



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE RECIPIENTE
FECHADO PARA CONDICIONAMENTO DE
PRODUTOS TERMOLÁBEIS**

Paulo Vitor dos Santos

Brasília, Julho de 2016



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE RECIPIENTE
FECHADO PARA CONDICIONAMENTO DE
PRODUTOS TERMOLÁBEIS**

Paulo Vitor dos Santos

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Banca Examinadora

Prof. Marco Antonio Freitas do Egito Coelho,
UnB/ ENE (Orientador)

Prof. João Manoel Dias Pimenta, UnB/ ENM

Prof. Lélío Ribeiro Soares Júnior, UnB/ ENE

Brasília, Julho de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

PAULO VITOR, DOS SANTOS

Desenvolvimento de recipiente fechado para condicionamento de produtos termolábeis, [Distrito Federal] 2016.

ix, 48p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2016). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília.Faculdade de Tecnologia.

1.Refrigerador

2.Armazenamento de termolábeis

3.Efeito Peltier

4.Refrigerador termoelétrico

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DOS SANTOS, P. V., (2016). Desenvolvimento de recipiente fechado para condicionamento de produtos termolábeis. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº 13,Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 48p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Paulo Vitor dos Santos.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Desenvolvimento de recipiente fechado para condicionamento de produtos termolábeis.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Paulo Vitor dos Santos

Rua 25 Sul Lotes 13/15 Ed. Le Ciel ap. 505 – Águas Claras.

71927-180 Brasília – DF – Brasil.

RESUMO

No que se refere ao armazenamento e transporte de materiais, existem certos tipos, como alguns medicamentos, que se enquadram na categoria de termolábeis, os quais exigem um condicionamento dentro de uma dada faixa de temperatura para garantir a sua conservação. Com esta motivação, este trabalho visa, utilizando-se técnicas aprendidas durante o curso em áreas como circuitos elétricos, sistemas de medição e transferência de calor, o desenvolvimento de um refrigerador pequeno para o armazenamento e/ou transporte desse tipo de produto. Para isso, esse trabalho foi dividido de modo que, na primeira etapa, foi explorada a possibilidade do uso de dispositivos termoelétricos para servir como elemento de refrigeração com a montagem de um protótipo baseando-se em modelos propostos por trabalhos anteriores feitos nessa área de pesquisa seguida de uma série de medições das grandezas elétricas e térmicas envolvidas no processo para verificar o funcionamento do sistema de refrigeração proposto. Na segunda etapa, o sistema proposto foi reconstruído com novas peças. Além disso, foi explorada a nova possibilidade de utilizar diferentes números de dispositivos termoelétricos para que fosse encontrada a melhor configuração que satisfizesse a condição de reduzir a temperatura interna do pequeno recipiente sem uma grande demanda de energia elétrica para isso. E nessa etapa ainda, com o sistema mais eficiente encontrado, foi realizado um teste para verificar o comportamento temporal da diferença de temperatura entre o interior da caixa e o ambiente externo tanto para o sistema ao ser ligado quanto para o sistema ao ser desligado. Depois de todos esses testes, foi notado um aumento da eficiência com o uso de mais placas de Peltier no sistema e, ao final, foi obtido um refrigerador termoelétrico pequeno capaz de refrigerar o interior da caixa de isopor na faixa de 9°C abaixo da temperatura ambiente usando cerca de 9W de potência elétrica.

Palavras chave: Refrigerador, Armazenamento de termolábeis, Efeito Peltier, Refrigerador termoelétrico.

ABSTRACT

As regards storage and transport of materials, there are certain types, such as certain medicines, which fall into the category of thermolabile, which require conditioning within a given temperature range to ensure their conservation. With this motivation, this paper aims, using techniques learnt during the course in areas such as electrical circuits, measurement systems and heat transfer, the development of a small refrigerator for storage and/or transport of such products. In order to do it, this research was divided in a way in which, on the first stage, the possibility of using thermoelectric devices to serve as cooling element was explored with the construction of a prototype based on models which were proposed by previous papers concerning this topic followed by a series of measurements of the electrical and thermal values involved in the process to verify the functionality of the proposed refrigerator. On the second stage, the proposed system was rebuilt with new parts. Besides, the new possibility of using different numbers of thermoelectric devices was explored in order to find the best configuration that could satisfy the condition of reducing the internal temperature of the small recipient without demanding a great amount of electrical energy for that. Still on this stage, with the most efficient system found, a series of measurements was made to verify the temporal behavior of the difference of temperature inside the box and the external environment, both for when the system is turned on and when it is turned off. After all these tests, an increase of efficiency was noted with the usage of more Peltier plates in the system and, in the end, we obtained a small thermoelectric refrigerator capable of refrigerating inside the box in about 9°C lower than the environment temperature using almost 9W of electrical power.

Keywords: Refrigerator, storage of thermolabile, Peltier effect, Thermoelectric cooler.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 ASPECTOS GERAIS	1
1.2 ESTADO DA ARTE	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
1.4 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO	3
CAPÍTULO 2 - CONTEÚDO TEÓRICO	4
2.1 MEDICAMENTOS TERMOLÁBEIS	4
2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR (CARGAS TÉRMICAS)	4
2.3 EFEITO TERMOELÉTRICO (PELTIER)	5
2.4 PLACAS DE PELTIER E REFRIGERADOR TERMOELÉTRICO	6
2.5 REFRIGERADOR E RENDIMENTO DE CARNOT	9
2.6 ERROS E PROPAGAÇÃO DE ERROS EXPERIMENTAIS	11
CAPÍTULO 3 – PROTÓTIPO	12
3.1 MATERIAIS	12
3.2 MONTAGEM	13
3.3 MEDIÇÕES	15
3.4 RESULTADOS	17
CAPÍTULO 4 – SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	24
4.1 MATERIAIS	24
4.2 MONTAGEM	25
4.3 MEDIÇÕES (MÚLTIPLAS PLACAS)	28
4.4 RESULTADOS (MÚLTIPLAS PLACAS)	30
4.5 MONTAGEM E MEDIÇÕES (COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO)	35
4.6 RESULTADOS (COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO)	35
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO	37
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
ANEXOS	40
Anexo I - Especificações das placas de Peltier (HB Corporation, 2015)	40
Anexo II - Propriedades físicas dos materiais (Protolab, 2015)	40
Anexo III - Valores Resistência x Temperatura para o termistor NTC	40
Anexