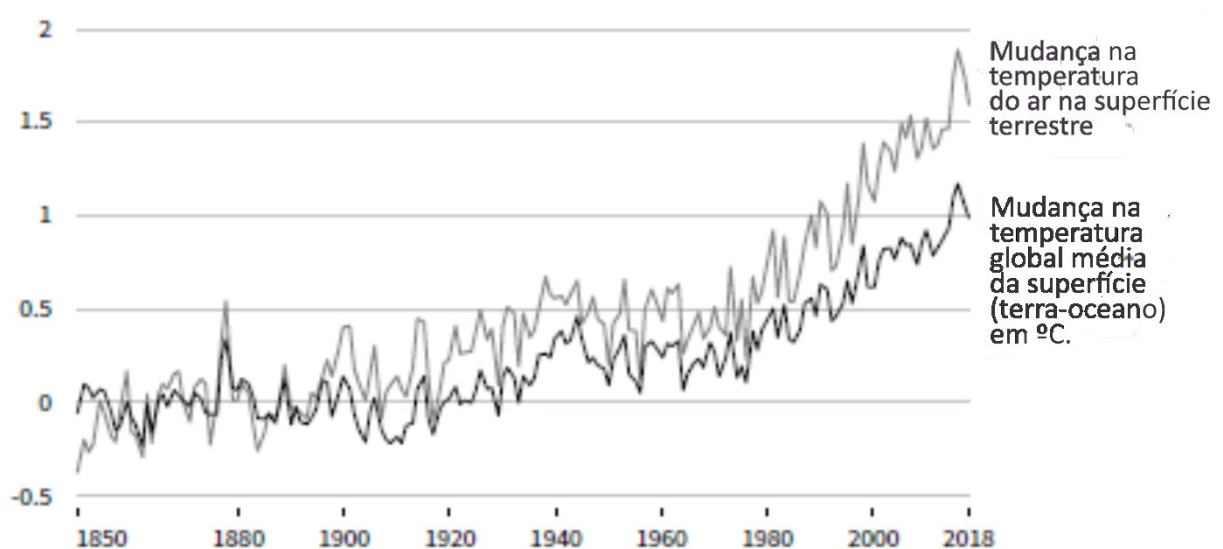


Figura 1.1 – Mudança climática observada na superfície terrestre e terra-oceano entre 1850 e 2018. Fonte: IPCC, 2020.

Para que se tenha um conforto térmico nos ambientes, os sistemas de resfriamento do ar são utilizados. Em 2018, o uso de ar-condicionado e ventiladores foram responsáveis por quase 20% do uso total de eletricidade no mundo todo. Nas próximas três décadas, seu uso tende a disparar, tornando-se uma das principais demandas de energia elétrica, principalmente em países com climas mais quentes (IEA, 2018). No gráfico da Figura 1.2 mostra-se a participação do uso de ar-condicionado no sistema elétrico em determinados países em 2016 e o cenário previsto para 2050.

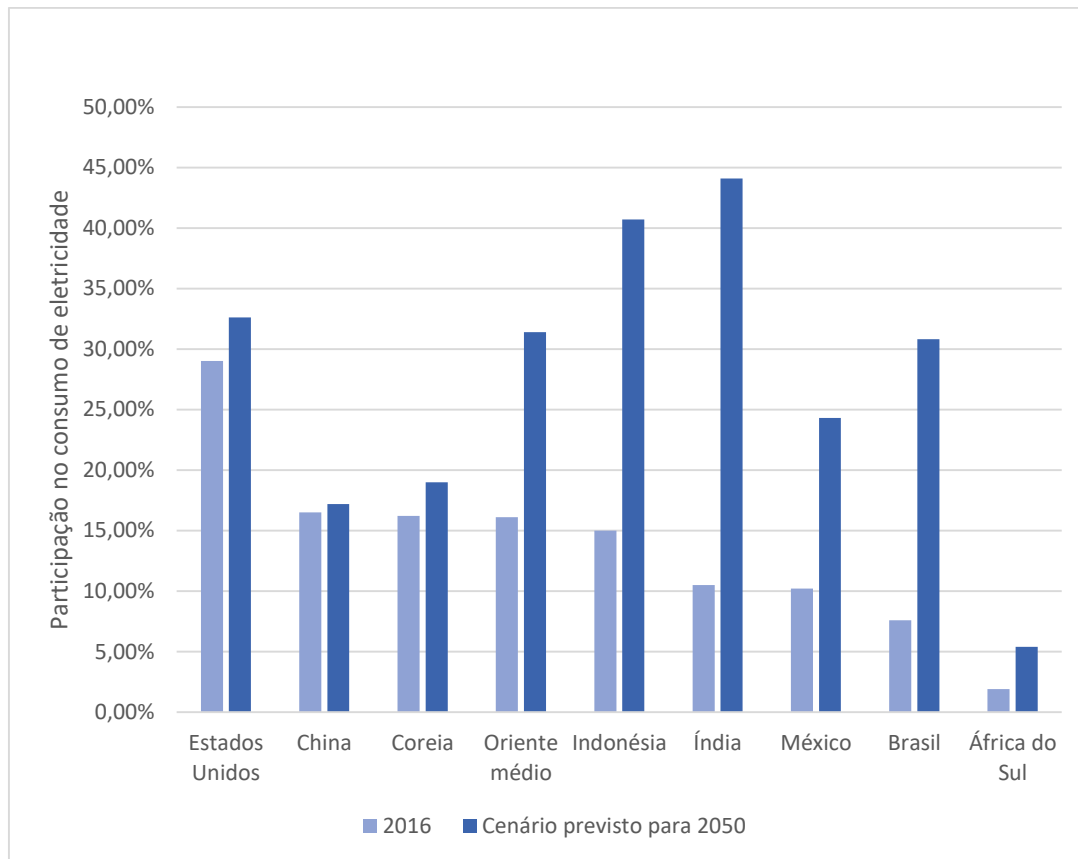


Figura 1.2 – Participação do uso aparelhos de ar-condicionado no consumo de energia elétrica em alguns países no ano de 2016 e a previsão para 2050.

Fonte: IEA, 2018.

Se por um lado a demanda crescente por resfriamento do ar se faz necessária, por outro, a utilização de aparelhos condicionadores de ar agravam o aquecimento global por causa das emissões de hidrofluorcarbonetos (HFCs). Os HFCs foram criados como alternativa para substituir os clorofluorcarbonetos (CFCs), que destruíam a camada de ozônio. Porém, os HFCs são gases que potencializam o efeito estufa (UNEP; IEA, 2020).

Dias (2020) propôs um método de resfriamento de ambientes por um sistema ciclônico-psicrométrico sustentável, diminuindo a temperatura da carcaça do ciclone, que era umedecida e exposta ao ar ambiente. O ar era circulado no interior do ambiente, promovendo a queda de temperatura.

Semelhante a esta técnica, este trabalho propõe um modelo de resfriamento do ar no interior de ambientes utilizando o efeito Peltier, que utiliza de semicondutores diferentes para gerar uma diferença de temperatura em um sistema quando submetido a uma corrente elétrica. Um protótipo sustentável,

que não libera gases ao ar ambiente, foi construído, utilizando princípios térmicos de condução e convecção de calor.

O efeito Peltier ocorre com a passagem de uma corrente elétrica direta entre dois metais semicondutores, fazendo surgir uma diferença de temperatura entre eles (GUREVICH; VELÁZQUEZ-PÉREZ, 2014). Neste trabalho, foram utilizadas pastilhas de efeito Peltier para dissipar a temperatura mais baixa que surgiu valendo-se dos fenômenos de condução e de convecção dentro de um ambiente feito de isopor, com o intuito de resfriar o ar no seu interior. Para isso, a temperatura quente produzida é dissipada, também por meio do transporte condutivo e convectivo do calor para fora do ambiente a ser resfriado.

Apesar de já existirem estudos do resfriamento do ar ambiente por efeito Peltier, este trabalho traz novas configurações para fazê-lo, tal como o método utilizado para dissipar o calor de uma pastilha Peltier, que serão detalhadas nas próximas seções.

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é, então, promover o resfriamento de ambientes com a ajuda de placas Peltier.

Portanto, os objetivos específicos são:

- identificar os melhores dissipadores para o sistema de resfriamento;
- escolher o fluido de circulação do dissipador conectado ao lado quente das pastilhas Peltier;
- definir as potências e as áreas de trabalho para resfriar ambientes de diferentes tamanhos;
- montar a unidade experimental, com diferentes áreas ;
- analisar a queda de temperatura dentro dos ambientes de testes, quando comparadas com a temperatura ambiente externa;
- verificar o efeito do cooler dentro dos ambientes de testes para diferentes áreas;
- comparar o método de resfriamento do ambiente com o método proposto no trabalho de Dias (2020).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Efeito Peltier

Historicamente, os efeitos Peltier e Seebeck foram ambos descobertos no começo do século passado (MACDONALD, 2006). Em 1821, Seebeck fez circular uma corrente elétrica direta em um circuito fechado, formado por dois semicondutores metálicos diferentes, ao submeter suas junções a temperaturas diferentes. Em 1834, Peltier descobre o efeito inverso ao efeito Seebeck, ou seja, uma corrente elétrica direta passou em um circuito formado por semicondutores diferentes, o que fez surgir em suas junções uma diferença de temperatura (SANTOS, 2016).

Uma pastilha de Peltier consiste em duas camadas de cerâmica, que representam os lados quente e frio, e dois semicondutores diferentes, tipo-P e tipo-N, conectados em série (KADHIM; ABBAS; KADHIM, 2020). Quando a corrente elétrica passa pelos pares dos elementos semicondutores, o calor é absorvido pelo ambiente e há uma redução na temperatura em um dos lados (“lado frio”) e um aumento no outro (“lado quente”), onde o calor é liberado (RUFINO, 2016). Na Figura 2.1 representa-se esquematicamente uma pastilha Peltier.

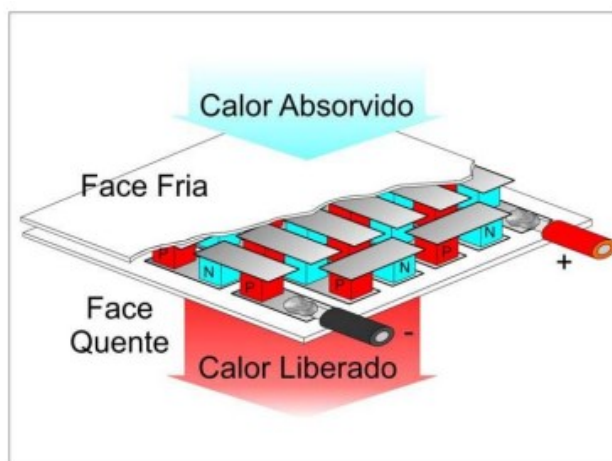


Figura 2.1 – Representação esquemática do funcionamento de uma pastilha Peltier, mostrando a direção do calor e os pares de semicondutores tipo-P e tipo-N. Fonte: Moura, 2010.

As pastilhas podem ser encontradas no comércio em diversos tamanhos, desde 0,6 x 0,6 cm até 5 x 5 cm, e podem ser utilizadas em várias montagens: sozinhas, agrupadas em série, paralelo ou em uma combinação destes (MOURA, 2010). Na Figura 2.2 mostra-se exemplos dos agrupamentos das pastilhas.

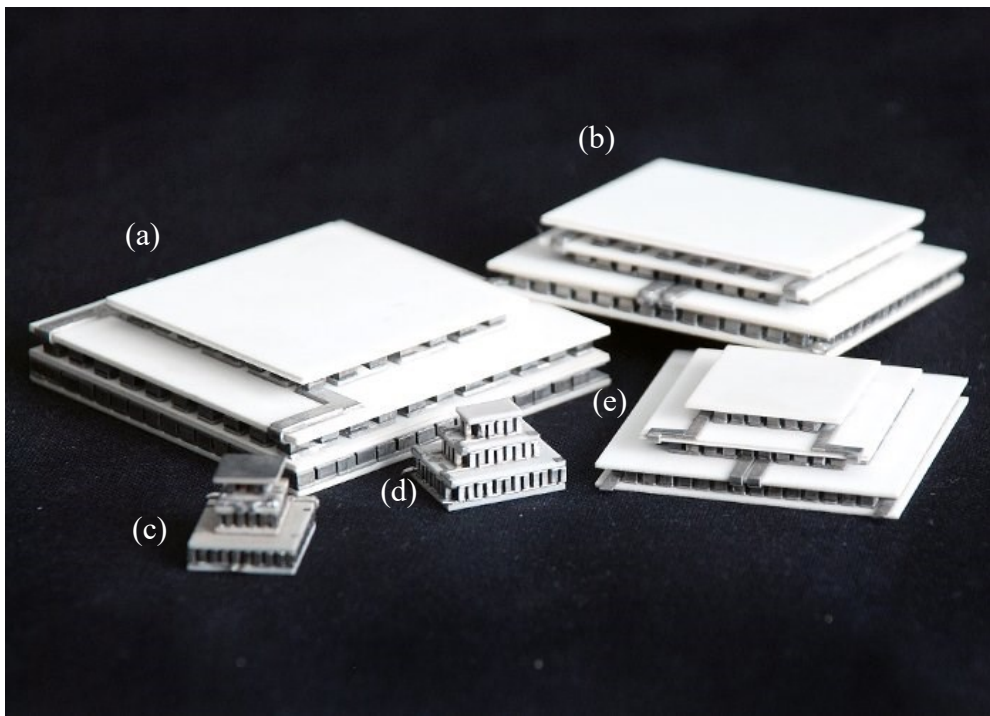


Figura 2.2 – Exemplos de possíveis arranjos de pastilhas Peltier com três estágios. Fonte: Artic TEC, 2011.

Em (a) na Figura 2.2, os dois estágios inferiores, ou seja, as duas pastilhas da base, têm o mesmo tamanho, enquanto o estágio superior é menor. Em (b) e em (c), o estágio inferior é maior que os dois estágios superiores, que têm o mesmo tamanho, sendo que as pastilhas de (b) têm maiores dimensões que as pastilhas de (c). Em (d) e (e) as pastilhas dos três estágios possuem tamanhos diferentes, diminuindo do mais inferior para o mais superior. Em (d) as pastilhas têm menores dimensões que em (e).

Cada pastilha encontrada no mercado tem suas especificações máximas, como o limite de quanto calor pode transferir (Q_{MAX}), a corrente associada a esse calor (I_{MAX}) e a voltagem correspondente (V_{MAX}). Quando o sistema for

completamente isolado e a corrente estiver passando, produzirá uma diferença de temperatura máxima entre os lados quente e frio (DT_{MAX}) (Danvic, 2020).

Uma vantagem de se utilizar as pastilhas Peltier é que, mudando a direção da corrente, o lado frio esquenta e, conseqüentemente, o lado quente esfria, fazendo com que seja fácil reverter as temperaturas sem desmontar todo o sistema, se necessário. Além disso, o resfriamento é feito silenciosamente e as pastilhas têm vida útil indefinida, desde que os limites de temperatura do lado quente sejam mantidos. Um possível problema que se pode ter é que, se o calor do lado quente não for bem dissipado e alcançar uma temperatura de 100°C, a pastilha derreterá (RICHMOND, 2014).

2.2. Resfriamento de ambientes – história

O resfriamento de ambientes para fins de conforto térmico é o condicionamento do ar do meio através do controle da temperatura, umidade, pureza e distribuição (BUENO, 2007). Um sistema de condicionamento de ar para conforto é uma estrutura que fornece um ambiente agradável durante todo o ano, tanto no verão quanto no inverno (JONES, 2001).

O primeiro registro de que se tem notícia da tentativa de produzir refrigeração foi em 1748 por William Cullen da Universidade de Glasgow criando um vácuo parcial sobre um recipiente contendo éter etílico, mas que não obteve sucesso na prática (ARORA, 2006). Após vários anos tentando fazer uma máquina de compressão que controlasse a temperatura ambiente, Willis Carrier, em 1902, criou um sistema de controle de temperatura e umidade por spray para uma empresa de impressão no Brooklyn, em Nova York, o que não obteve sucesso, já que o spray deixava no ar partículas que o contaminavam (NAGENGAST, 2002). Então, em 1906, Cramer inventou o termo “ar condicionado” ao criar uma máquina para controlar a umidade das indústrias têxteis. Sua máquina consistia em um termômetro de bulbo seco e um de bulbo úmido conectados eletricamente de modo que mantinha uma diferença de temperatura constante entre as temperaturas. O termômetro de bulbo úmido era mantido submerso em um reservatório de água, mantendo-o sempre a uma temperatura abaixo da mostrada no termômetro de bulbo seco (COOPER, 2002).

Tal máquina foi a base para o desenvolvimento dos aparelhos utilizados na atualidade.

Para melhor compreensão deste trabalho, passa-se na sequência a uma breve revisão a respeito dos fenômenos de transporte de calor envolvidos no processo.

2.3. Transferência de calor

A transferência de calor se dá de três formas: condução, convecção e radiação. Nas três formas, ocorre o deslocamento do calor do meio de maior temperatura para o de menor temperatura, porém cada transporte acontece de uma maneira. As maneiras relevantes para este trabalho estão discutidos nesta seção.

2.3.1. Condução

A condução é definida como a transferência de energia das partículas mais energéticas, de um meio sólido ou fluido, para as menos energéticas, devido às interações entre partículas. A quantidade de energia está associada à temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura, mais energética é a partícula (INCROPERA et al., 2008).

A equação que determina o fluxo com que ocorre essa transferência de energia foi primeiramente apresentada por Fourier em 1822. A forma geral da Lei de Fourier em termos da taxa:

$$\frac{q}{A} = -k\nabla T \quad (2.1)$$

Em que q é a taxa de transferência térmica, A é a área normal à direção do fluxo de calor, k é a condutividade térmica do meio, ∇ é o símbolo que representa o gradiente e T é a temperatura (WELTY et al, 2008).

Neste caso, a condutividade térmica (k) não depende da direção do transporte de energia, ou seja, é expressa para meios isotrópicos. Esta propriedade é uma função da temperatura, variando com a pressão apenas em casos de gases submetidos a altas pressões (WELTY et al., 2008).

Uma aplicação muito usual de condução de calor unidimensional é o uso de aletas. Com elas, é possível aumentar a transferência de calor entre uma superfície e o fluido de contato, aumentando a área de contato com este. As aletas podem vir em várias formas, como mostrado na Figura 2.3 (WELTY et al., 2008).

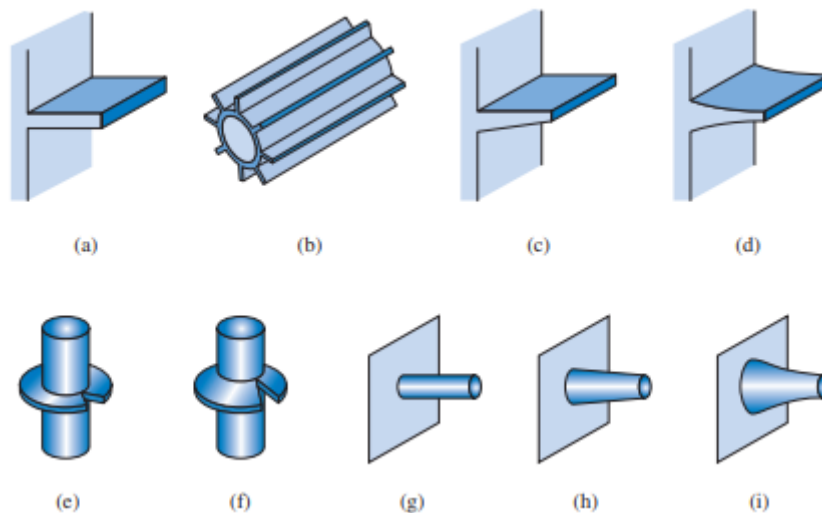


Figura 2.3 – Diferentes tipos de aletas: (a) longitudinal de perfil retangular; (b) tubo cilíndrico com aletas de perfil retangular; (c) longitudinal com perfil trapezoidal; (d) longitudinal com perfil parabólico; (e) tubo cilíndrico com aleta radial de perfil retangular; (f) tubo cilíndrico com aleta radial de perfil cônico truncado; (g) pino cilíndrico; (h) saliência cônica truncada; (i) saliência parabólica. Fonte: KREITH; MANGLIK; BOHN, 2011.

Para casos em que a temperatura varia com o tempo, é possível determinar o fluxo de calor em um certo ponto da região desejada naquele tempo, utilizando a Lei de Fourier combinada com a Equação da Difusão de Calor. Para isso, é preciso especificar as condições de contorno e iniciais do problema desejado (INCROPERA et al., 2008).

2.3.2. Convecção

A transferência de calor por convecção envolve tanto a condução de calor quanto o movimento do fluido. Quanto maior a velocidade de movimento do fluido, maior a transferência de energia térmica das partículas quentes para as

frias. Somente líquidos e gases transferem calor por convecção, já que as moléculas das superfícies sólidas estão sempre em posições fixas, transferindo a energia apenas por condução. A taxa de transferência de calor por convecção é expressa pela lei do resfriamento de Newton:

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Em que h é o coeficiente convectivo de transferência de calor, A é a área de contato sólido e fluido, T_s é a temperatura da superfície sólida e T_∞ é a temperatura *bulk* do fluido (ÇENGEL; GHAJAR, 2011).

A convecção pode ser natural, quando é provocada por um gradiente de densidade, ou forçada quando existe uma diferença de pressão gerada por movimento mecânico. Nas duas formas de convecção, o calor é transferido no fluido da mesma maneira, porém a intensidade do movimento de mistura dos fluidos é menor na convecção natural do que na convecção forçada (KREITH; BOHN, 2003). Na Figura 2.4 representa-se a transferência de calor por condução, convecção natural e convecção forçada.

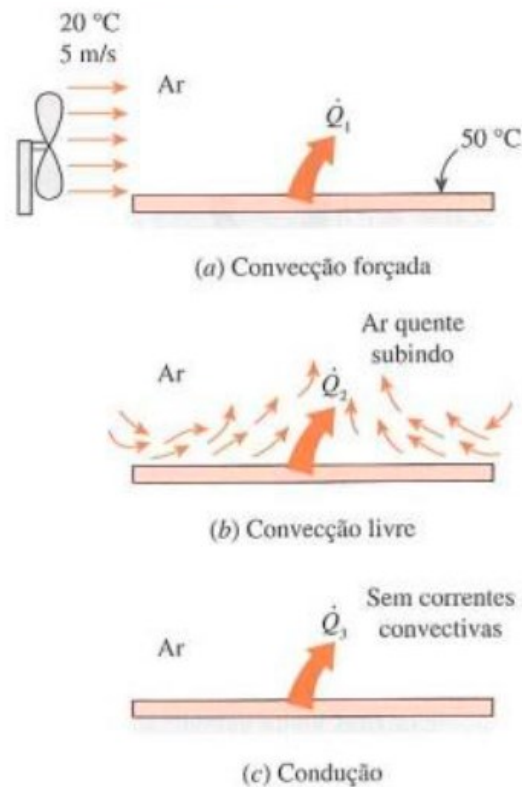


Figura 2.4 – Transferência de calor a partir de uma superfície quente para o fluido por condução e convecção. Fonte: ÇENGEL; GHAJAR, 2011.

Kreith e Bohn (2003) ainda explicam mais detalhadamente a convecção natural:

“A transferência de calor por convecção natural ocorre quando um corpo é colocado em um fluido a uma temperatura mais alta ou mais baixa que a temperatura do corpo. Com isso, o calor flui entre o fluido e o corpo, causando uma alteração na densidade do fluido na área próxima à superfície. A diferença na densidade cria o fluxo descendente do fluido mais pesado e o fluxo ascendente do fluido mais leve”.

A convecção forçada é ditada pela distribuição de temperatura e pelo movimento do fluido, causado por uma diferença de pressão. Este tipo de convecção é mais comumente observado em aplicações industriais (BÖCKH; WETZEL, 2012).

A transferência de calor por convecção está ligada com o comportamento dos fluidos em repouso ou em movimento e de suas interações com outros fluidos ou sólidos ao redor. Uma forma de classificar o escoamento dos fluidos durante a convecção é observando se ele é liso e ordenado, chamado de laminar, ou altamente desordenado, normalmente em altas velocidades, conhecido como turbulento. O escoamento laminar geralmente ocorre em fluidos de alta viscosidade e baixas velocidades, enquanto o turbulento é o oposto. Conhecer o tipo de escoamento é importante para escolher corretamente o mecanismo que será utilizado para forçar a convecção (ÇENGEL; GHAJAR, 2011).

2.4. Trabalhos com efeito Peltier

Há alguns trabalhos publicados utilizando o efeito Peltier. Em 1998, Pascal-Delannoy e colaboradores fizeram um sensor de umidade usando um sinal óptico de um fotodetector de taxa pulsada, que identificava a condensação da água no lado frio de uma pastilha Peltier. Assim que o sensor capturava uma gota de água, ele desligava e um pulso reverso era aplicado para que a temperatura se tornasse ambiente novamente. O tempo de resposta era então anotado.

Astrain e colaboradores (2005) desenvolveram um modelo computacional para refrigeradores baseado na aplicação do efeito Peltier. Ele simulava o

desempenho elétrico e térmico de refrigeradores termoelétricos. O modelo resolvia o sistema não-linear de equações termoelétricas e de condução de calor, fornecendo valores de temperatura, consumo elétrico, fluxo de calor e o coeficiente de performance do refrigerador. Para resolver o sistema, era utilizado o método das diferenças finitas e expressões semi-empíricas para coeficientes de convecção.

Moreira e colaboradores (2014) tentaram construir um condicionador de ar por efeito Peltier. Foram utilizadas quatro pastilhas Peltier, que entraram em superaquecimento e quebraram, não sendo possível condicionar o ambiente.

Sladeczek (2018) desenvolveu um aparelho para aplicações médicas, como tratamento de inchaços ou inflamações para reduzir o inchaço e a dor, com uma pastilha Peltier. A base do aparelho continha um tanque de água fria, um resfriador de água com coolers, uma bomba de água a fonte de energia. O lado frio era conectado à cabeça de alumínio do aparelho e o lado quente ao resfriador de água. O sensor de temperatura era localizado na interface da superfície fria. O aparelho ainda tinha um sistema de controle que reduzia a intensidade do resfriamento por modulação de largura de pulso quando chegava à temperatura desejada.

Dizaji e colaboradores (2019) fizeram uma análise da exergia para resfriadores de ar termoelétricos. Os efeitos de fluxo e parâmetros termodinâmicos, incluindo fluxo de ar, temperatura do ar na entrada, fluxo de água, temperatura da água na entrada, voltagem e corrente nas características exérgicas foram estudadas. Construiu-se um protótipo de resfriador de ar termoelétrico para analisar a performance exérgica que utilizava seis pastilhas Peltier. O lado frio das pastilhas estava em contato com um tubo retangular que tinha uma bomba soprando ar por uma extremidade. O lado quente das pastilhas estava conectado a um outro tubo retangular com uma bomba de água na extremidade oposta ao soprador de ar. Foi concluído que um incremento no fluxo de ar melhorava a performance exérgica.

Kadhim e colaboradores (2020) realizaram um estudo experimental de um coletor de água atmosférica usando efeito Peltier. O protótipo tinha uma pastilha Peltier ligada à energia solar. O lado frio da Peltier estava conectado a um cone de alumínio que era resfriado até a temperatura abaixo do ponto de orvalho do ar ambiente. As gotas de água geradas no cone escorriam até um recipiente que

recolhia a água condensada. Conectado ao lado quente da pastilha havia um tanque de alumínio com um cooler na extremidade de cima e uma corrente de ar frio passava no tanque. Todo o sistema ficava dentro de um duto de PVC para ser isolado. Concluiu-se que o sistema para coleta de água é adequado ao método utilizado.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Testes preliminares

A fim de conseguir um bom resfriamento em um ambiente, foram feitos vários testes preliminares, com diferentes quantidades de pastilhas Peltier, dissipadores e arranjos. As pastilhas Peltier utilizadas neste trabalho foram quadradas com 40 mm de lado, 127 pares de semicondutores p-n e corrente de 6 A. As pastilhas utilizadas tinham as especificações apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 3.1 – Especificações máximas das pastilhas Peltier. Fonte: HEBEI I.T. Co., 2021.

| Especificações máximas | Valores correspondentes |
|------------------------|-------------------------|
| Q_{MAX} (W) | 57 |
| ΔT_{MAX} (°C) | 75 |
| I_{MAX} (A) | 6,4 |
| V_{MAX} (V) | 16,4 |

Dois *coolers* de modelo P/N2123XSL foram instalados juntamente aos dissipadores e o sistema foi ligado em uma fonte LUXE-P-600-12 de 12 V e 50 A. As pastilhas Peltier ficavam na base dos dissipadores com pasta térmica branca da marca Implastec entre elas e os dissipadores de alumínio, sendo que a face quente das pastilhas estava em contato com um dissipador e a face fria com um outro. Um sensor de temperatura foi colocado no sistema em diferentes lugares.

Quanto ao ambiente a ser resfriado, foi utilizado um protótipo de isopor para sua representação. Foram testados em ambientes com diferentes áreas, mas todos continham o mesmo pé direito de 25 cm. Os dissipadores conectados à face fria das pastilhas Peltier ficaram em um tubo no interior da caixa de isopor com um cooler soprando nos dissipadores para que houvesse uma circulação do ar. O dissipador ligado à face quente ficava de fora do protótipo, conforme representado esquematicamente na Figura 3.1 e na Figura 3.2. O calor se

espalha por condução do lado frio da pastilha Peltier para um dissipador de alumínio e do lado quente da pastilha para um outro dissipador de alumínio e o ar é então circulado pelos *coolers*, criando uma convecção forçada do ar.

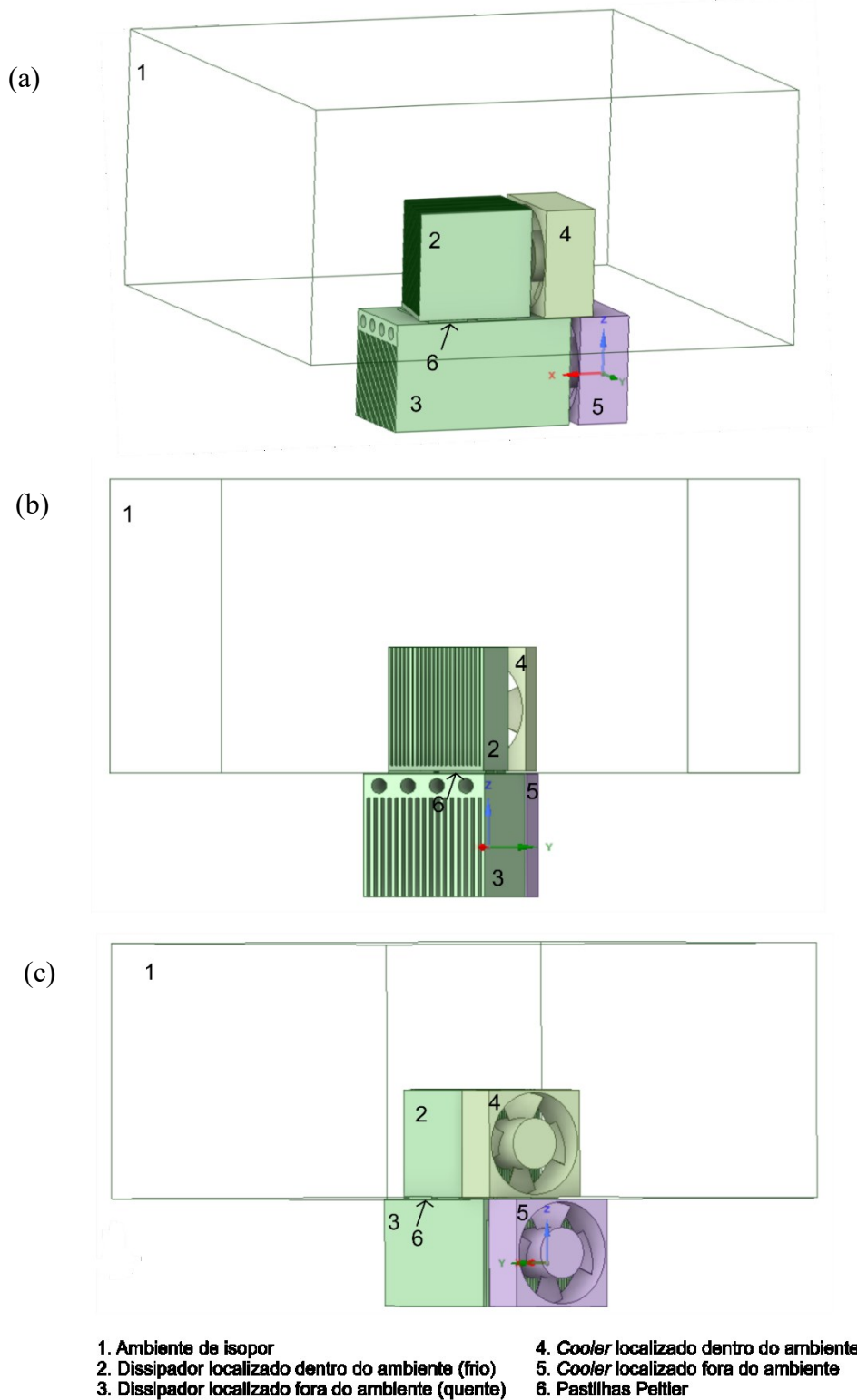
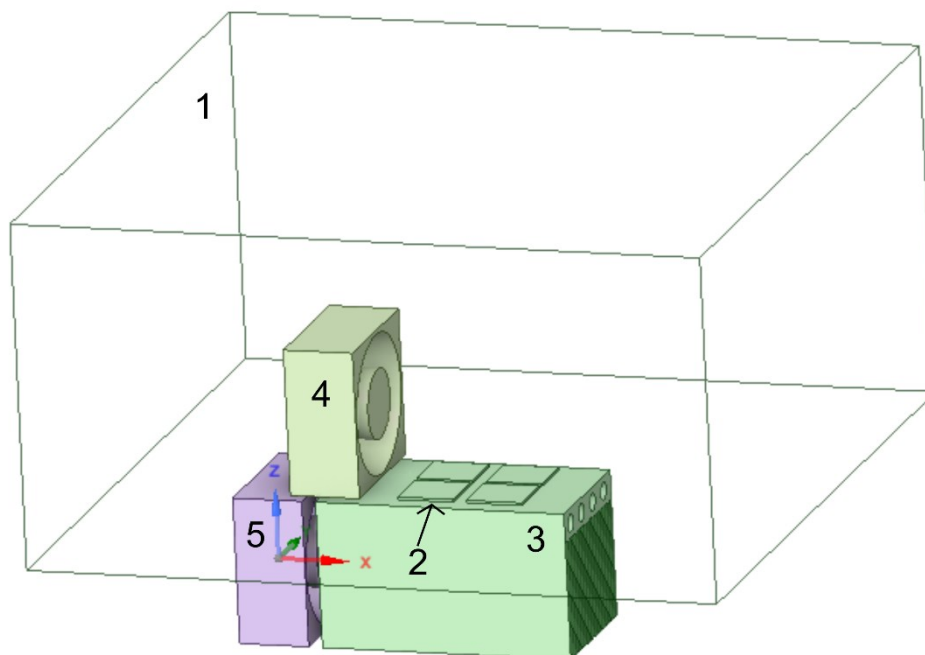


Figura 3.1 – Modelo esquemático dos testes de resfriamento de ambientes por efeito Peltier: (a) vista lateral, (b) frontal e (c) posterior.



- | | |
|--|---|
| 1. Ambiente de isopor | 4. Cooler localizado dentro do ambiente |
| 2. Pastilhas Peltier | 5. Cooler localizado fora do ambiente |
| 3. Dissipador localizado fora do ambiente (quente) | |

Figura 3.2 – Modelo esquemático dos testes de resfriamento de ambientes por efeito Peltier: vista lateral sem o dissipador no interior do ambiente para melhor visão das pastilhas Peltier.

O primeiro sistema testado utilizava quatro pastilhas Peltier, cujas faces quentes estavam em contato com um dissipador que continha canais de circulação em sua base, representado na Figura 3.3. Nesse primeiro teste, os canais estavam apenas com o ar ambiente circulando neles. As faces frias foram colocadas em quatro dissipadores de alumínio menores, sendo uma pastilha Peltier em contato com um dissipador. Cada dissipador desse tinha uma base de 0,6 cm de altura, 6,5 cm de largura e 5,6 cm de comprimento e aletas com 7 cm de altura e 0,5 mm de espessura. Um cooler estava soprando nos dissipadores ligados às faces frias e o outro no dissipador em contato com as faces quentes. O sensor de temperatura foi colocado próximo ao dissipador mais distante do cooler dentro do tubo na caixa de isopor.

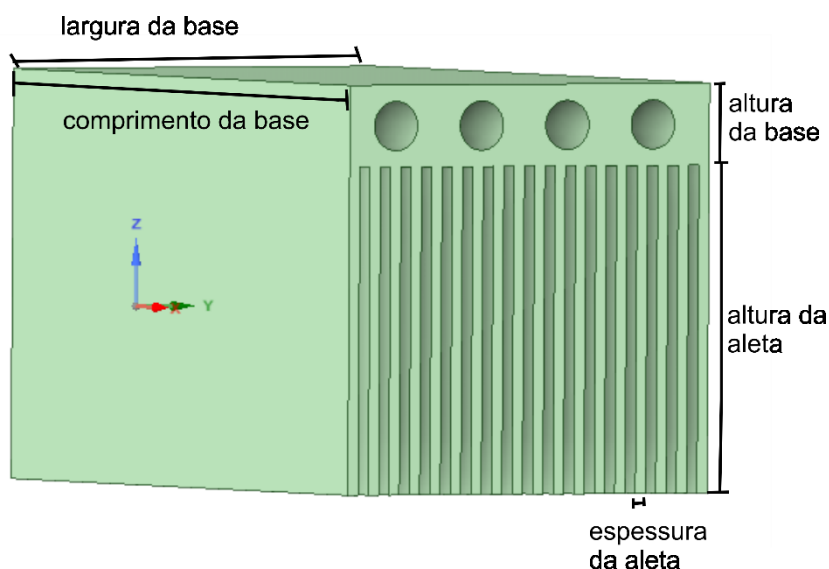


Figura 3.3 – Desenho esquemático do dissipador com canais em sua base e as denominações de largura, comprimento e altura da base e altura e espessura das aletas.

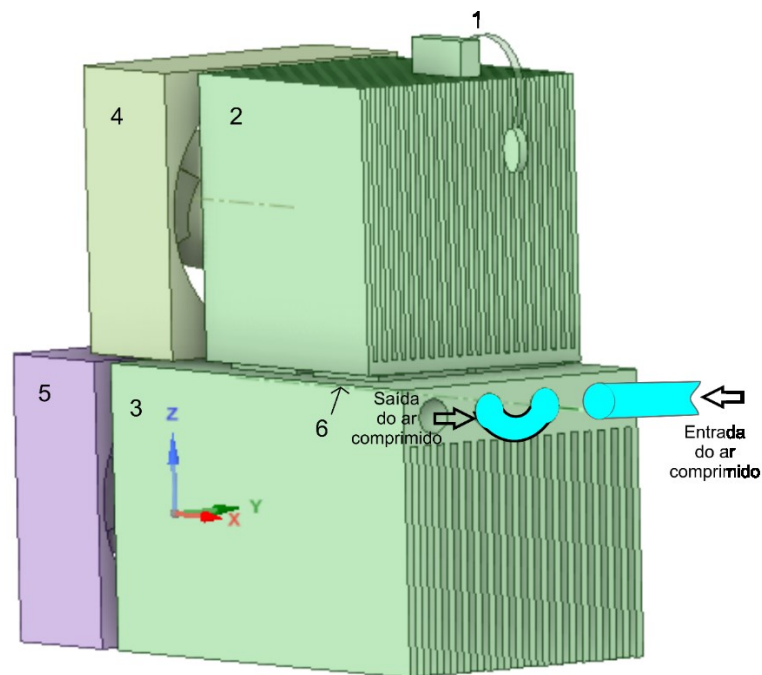
Conforme será apresentado na próxima seção, o primeiro teste não apresentou resultados satisfatórios. Portanto, o dissipador do lado quente das pastilhas Peltier foi mudado para uma versão também de alumínio, porém sem os canais de circulação na base. Ele tinha uma base de 15 cm comprimento e de largura e 1,7 cm de altura e aletas triangulares de 5 mm de espessura superior, 2 mm de espessura inferior e 5,7 cm de altura. O sensor de temperatura foi colocado no mesmo lugar do primeiro sistema.

Como os resultados ainda não foram satisfatórios, trocaram-se os quatro dissipadores ligados às faces frias das pastilhas Peltier para um outro dissipador, mostrado na Figura 3.4, mas neste só seria possível utilizar duas placas. Este novo dissipador de alumínio tinha uma base com 7,6 cm de comprimento, 8,3 cm de largura e altura que variava de 0,8 cm nas extremidades até 1,4 cm no centro e aletas triangulares de 1,5 mm de espessura superior, 1 mm de espessura inferior e altura que variava de 4,3 cm nas extremidades do dissipador a 3,7 cm no centro. O dissipador conectado às faces quentes foi trocado pelo mesmo utilizado no primeiro sistema, porém agora circulando ar comprimido no interior do canal. Com isso, houve a combinação dos transportes de calor por condução da pastilha até o dissipador de alumínio e por convecção no fluido. O sensor de temperatura continuou sendo colocado no mesmo lugar. Outra

mudança foi que os testes passaram a ser feitos sem a caixa de isopor, apenas para verificar se estava ocorrendo um resfriamento do ar no lado conectado às faces frias das pastilhas Peltier. O novo sistema é mostrado na Figura 3.5.



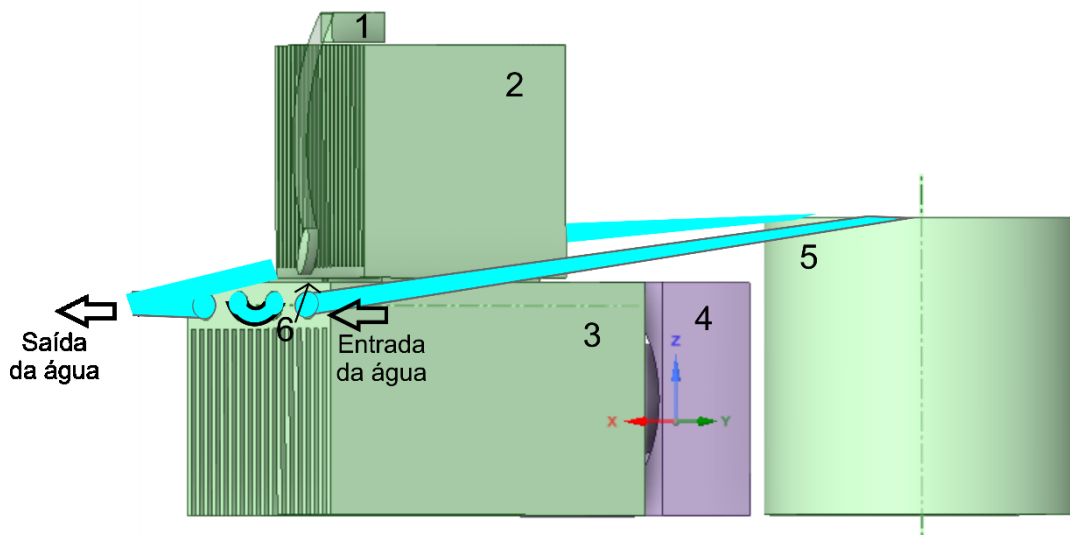
Figura 3.4 – Dissipador utilizado no terceiro sistema montado, conectado às faces frias das pastilhas Peltier.



1. Termopar
2. Dissipador conectado ao lado frio das pastilhas Peltier
3. Dissipador conectado ao lado quente das pastilhas Peltier
4. Cooler próximo ao dissipador frio
5. Cooler localizado fora do ambiente
6. Pastilhas Peltier

Figura 3.5 – Terceiro sistema de testes de forma esquemática: com ar comprimido circulando no canal do dissipador quente.

Ainda atingindo resultados insatisfatórios, mudou-se o ar comprimido que estava circulando no canal do dissipador ligado às faces quentes das pastilhas Peltier para água. Uma bomba de modelo XF-0242-9 com vazão de 4,0 L/min foi conectada ao sistema e fazia circular água de um recipiente com um volume de água de aproximadamente 10 L para o canal do dissipador, e deste de volta ao recipiente. Além disso, colocou-se manta térmica no dissipador do lado frio, tentando isolá-lo o máximo possível. Também se retirou o *cooler* que estava soprando no dissipador ligado às faces frias das pastilhas, já que ele estava circulando apenas ar em temperatura ambiente para o dissipador. O sensor de temperatura agora foi colocado encostado à base do dissipador frio. O sistema é representado na Figura 3.6.



1. Termopar
2. Dissipador conectado ao lado frio das pastilhas Peltier
3. Dissipador conectado ao lado quente das pastilhas Peltier
4. Cooler próximo ao dissipador quente
5. Recipiente com água
6. Pastilhas Peltier

Figura 3.6 – Sistema com água circulando no canal do dissipador quente.

Tendo alcançado bons resultados no último sistema de testes e para avaliar o efeito no ambiente, o *cooler* com o tubo e a caixa de isopor foram colocados novamente no sistema e o sensor de temperatura estava no lado do dissipador frio oposto ao *cooler*. Dois testes foram realizados: o primeiro com duas pastilhas Peltier e o segundo com uma pastilha. As fotos da unidade experimental estão no Apêndice A.

3.2. Dimensionamento de um novo dissipador

Para fazer testes com mais pastilhas, foi necessário a fabricação de um dissipador para ser utilizado no lado frio das pastilhas Peltier. Para dimensionar o dissipador, foi calculado o coeficiente convectivo do sistema, h , pela Equação 3.1 (UNIVASF, 2006):

$$h = \frac{Nu \cdot k}{W} \quad (3.1)$$

Em que Nu é o adimensional de Nusselt, k é a condutividade térmica do ar e W é o comprimento de cada aleta do dissipador. W foi estimado como 0,085 m, já que cada pastilha Peltier tem 0,04 m de comprimento e o dissipador foi estimado para utilizar quatro pastilhas dispostas duas a duas e é preciso um espaço para que o devido isolamento seja feito. A condutividade térmica do ar assume um valor de 0,03 W/(m.K) e Nu foi calculado pela Equação 3.2 (UNIVASF, 2006):

$$Nu = 0,664Re^{1/2}Pr^{1/2} \quad (3.2)$$

Em que Pr é o adimensional de Prandtl, que para o ar em temperatura ambiente assume um valor de 0,70, e Re é o adimensional de Reynolds, calculado pela Equação 3.3 (UNIVASF, 2006):

$$Re = \frac{v_{\infty}W}{\nu} \quad (3.3)$$

Em que v_{∞} foi medido com a ajuda de um anemômetro durante os testes preliminares, que encontrou o valor de 4,12 m/s, e ν é viscosidade cinemática do ar, que é igual a $1,6 \cdot 10^{-5}$ m²/s. Com isso, o valor de h encontrado foi de 29,00 W/(m².K).

Sabendo o valor do coeficiente convectivo, foi possível encontrar a altura, L , de cada aleta para que esta chegasse próximo ao limite máximo da melhora da transferência de calor com base no conceito de aleta infinita (INCROPERA et al., 2008):

$$L = \frac{2,3}{\sqrt{\frac{hp}{kAc}}} \quad (3.4)$$

Em que p é o perímetro da aleta, que corresponde à soma de duas vezes o comprimento da aleta e duas vezes a espessura, esta considerada 0,002 m, k é a condutividade térmica do material da aleta – alumínio, 237 W/(m.K) – e A_c é a área da seção reta da aleta, correspondente à multiplicação do comprimento pela espessura dela. Com isso, foi encontrado um valor de L de 0,21 m. Como é um valor bem alto, principalmente considerando que o pé direito do sistema tem 0,25 m, foi determinado que uma altura com metade do tamanho encontrado atenderia ao sistema, já que o fluxo de calor do sistema seria de 21,93 W/m². Portanto, a representação esquemática do dissipador, desenhado no programa SpaceClaim 2021 R1 da Ansys, pode ser visto na Figura 3.7:

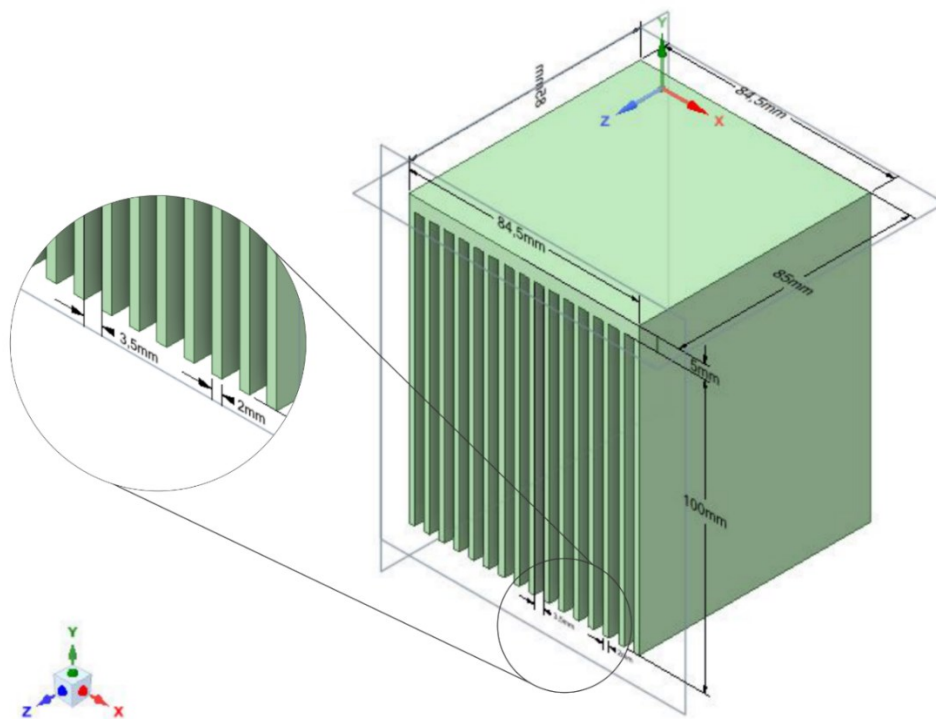


Figura 3.7 – Representação esquemática do dissipador utilizado no lado frio das pastilhas Peltier.

3.3. Planejamento experimental

A fim de analisar se o sistema seria usual, foi feita uma comparação com o sistema de resfriamento ciclônico-psicrométrico de Dias (2020). Para isso, utilizaram-se os valores de área proporcionais às testadas por Dias (2020) e a mesma potência de dissipação. Os valores de área considerados foram um décimo das áreas resfriadas por ciclones.

Portanto, foi feito um planejamento composto central (PCC) considerando duas variáveis independentes, potência e área do ambiente de teste, e quatro réplicas no ponto central, utilizando-se um parâmetro alfa (α) de ortogonalidade de 1,21, calculado através da Equação 3.5:

$$\alpha = \left\{ \frac{2^2 \left[(2^2 + 4 + 4)^{1/2} - 2^{2^{1/2}} \right]}{4} \right\}^{1/4} = 1,21 \quad (3.5)$$

Os valores de mínimo e máximo para área e potência foram os comparativos do trabalho de Dias (2020), cujas equações de codificação são:

$$x_1 = \frac{(P-310)}{20} \quad (3.6)$$

$$x_2 = \frac{(S-1,25)}{0,375} \quad (3.7)$$

Isto posto, a matriz de planejamento para este estudo é apresentada na Tabela 3.2. Após realizados os testes do planejamento apresentado, um novo planejamento de experimentos foi realizado, já que se verificou pelos resultados obtidos que as áreas poderiam ser redimensionadas para um melhor resfriamento. No novo planejamento do tipo 3^2 (Tabela 3.3), a menor área (0,80 m²) se tornou a maior área e foram estabelecidos mais dois valores: 0,50 m² e 0,20 m². Quanto à potência, o maior valor era o mesmo do planejamento anterior (334,2 W) e o ponto médio (310 W) passou a ser a menor potência, sendo que a nova potência acrescentada é a média aritmética desses dois valores (322,1 W). As equações de codificação são as mesmas 3.6 e 3.7.

Tabela 3.2 – Matriz de planejamento para o resfriamento por placas Peltier.

| n | P (W) | S (m ²) |
|----|---------------------|---------------------|
| 1 | 290 (-1) | 0,875 (-1) |
| 2 | 330 (+1) | 0,875 (-1) |
| 3 | 290 (-1) | 1,625 (+1) |
| 4 | 330 (+1) | 1,625 (+1) |
| 5 | 310 (0) | 1,25 (0) |
| 6 | 310 (0) | 1,25 (0) |
| 7 | 310 (0) | 1,25 (0) |
| 8 | 310 (0) | 1,25 (0) |
| 9 | 285,8 (- α) | 1,25 (0) |
| 10 | 334,2 (+ α) | 1,25 (0) |
| 11 | 310 (0) | 0,80 (- α) |
| 12 | 310 (0) | 1,70 (+ α) |

Tabela 3.3 – Segunda matriz de planejamento dos testes experimentais.

| n | P (W) | S (m ²) |
|---|------------|---------------------|
| 1 | 310,0 (-1) | 0,80 (+1) |
| 2 | 322,1 (0) | 0,80 (+1) |
| 3 | 334,2 (+1) | 0,80 (+1) |
| 4 | 310,0 (-1) | 0,50 (0) |
| 5 | 322,1 (0) | 0,50 (0) |
| 6 | 334,2 (+1) | 0,50 (0) |
| 7 | 310,0 (-1) | 0,20 (-1) |
| 8 | 322,1 (0) | 0,20 (-1) |
| 9 | 334,2 (+1) | 0,20 (-1) |

Todos os testes de resfriamento (Tabelas 3.2 e 3.3) foram realizados com a água como fluido de circulação no dissipador em contato com o lado quente das pastilhas Peltier. A água circulada era trocada a cada 20 min. Os testes tinham 120 min de duração, sendo que a temperatura era anotada, nos primeiros 20 min, de 2 em 2 min, e nos últimos 100 min, a cada 5 min. O ambiente de isopor foi construído com folhas de isopor de área 50 cm por 100 cm, com uma

espessura de 25 mm. As folhas foram coladas com cola quente e, nas suas junções, foi colado ainda uma tira de papel E.V.A para evitar que ocorresse troca de temperatura do ar no interior do ambiente com o ar exterior. Foram utilizados cinco termopares para medir a temperatura em diferentes lugares do ambiente, como mostrado na Figura 3.8.

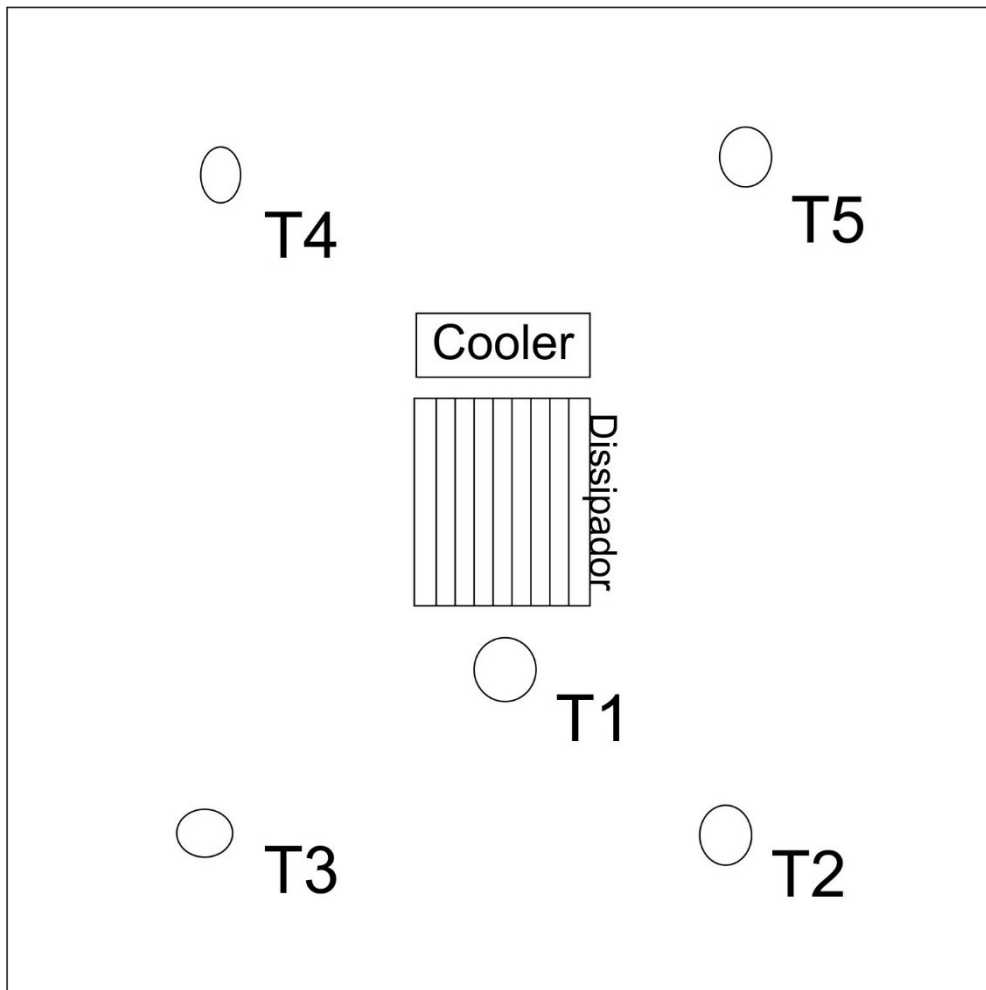


Figura 3.8 – Desenho esquemático das localidades dos termopares dentro do ambiente (vista superior).

Para mudar o tamanho do ambiente, os testes foram feitos da maior área para a menor, sendo que a cada alteração nesta, as paredes eram movidas até o local necessário para se obter a nova área, como representado na Figura 3.9.

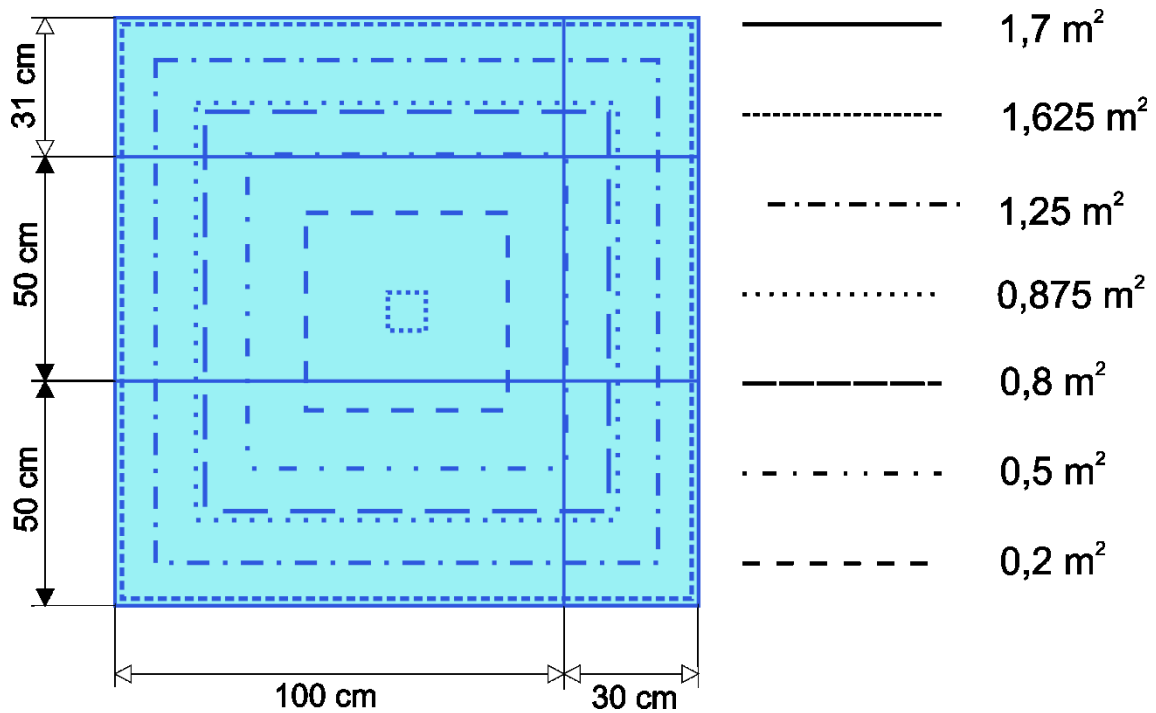


Figura 3.9 – Representação esquemática de como a mudança das áreas no ambiente de testes foi feita.

Já a potência, era alterada na fonte com o auxílio de uma chave de fenda, já que a fonte utilizada permitia o aumento ou diminuição da voltagem utilizada. Com a ajuda de um multímetro digital, media-se a voltagem. A corrente no sistema era fixa de 24 A. Utilizando a Equação 3.8, pode-se obter a voltagem a ser regulada na fonte, dividindo a potência desejada pela corrente.

$$P = VI \quad (3.8)$$

Em que P é a potência em watts, V é a voltagem em volts e I é a corrente em ampères.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados dos testes preliminares

No primeiro teste realizado, com um dissipador de alumínio com canais de circulação em sua base junto ao lado quente e quatro dissipadores menores junto ao lado frio das pastilhas Peltier, a temperatura ambiente antes do início do experimento era de 33,5°C. Observando os novos valores de temperatura a cada 2 min, notou-se que a temperatura mínima alcançada foi de 28,4°C depois de 6 min com o sistema ligado. Após esse tempo, a temperatura voltou a subir, alcançando a temperatura ambiente após 30 min de teste e se mantendo neste valor até o momento em que o sistema foi desligado, 60 min após o início. Com isso, concluiu-se que o sistema era ineficaz e o principal motivo seria a presença de canais no dissipador conectado ao lado quente das pastilhas Peltier. Com a circulação do ar e devido ao fato de o dissipador ter uma condutividade térmica bem abaixo da condutividade do alumínio, material de fabricação do dissipador, isso teria influenciado na condução de calor para fora do ambiente, dificultando o resfriamento no interior do ambiente.

No segundo teste, trocou-se o dissipador com os canais de circulação por um dissipador maior com a base sólida. Mesmo com a troca de dissipadores, este estava esquentando muito, não conseguindo dissipar o calor necessário, ocorrendo o mesmo problema que no primeiro sistema: a temperatura decaiu de 32,6°C para 27,7°C e depois voltou a subir até se estabilizar na temperatura inicial. Com isso, percebeu-se que a dissipação de calor no lado quente ainda não estava eficiente. Além disso, notou-se que os quatro dissipadores utilizados nas faces frias também não estavam esfriando, mesmo que as placas tenham sido testadas antes.

Portanto, no terceiro teste, voltou-se com o dissipador com os canais de circulação junto ao lado quente das pastilhas Peltier, porém agora circulando ar comprimido nos canais. Os quatro dissipadores também foram substituídos por um único. A temperatura ambiente no dia dos testes era de 26,2°C e a temperatura mínima alcançada com esse sistema foi de 24,3°C. Mesmo que seja mais baixa que nos testes dos outros sistemas, foi considerado que a

temperatura ambiente no dia também estava mais baixa, portanto, o sistema ainda não atingiu uma temperatura mínima satisfatória.

Então, com a troca do ar comprimido que circulava nos canais do dissipador junto ao lado quente das pastilhas para água, a temperatura ambiente que era de 32,2°C caiu para a temperatura mínima de 14,8°C, alcançada após deixar o sistema ligado por 20 min. Portanto, concluiu-se que circulando água no canal do dissipador ligado às faces quentes das pastilhas Peltier seria a melhor maneira de resfriar o ambiente.

Os últimos testes preliminares realizados com o sistema circulando água colocado dentro do ambiente de isopor, mostraram que, com duas pastilhas Peltier ligadas ao sistema, a temperatura se alterou de 30,7°C para 22,2°C em 10 min, voltando a subir para 25,2°C em 85 min, patamar em que se estabilizou até que o sistema foi desligado, após 120 min de teste. Com apenas uma pastilha Peltier ligada, a temperatura foi de 29,8°C para 26,8°C em 8 min e depois voltou a subir até alcançar a temperatura de 29,3°C após 65 min de teste, se estabilizando até 95 min, quando voltou a subir até atingir a temperatura inicial até o final dos 120 min. Na Figura 4.1 mostra-se o gráfico que representa o comportamento do sistema com uma e duas pastilhas Peltier ligadas.

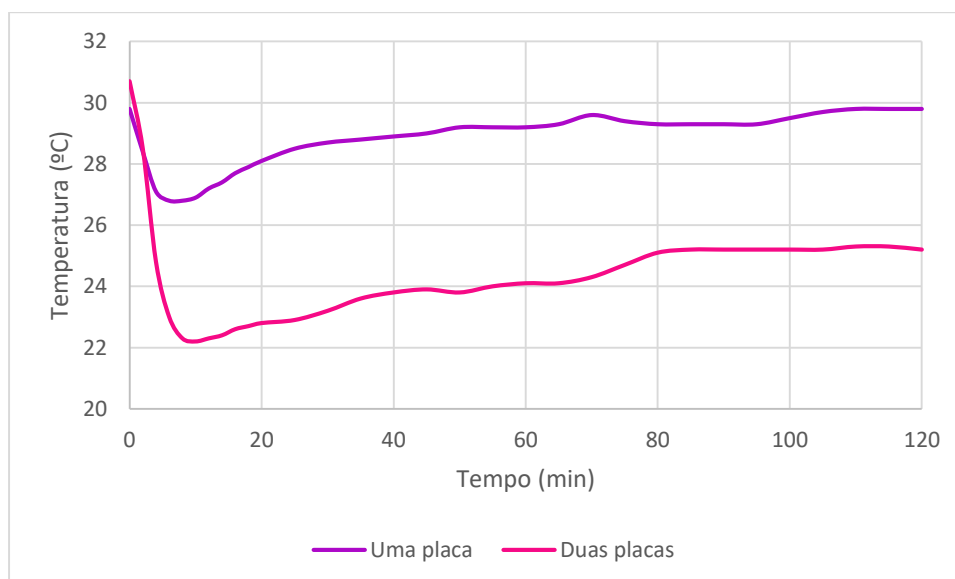


Figura 4.1 – Comparação do comportamento do sistema com uma e duas pastilhas Peltier.

É possível concluir através do gráfico que o comportamento da temperatura é o mesmo independentemente da quantidade de pastilhas ligadas ao sistema, mas quanto mais pastilhas, menor a temperatura alcançada. Considerando a diferença de temperatura do momento em que os testes atingiram a temperatura mínima e do início do teste para duas pastilhas foi 8,5°C e para uma pastilha 3,0°C, tem-se uma razão de 2,83 com o aumento de apenas uma pastilha. Ao fazer a razão para 100 min de teste, a razão é de 11,47.

4.2. Escolha do fluido de circulação

Nos testes preliminares, dois fluidos foram avaliados para circularem no interior dos canais do dissipador disposto em contato com o lado quente de duas pastilhas Peltier: ar comprimido e água, ambos à temperatura ambiente. O fluido circulou seguindo o caminho ilustrado na Figura 4.2. A temperatura foi medida por um termômetro localizado na base do dissipador que estava em contato com o lado frio das pastilhas. Os resultados são mostrados na Tabela 4.1.

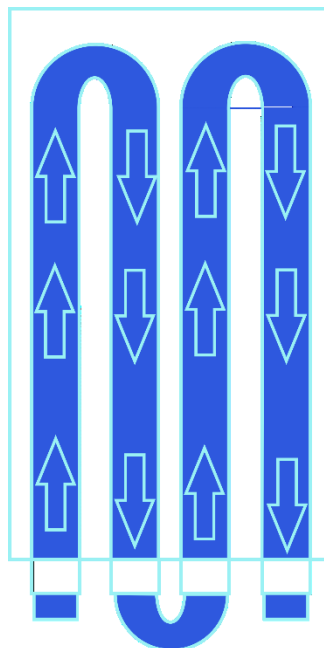


Figura 4.2 – Representação esquemática da visão interna da base do dissipador em contato com o lado quente das pastilhas Peltier.

Tabela 4.1 – Resultados dos testes preliminares em que se utilizavam ar comprimido e água como fluidos de circulação no dissipador com canais em sua base.

| Fluido | T_{amb} (°C) | T (°C) | ΔT (°C) |
|---------------|----------------|--------|-----------------|
| Ar comprimido | 25,4 | 24,3 | 0,9 |
| Água | 29 | 21,8 | 7,2 |

Na Tabela 4.1, T_{amb} simboliza a temperatura no início dos testes, T é a temperatura na base do dissipador do lado frio após os 20 minutos de teste e ΔT , a diferença entre elas. Nota-se que a água apresenta uma maior diferença de temperaturas, o que se justifica pelo fato de a água possuir um coeficiente convectivo de transferência de calor maior que o ar, sendo, então, o fluido adotado em todos os testes.

4.3. Localização dos termômetros nos ambientes de teste

Dos cinco termopares dispostos no interior dos ambientes do teste como ilustrado na Figura 3.8, o T1 era sempre o que apresentava menor temperatura, já que estava bem próximo à saída do ar frio do dissipador, e o T5 era o de maior temperatura, por estar mais próximo ao cooler. Isto pode ser verificado pela Figura 4.3, que apresenta a média das temperaturas de cada termopar nos testes do segundo planejamento.

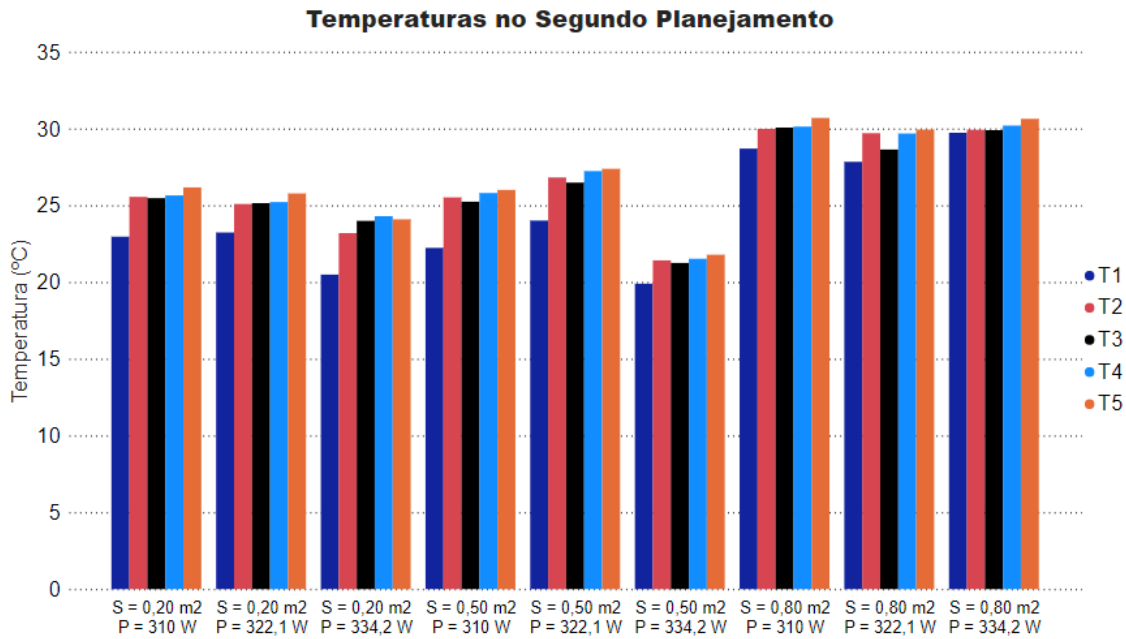


Figura 4.3 – Temperaturas em cada termopar

4.4. Testes do Planejamento Composto Central (PCC)

Em todos os testes, o ΔT foi calculado considerando a temperatura ambiente ao final dos 120 min menos a média aritmética das temperaturas nos cinco termômetros.

Na Figura 4.4, é mostrado como a diferença de temperatura variou ao longo do tempo na maior área, 1,70 m² (+ α) e nível central de potência (310 W).

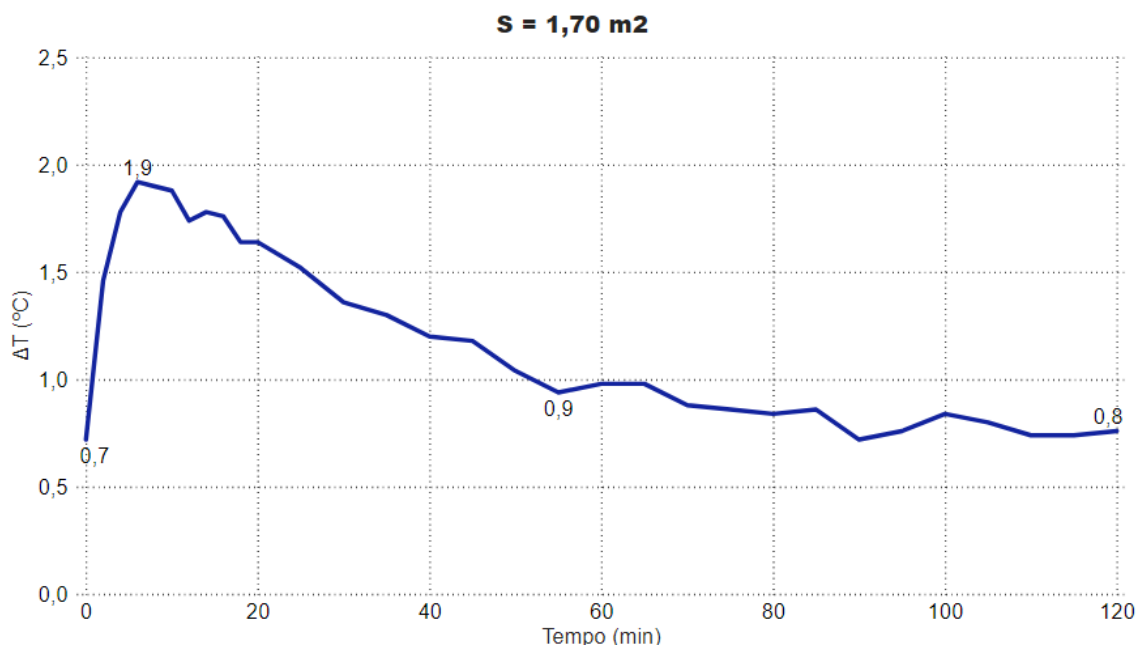


Figura 4.4 – Teste do PCC com área de 1,70 m² e potência de 310 W.

Para essa potência e área, verifica-se que a maior diferença de temperatura ocorreu com 6 minutos de teste, atingindo um valor de 1,9 °C.

Para a área de 1,625 m² e potências de 290 e 330 W (experimentos de números 3 e 4 da matriz de planejamento), os resultados encontram-se na Figura 4.5.

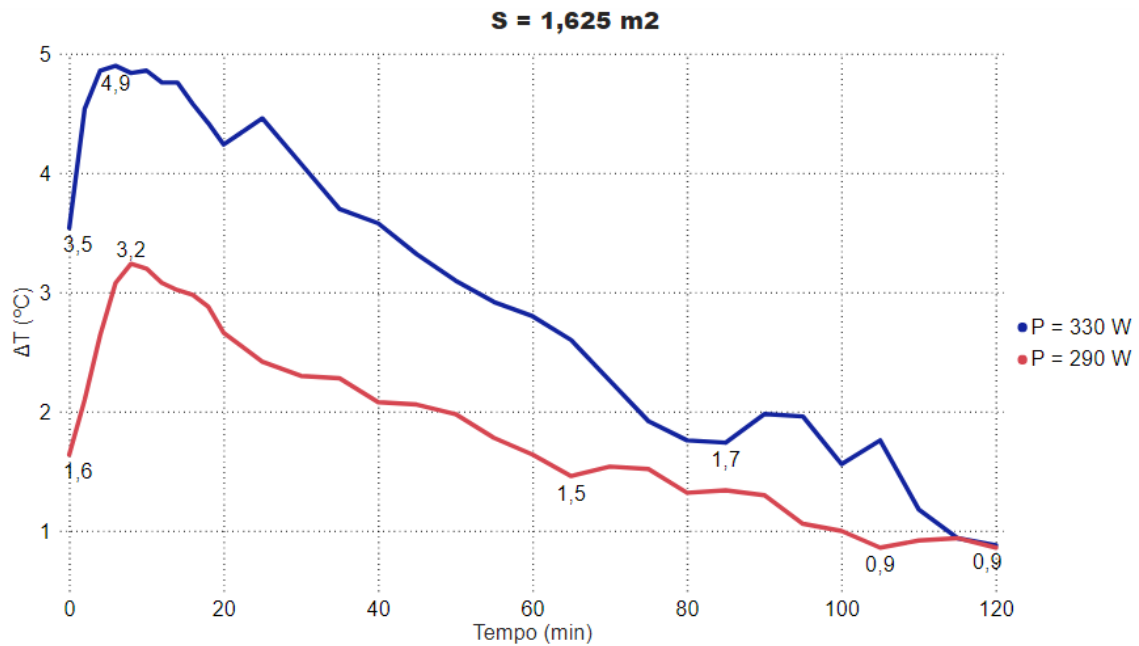


Figura 4.5 – Testes do PCC com área de 1,625 m².

Nota-se que a maior potência (330 W) levou a um maior valor de ΔT em todo o tempo de teste, sendo o valor máximo alcançado de 4,9 °C com 6 minutos de teste na potência de 330 W e 3,2 °C com 8 minutos de teste na potência de 290 W. Apenas no final do teste, este valor igualou-se em ambas as potências.

A próxima área de teste foi de 1,25 m², com os resultados das réplicas no ponto central e valores extremos de potência mostrados na Figura 4.6.

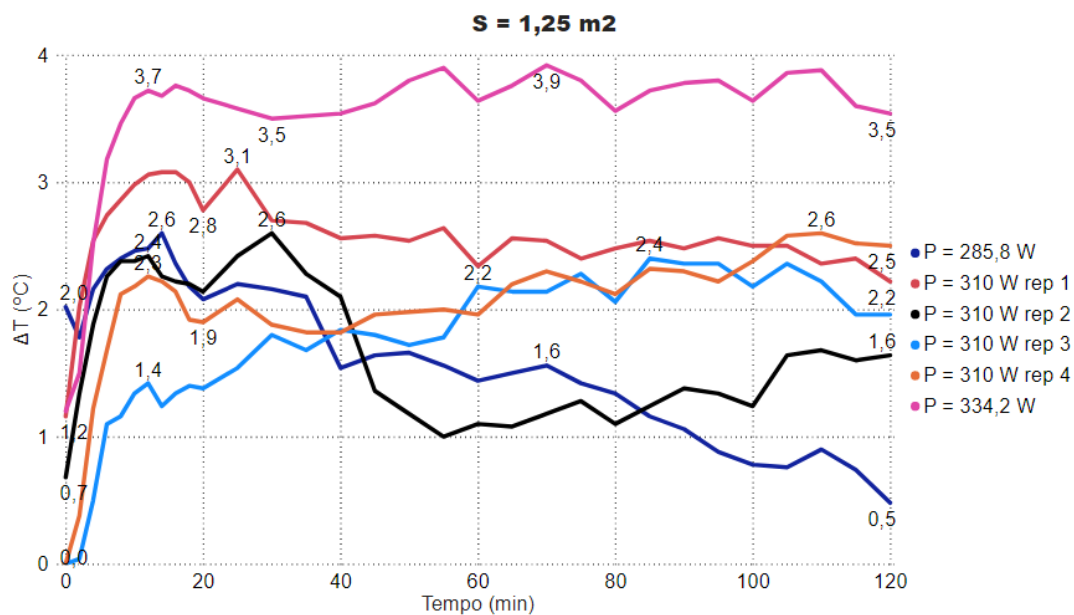


Figura 4.6 – Testes do PCC com área de 1,25 m².

A área de 1,25 m² era o ponto central, onde foram feitas quatro réplicas com o ponto central da potência e ainda, os testes com $\pm\alpha$ de ortogonalidade. Nestes testes, pode-se verificar novamente que a potência maior, de 334,2 W, representada pela linha magenta no gráfico, possui o maior ΔT , 3,9 °C, atingido após 70 min de teste. A menor potência, de 285,8 W, de linha azul escura no gráfico, apresenta o menor ΔT , 0,5 °C, ao final do teste.

Para a área de 0,875 m², os resultados encontram-se na Figura 4.7.

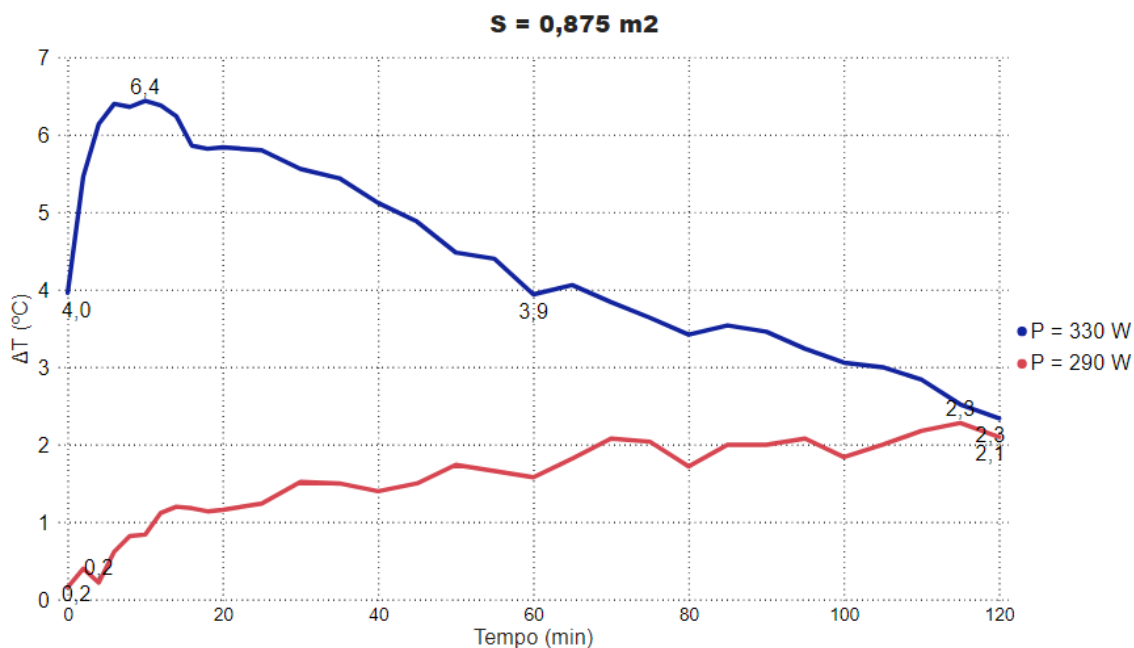


Figura 4.7 – Testes do PCC com área de 0,875 m².

Assim como nas outras áreas de teste, percebe-se que a menor potência (290 W) ocasionou ΔT menor que a maior potência (330 W) durante todo o tempo de teste. O máximo ΔT encontrado para a potência de 330 W foi de 6,4 °C após 10 min de teste, enquanto para a potência de 290 W foi de 2,3 °C após 115 min de teste.

A última área de teste, de 0,80 m², apresenta o resultado disposto na Figura 4.8.

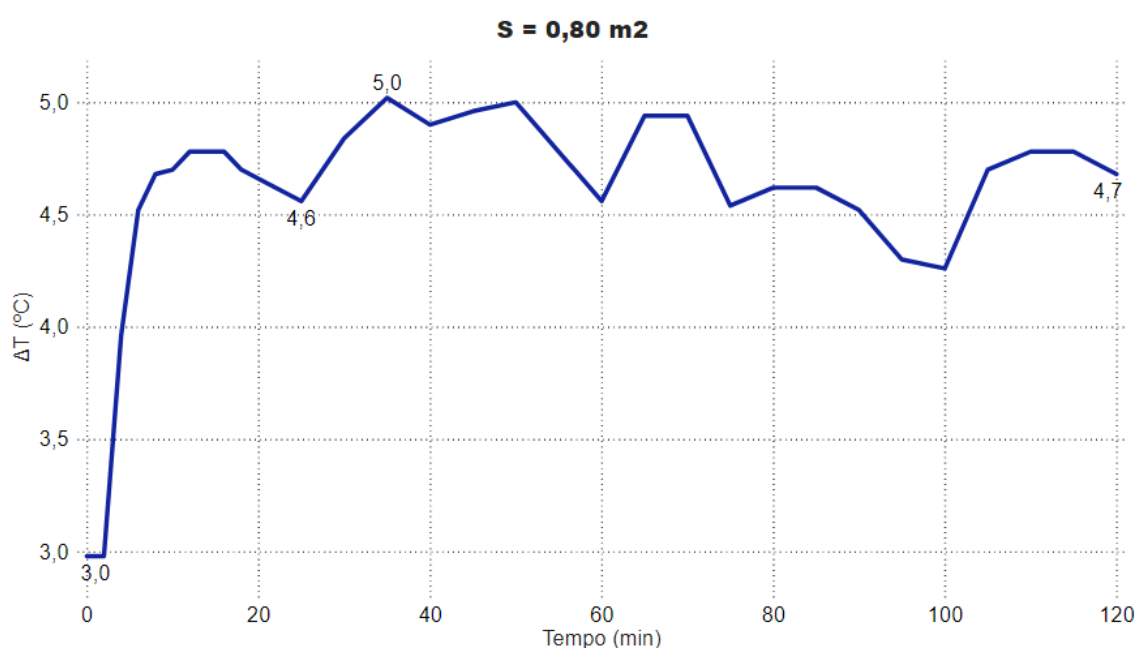


Figura 4.8 – Teste do PCC com área de 0,80 m² e potência de 310 W.

A potência utilizada nesse teste foi de 310 W e verifica-se que a maior diferença de temperatura ocorreu com 35 min de teste, atingindo um valor de 5,0 °C.

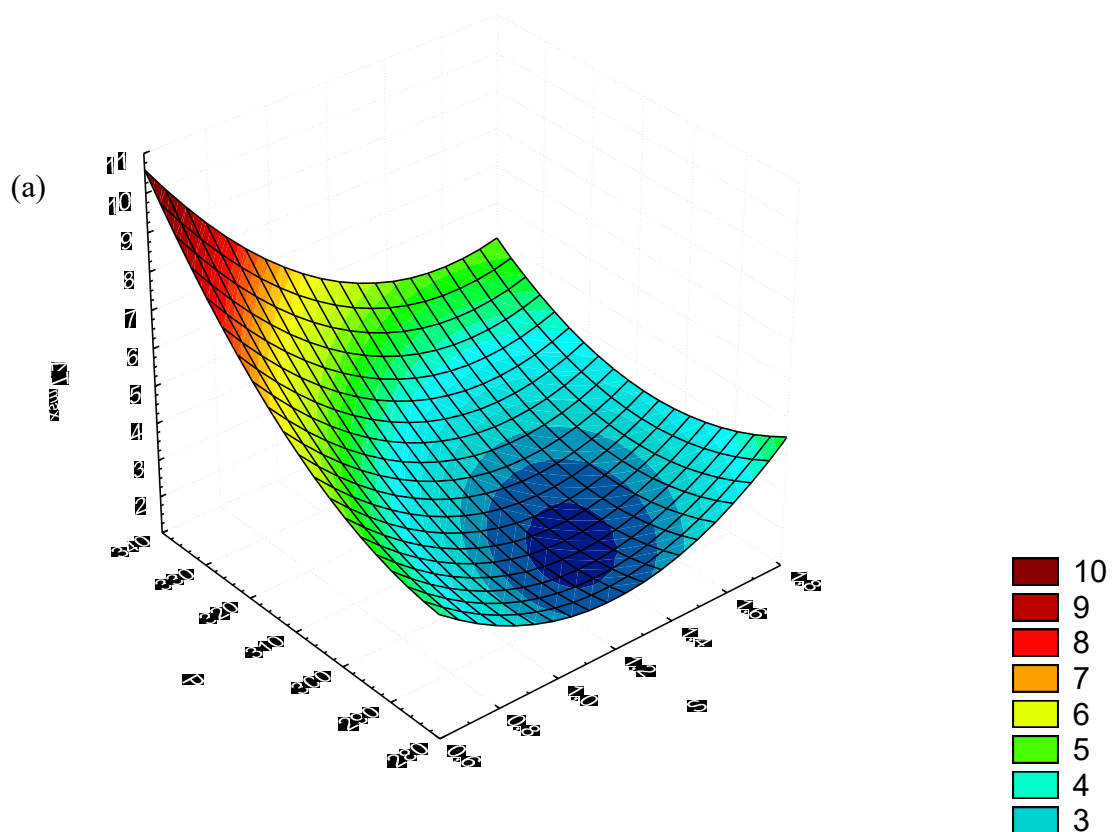
Nota-se, então, que todos os testes foram influenciados tanto pela potência, quanto pela área. Os testes em que as potências estavam configuradas nos valores maiores apresentaram maiores valores de ΔT que os testes com menores potências. Já para a área, o efeito é inverso: quanto menor a área de ambiente de testes, maior o ΔT observado.

Realizou-se uma regressão não-linear dos dados experimentais (Equação 4.1) no *software* Statistica 7, utilizando como resposta o valor máximo de ΔT em

cada teste (variável dependente) e as variáveis independentes sendo a potência (P) e a área da base dos ambientes de teste (S).

$$\Delta T = 2,6014 + 1,0642P + 0,6305P^2 - 0,6280S + 0,7671S^2 - 0,6PS \quad (4.1)$$

A regressão possui R^2 de 0,7898 e mostra que a variável potência foi a que mais influenciou na variação da temperatura. Nota-se, também, que o efeito da potência é diretamente proporcional ao ΔT , ou seja, este aumenta com o aumento da potência. Já a área dos ambientes tem um efeito inversamente proporcional a ele, ou seja, ΔT aumenta com a diminuição da área. O mesmo pode ser percebido também na Figura 4.9, que mostra a superfície de resposta. Na Figura 4.10, vê-se o gráfico dos valores observados versus os valores preditos, onde nota-se que os valores estão próximos da linha vermelha, indicando uma boa regressão.



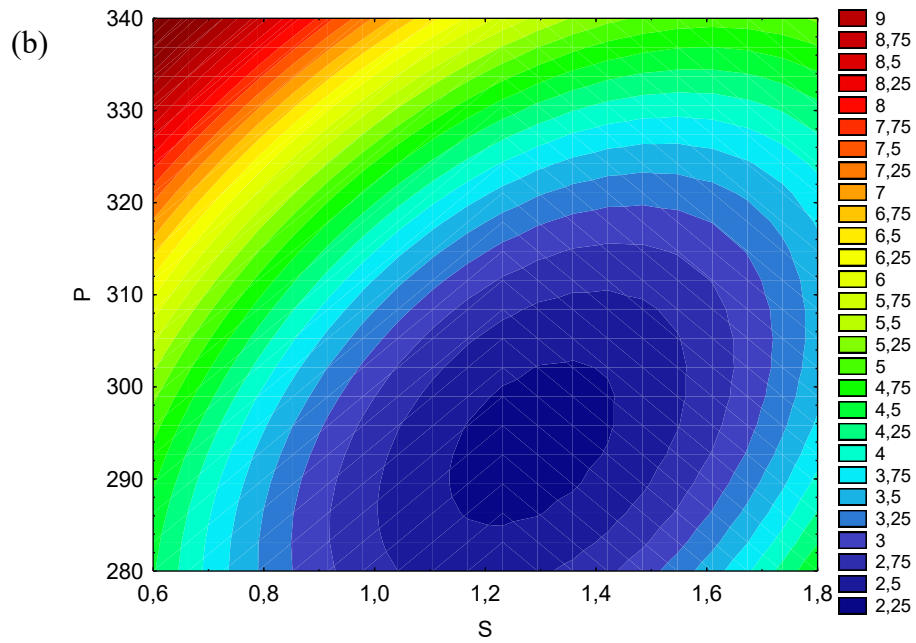


Figura 4.9 – (a) Superfície de respostas e (b) contorno em função do par P-S para os testes do Planejamento Composto Central (PCC).

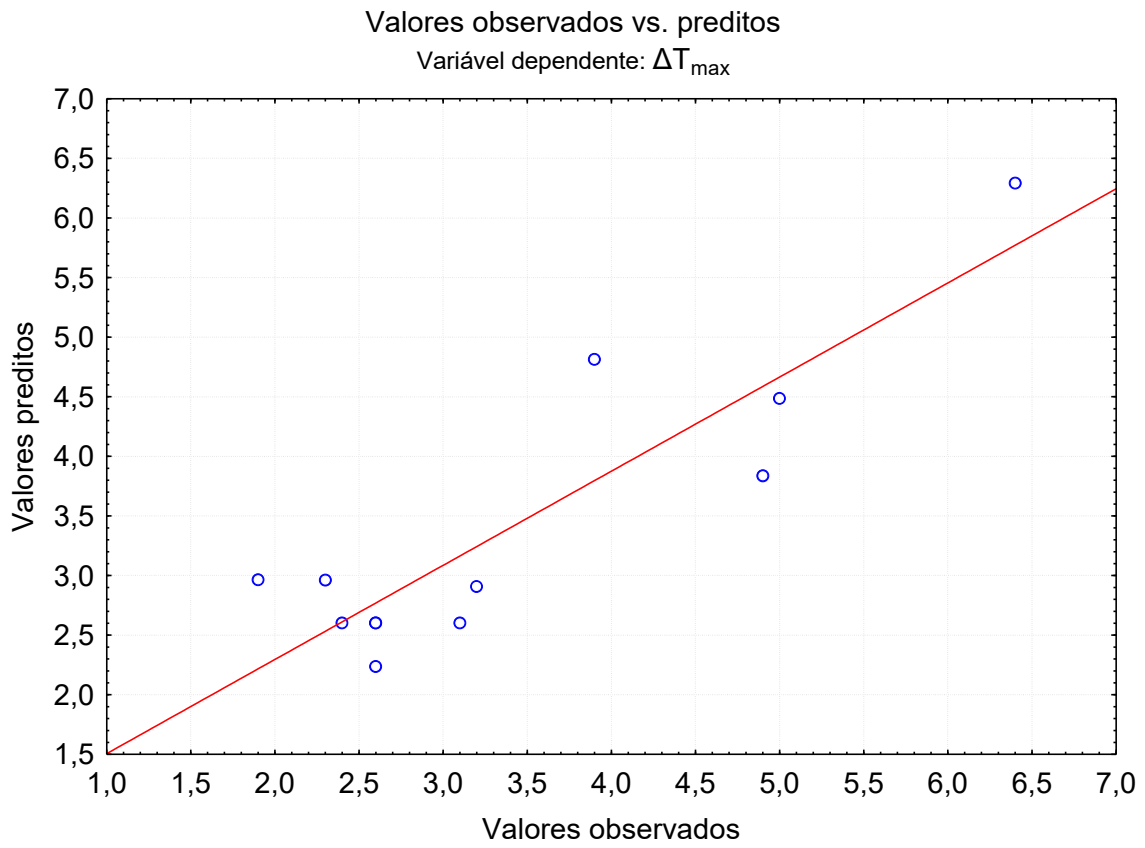


Figura 4.10 – Gráficos dos valores observados vs. preditos para o planejamento composto central.

4.5. Testes do segundo planejamento

Assim como nos testes do Planejamento Composto Central (PCC), nestes testes o ΔT também foi calculado considerando a temperatura ambiente ao final dos 120 min menos a média aritmética das temperaturas nos cinco termômetros.

Para a área de $0,80 \text{ m}^2$ (a maior do segundo planejamento), os resultados obtidos estão representados na Figura 4.11.

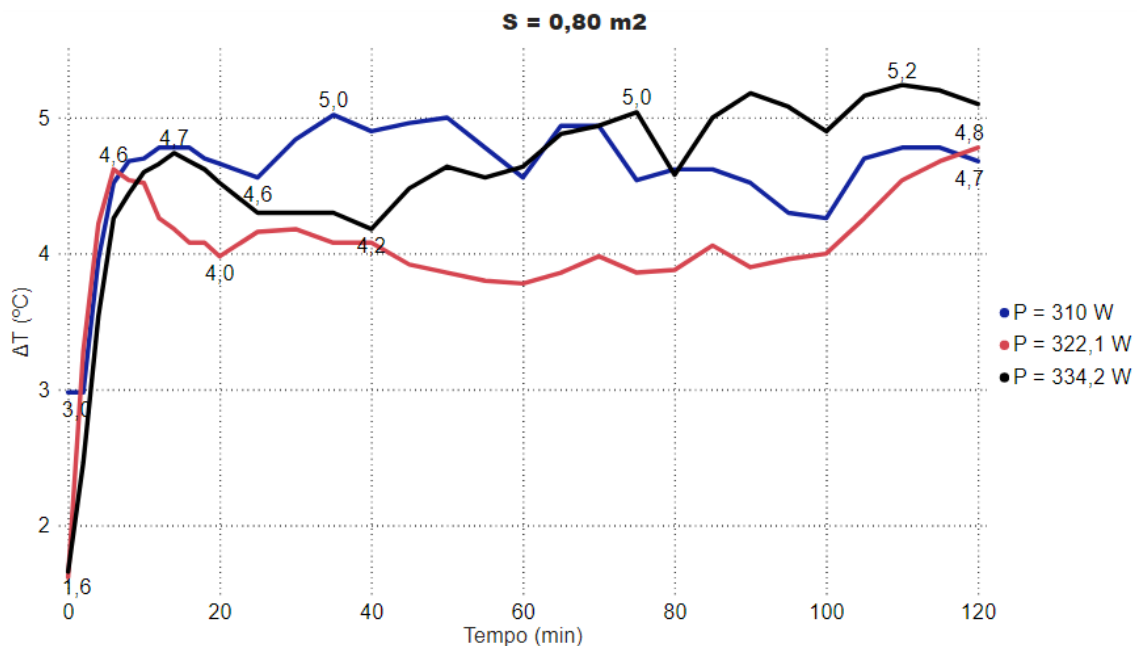


Figura 4.11 – Testes do segundo planejamento com área de $0,80 \text{ m}^2$.

Na maior área do segundo planejamento, nota-se um comportamento atípico, já que na menor potência utilizada nos testes, de 310 W , o ΔT foi maior na primeira metade do teste, sendo que, depois disso, a maior potência realmente passa a ter a maior diferença de temperatura, mas a potência de $322,1 \text{ W}$ só assume o valor maior que a menor potência no final do teste. Isso pode ter ocorrido porque no cálculo de ΔT é utilizado a temperatura ambiente final. Pode-se creditar a isto o fato de que os testes foram realizados em dias e horários diferentes, como mostrado no apêndice B e, no dia em que o teste de menor potência foi realizado, a temperatura ambiente variou muito durante as duas horas de teste; portanto, no início do teste, ele apresentou uma diferença de temperatura maior.

Os resultados do teste de área 0,50 m² são apresentados na Figura 4.12.

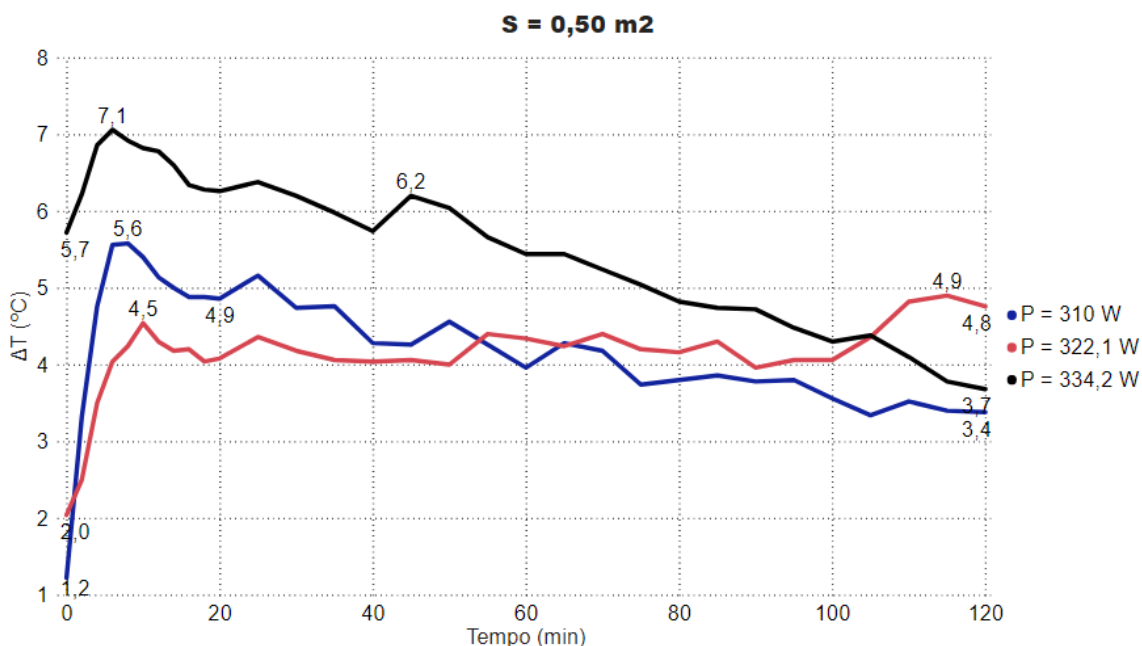


Figura 4.12 – Testes do segundo planejamento com área de 0,50 m².

Na área de 0,50 m², nota-se também que na menor potência utilizada nos testes, de 310 W, o ΔT foi maior que aquele para a potência de 322,1 W. Isso pode ter ocorrido pelo mesmo motivo dos testes com área de 0,80 m². Nota-se também que após o ΔT atingir o valor máximo nas potências de 334,2 W e 310 W (7,1 °C para 334,2 W e 5,6 °C para 310 W) e o valor próximo do máximo, 4,5 °C, na potência de 322,1 W, o ΔT começa a cair. Essa queda pode ser porque o *cooler* presente no interior do ambiente de testes dissipa calor, fazendo com que a temperatura suba um pouco. Essa influência do *cooler* é notada principalmente nos testes de ambientes com menores áreas. Outro comportamento atípico observado foi o aumento da diferença de temperatura na potência de 332,1 W após 100 minutos de teste, que começa a subir. Como ao longo do tempo de teste a temperatura ambiente varia, o que pode ter ocorrido foi que a temperatura ambiente diminuiu, favorecendo o resfriamento no interior do ambiente.

Por último, os testes de área 0,20 m² estão representados na Figura 4.13.

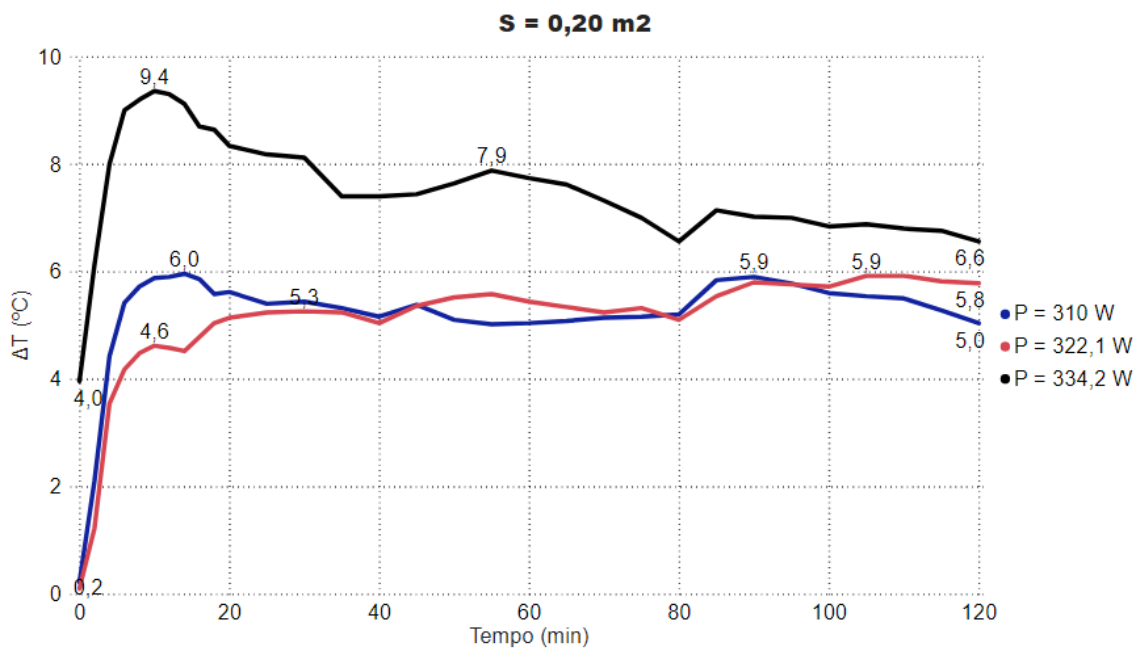


Figura 4.13 – Testes do segundo planejamento com área de 0,20 m².

Na última área, o mesmo comportamento ocorre. Pode-se concluir, portanto, que nas menores áreas, a potência influencia menos que quando se tem áreas maiores.

O impacto da alteração da área é nítido quando se observa um mesmo valor de potência nas três áreas diferentes, já que na menor área (0,20 m²) a diferença de temperatura máxima em cada potência foi maior que nas demais.

Realizando-se uma nova regressão não-linear para os dados experimentais do segundo planejamento também no *software* Statistica 7, utilizando também como resposta o valor máximo de ΔT em cada teste (variável dependente) e as variáveis independentes sendo a potência (P) e a área da base dos ambientes de teste (S). A equação 4.2 representa o resultado da regressão encontrado:

$$\Delta T = 5,0778 + 0,85P + 1,1833P^2 - 1,05S + 0,1833S^2 - 0,8PS \quad (4.2)$$

A regressão possui R² de 0,9506 e mostra que o efeito quadrático da variável potência foi a que mais influenciou na variação da temperatura, seguido da área dos ambientes. Nota-se, também, que o efeito da potência é diretamente proporcional ao ΔT, ou seja, este aumenta com o aumento da potência. Já a área dos ambientes tem um efeito inversamente proporcional a ele, ou seja, ΔT

aumenta com a diminuição da área. O mesmo pode ser percebido também na Figura 4.14, em que se mostra a superfície de resposta. Na Figura 4.15, vê-se o gráfico dos valores observados versus os valores preditos para essa regressão, onde nota-se que os resultados experimentais estão ainda mais próximos da linha vermelha, indicando uma boa regressão.

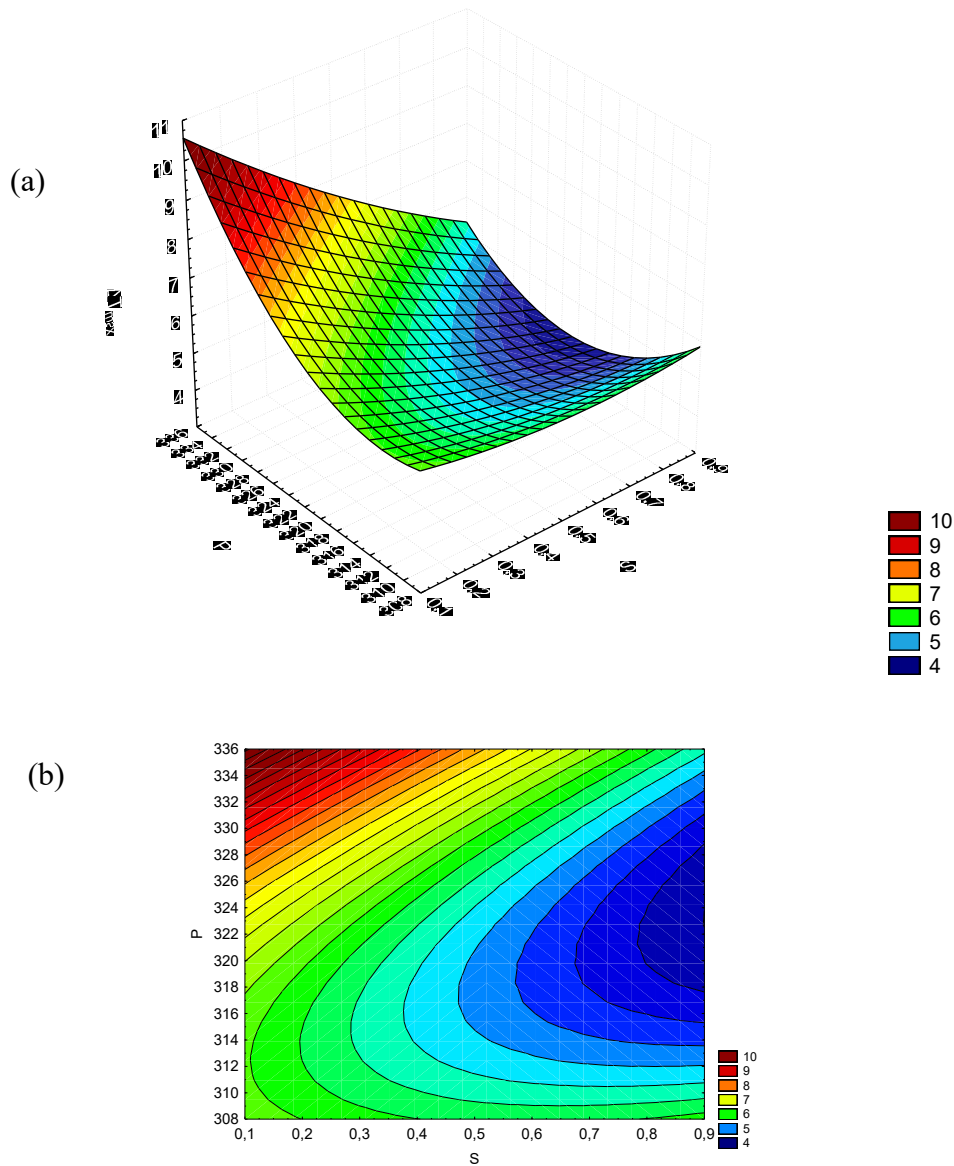


Figura 4.14 – (a) Superfície de respostas (b) e contorno em função do par P-S para os testes do segundo planejamento.

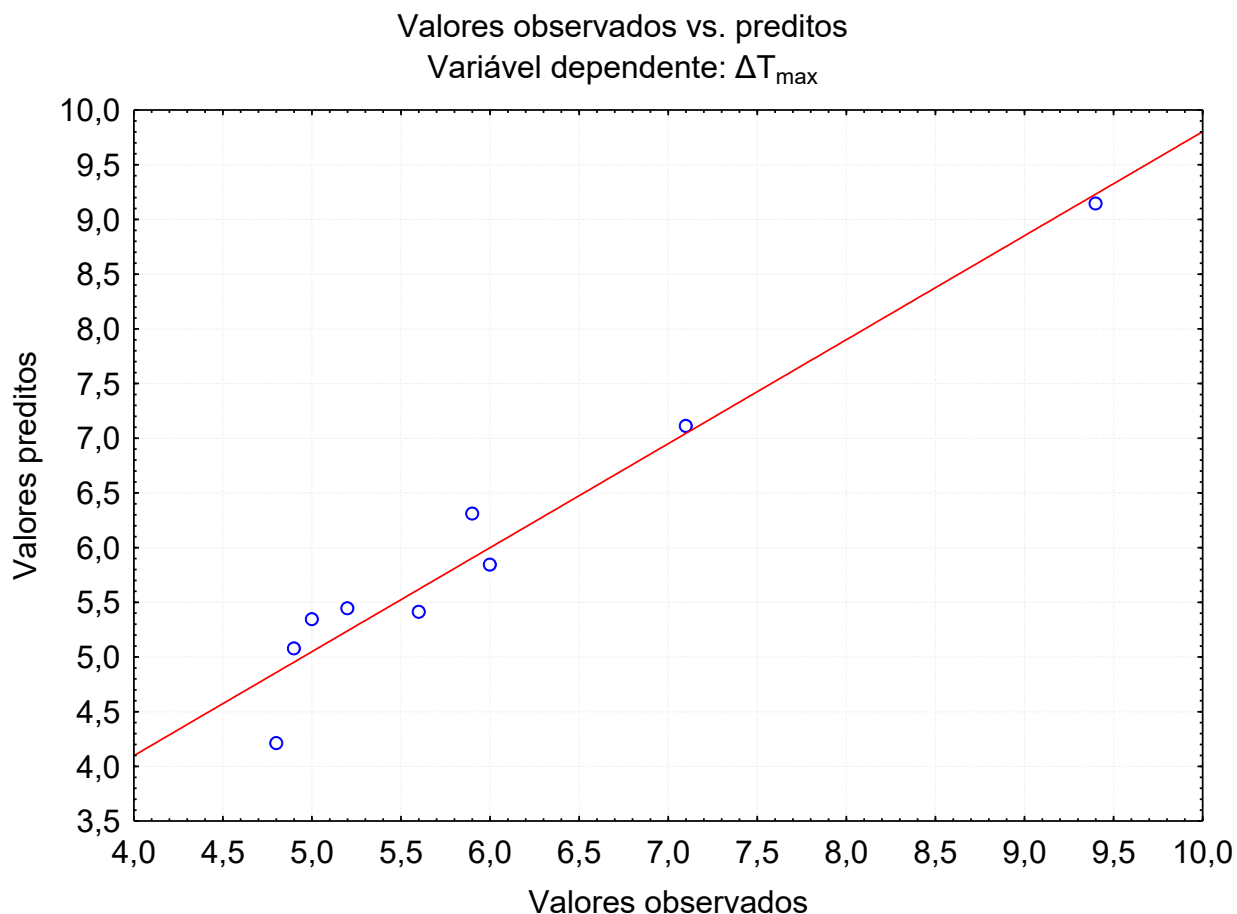


Figura 4.15 – Gráficos dos valores observados vs. preditos para o segundo planejamento.

4.6. Avaliação da influência do cooler no interior dos ambientes

O cooler utilizado em todos os testes, com o decorrer do tempo, esquenta, dissipando calor dentro dos ambientes de testes. A análise da diferença de temperatura quando se ligava apenas o cooler, deixando as pastilhas Peltier desligadas, está representada na Figura 4.16. A diferença de temperatura também foi calculada considerando a temperatura ambiente ao final dos 120 min menos a média aritmética das temperaturas nos cinco termômetros. Esse teste foi feito nas áreas de 1,7 m², 1,25m² e 0,80 m².

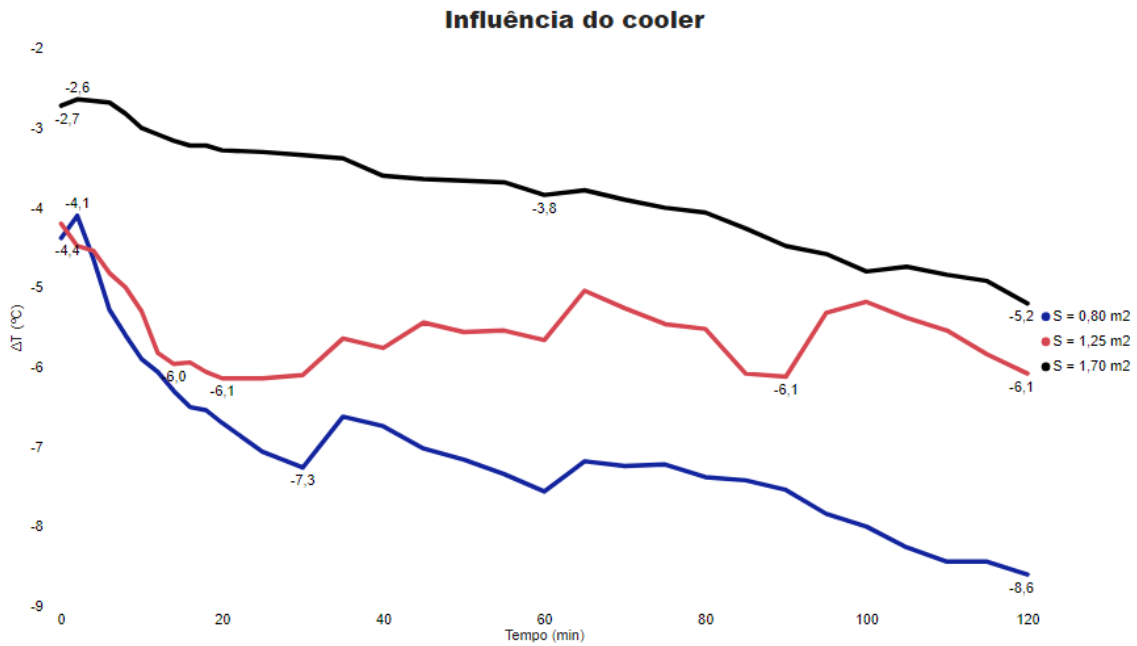


Figura 4.16 – Testes com apenas o *cooler* ligado nos ambientes.

Nota-se que, no eixo y, todos os valores são negativos, indicando que o cooler aumenta a temperatura no interior do ambiente comparando com a temperatura exterior. Percebe-se, também, que, quanto menor o ambiente, mais o cooler aumenta sua temperatura ao longo do tempo.

4.7. Comparação com o resultado de Dias (2020)

Dias (2020), avaliando um método de resfriamento de ambientes, fez 26 testes, variando a umidade relativa, a temperatura ambiente, a área do recinto a ser resfriado e a quantidade de ciclones utilizados. Considerando que no presente trabalho foi analisado apenas o efeito da área do recinto e da potência, o número de testes foi menor. Lembrando também que a potência a ser comparada foi calculada pela quantidade de potência total utilizada no trabalho de Dias (2020), sendo que ela utilizou um ventilador interno de 50 W, um exaustor de 200 W e, para cada ciclone acoplado, um ventilador de 5 W. Além disso, neste trabalho, a área utilizada foi de um décimo da área utilizada por Dias (2020). Como o trabalho dela considerava mais variáveis e ela utilizou duas réplicas no ponto central, o planejamento composto central (PCC) teve o α de ortogonalidade diferente, portanto é possível comparar as áreas e potências

mínimas e máximas para a menor umidade relativa e temperatura ambiente e duas réplicas no ponto central, deixando de fora os valores obtidos por $\pm\alpha$.

Os dois trabalhos realizados mostraram que o ar no interior dos ambientes foi resfriado por meios que não agredem ao meio ambiente, sendo, portanto, interessante a continuação dos estudos.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. Conclusões

Analisando os resultados obtidos neste trabalho, percebe-se que as pastilhas Peltier são uma alternativa interessante no condicionamento de temperatura em ambiente. Ainda, conclui-se que:

- quanto mais se dissipa o calor dos dois lados, melhor é o resfriamento, portanto, a escolha certa do dissipador influencia os resultados. Um dissipador com canais que possibilitam a passagem de um fluido com maior coeficiente convectivo conectado às faces quentes das pastilhas Peltier foi a melhor escolha. Já para as faces frias, um dissipador foi dimensionado e fabricado de acordo com a quantidade de potência utilizada nos testes;
- o isolamento dos ambientes foi fundamental para que eles não trocassem calor com o ar ambiente exterior em temperaturas mais altas;
- o melhor fluido de circulação no dissipador quente foi a água, por apresentar um coeficiente convectivo maior que do ar comprimido;
- como as pastilhas Peltier são ligadas em série, sua potência individual é somada;
- nos primeiros 20 min de operação era quando a temperatura no interior dos ambientes abaixava mais, sendo que depois desse tempo, tendia a estabilizar;
- a temperatura mais baixa em todos os ambientes era sempre no termômetro identificado na Figura 3.8 como T1, já que ficava mais próximo ao ar frio que saía do dissipador;
- quanto maior a potência utilizada nos testes, quando comparada a potências menores em uma mesma área, mais o ambiente resfriava;
- o contrário era válido para as áreas – quanto menor a área de teste, mais a temperatura interior caía;
- o *cooler* ligado à corrente elétrica esquentava com o decorrer do tempo. Isso gerava um calor dentro dos ambientes de testes, fazendo

com que a temperatura não chegasse no seu mínimo possível. Quanto menor a área de teste, mais calor era gerado pelo *cooler*;

- foi comprovado que o sistema com pastilhas Peltier resfria os ambientes, assim como o modelo apresentado por Dias (2020). Além disso, ambos se tratam de um sistema que não agride o meio ambiente.

5.2. Sugestões

Seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- testar em ambientes de tamanhos reais, trocando o isopor por parede de tijolos, fazendo as modificações necessárias;
- ligar o sistema em uma fonte renovável de energia, como a solar;
- fazer simulações de fluidodinâmica computacional (CFD) para compreender melhor o comportamento do fluido no interior dos ambientes;
- propor um sistema de circulação do ar no interior dos ambientes de teste que não libere calor ou um conjunto de sistemas on/off para que o *cooler* não tenha uma influência significativa nos testes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARORA, C. P. **Refrigeration and Air Conditioning**. 2. ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2006.

Artic TEC Technologies, 2011. < <http://en.arctitect.com/tec/10-multistage-thermoelectric-cooling-batteries.html>>. Acessado em 04 de maio de 2020.

ASTRAIN, D. *et al.* **Computational model for refrigerators based on Peltier effect application**. Applied Thermal Engineering, n. 25, p. 3149-3162, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.04.003>

BALARAS, C. A. *et al.* Solar Air Conditioning in Europe – an Overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 11, p. 299-314, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.02.003>

BAZILIAN, M. *et al.* **Re-considering the economics of photovoltaic power**. Renewable Energy 53. p. 329-338. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.029>

BÖCKH, P. V.; WETZEL, T. **Heat Transfer: Basics and Practice**. Heidelberg: Springer, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19183-1>

BUENO, A. V. **Apostila de Refrigeração e Condicionamento de Ar**. Universidade Federal do Ceará (Departamento de Engenharia Mecânica), Fortaleza, 2007.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa**. 4. ed. Nova York: McGraw Hill, 2011.

COOPER, G. **Air-Conditioning America: Engineers and the Controlled Environment, 1900-1960**. Baltimore e Londres: The Johns Hopkins University Press, 2002.

DIAS, D. R. **Avaliação Numérico-Experimental Do Resfriamento De Ambientes Por Um Sistema Ciclônico-Psicrométrico**. Orientadores: Luiz Gustavo Martins Vieira e Danylo de Oliveira Silva. 2020. 81 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

DIZAJI, H. S. *et al.* **A comprehensive exergy analysis of a prototype Peltier air-cooler; experimental investigation.** Renewable Energy Reviews, n. 131, p 308-317, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.056>

Equipamentos Danvic LTDA. < <http://www.peltier.com.br/index.php?url=faq>>. Acessado em 04 de maio de 2020.

GUREVICH, Y.G.; VELÁZQUEZ-PÉREZ, J. E. **Peltier Effect in Semiconductors.** Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. John Wiley & Sons, 2014. <https://doi.org/10.1002/047134608X.W8206>

HEBEI I.T. Co. <<http://www.hebeiltd.com.cn/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf>>. Acessado em 09 de outubro de 2021.

INCROPERA, F. P. *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change and Land: Summary for Policymakers.** IPCC: 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **The Future of Cooling.** Technology Report, mai. 2018. <<https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>>. Acessado em 23 de novembro de 2020.

JONES, W. P. **Air Conditioning Engineering.** 5. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

KADHIM, T. J.; ABBAS, A. K.; KADHIM, H. J. **Experimental Study of Atmospheric Water Collection Powered By Solar Energy Using The Peltier Effect.** 3rd International Conference on Engineering Sciences. IOP, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012155>

KERN, D. Q. **Procesos de Transferencia de Calor.** México: Compañía Editorial Continental, 1999.

KREITH, F.; BOHN, M. S. **Princípios de Transferência de Calor.** São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

KREITH, F.; MANGLIK, R.M.; BOHN, M. S. **Principles of Heat Transfer**. 7th ed. Cengage Learning. Stamford: 2011.

MACDONALD, D. K. C. **Thermoelectricity: An Introduction to the Principles**. 1st ed. Dover Publications. Nova York: 2006.

MOREIRA, G. A. z. **Condicionador de ar por efeito Peltier**. Orientador: Fernando Rodrigo Macchion. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica), Universidade São Francisco, Campinas, 2014.

MORIARTY, P.; HONNERY, D. **What Is The Global Potential For Renewable Energy?** Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 16, p 244-252, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.151>

MOURA, J. A. De S. **Filmes Nanométricos De FeN e AlN Crescidos por Sputtering e Aplicações do Efeito Peltier**. Tese de Doutorado. UFRN. Natal: 2010.

NAGENGAST, B. 100 Years of Air Conditioning. **ASHRAE Journal**, p. 44-46, 2002.

PASCAL-DELANNOY, F. *et al.* **Fast Humidity Sensor Using Optoelectronic Detection on Pulsed Peltier Device**. Sensors and Actuators A 65, p. 165-170, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(97\)01743-3](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(97)01743-3)

RICHMOND, P. E. **The Peltier Effect**. Department of Education, University of Southampton: 2014.

RUFINO, C. A. **Bebedouro Refrigerado Tipo Nipple Para Criação Animal Utilizando Efeito Peltier**. UFLA. Lavras:2016.

SANTOS, A. V. dos. **As Pastilhas Termopar Nas Aulas Experimentais de Termologia**. Dissertação de Mestrado. UFF. Volta Redonda: 2016.

SLADECEK Z. S. M. U. V. **Cooling Device with Peltier Element for Medical Applications**. IFAC PapersOnLine, n. 54-6, p 54-59, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.129>

United Nations Environment Programme (UNEP) and International Energy Agency (IEA). **Cooling Emissions and Policy Synthesis Report**. UNEP, Nairobi and IEA, Paris. 2020.

UNIVASF. **Fenômenos dos Transportes**. <http://www.univasf.edu.br/~castro.silva/disciplinas/FT/Apostila_Transcal_Mecfluidos.pdf>. Acessado em 24 de abril de 2021.

WELTY, J. R. *et al.* **Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer**. 5. ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2008.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Climate Change And Health**. 01/02/2018. <<https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>>. Acessado em 12 de maio de 2020.

APÊNDICE A

Este apêndice apresenta algumas imagens do aparato experimental utilizado neste trabalho (figuras A.1 e A.2).



Figura A.1 – Sistema de testes sem o ambiente de isopor.



Figura A.2 – Teste com a maior área (1,7 m²).

APÊNDICE B

Como foi citado na seção 4, a diferença de temperatura ambiente nos 120 minutos de teste podia ser grande, dependendo do dia e do horário que o teste era realizado. Na Tabela B.1 podem-se ver as datas e horários de início de todos os testes dos dois planejamentos, assim como as das temperaturas ambiente no início e no fim dos testes.

Tabela B.1 – Datas e horários dos testes experimentais.

| Área (m ²) | Potência (w) | Data | Horário de início | T _∞ início (°C) | T _∞ fim (°C) |
|------------------------|--------------|------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|
| 1,70 | 310 | 18/08/2021 | 14:36 | 30,8 | 31,5 |
| 1,625 | 330 | 25/08/2021 | 9:10 | 25,2 | 28,7 |
| 1,625 | 290 | 19/08/2021 | 10:26 | 26,4 | 28,0 |
| 1,25 | 310 | 19/08/2021 | 13:40 | 30,3 | 31,5 |
| 1,25 | 310 | 20/08/2021 | 14:00 | 29,0 | 29,7 |
| 1,25 | 310 | 30/08/2021 | 13:40 | 24,8 | 24,8 |
| 1,25 | 310 | 30/08/2021 | 15:50 | 24,7 | 23,9 |
| 1,25 | 285,8 | 25/08/2021 | 11:18 | 28,5 | 30,5 |
| 1,25 | 334,2 | 25/08/2021 | 13:30 | 32,3 | 33,5 |
| 0,875 | 290 | 25/08/2021 | 15:58 | 30,0 | 30,2 |
| 0,875 | 330 | 26/08/2021 | 10:17 | 27,4 | 31,4 |
| 0,80 | 310 | 26/08/2021 | 12:36 | 31,5 | 34,5 |
| 0,80 | 322,1 | 27/08/2021 | 15:35 | 31,6 | 33,2 |
| 0,80 | 334,2 | 26/08/2021 | 14:50 | 33,0 | 34,6 |
| 0,50 | 310 | 01/09/2021 | 12:06 | 28,0 | 29,2 |
| 0,50 | 322,1 | 01/09/2021 | 14:13 | 28,5 | 30,5 |
| 0,50 | 334,2 | 02/09/2021 | 8:35 | 21,1 | 26,8 |
| 0,20 | 310 | 02/09/2021 | 13:30 | 30,6 | 30,3 |
| 0,20 | 322,1 | 02/09/2021 | 15:40 | 29,9 | 29,8 |
| 0,20 | 334,2 | 02/09/2021 | 11:20 | 26,8 | 30,8 |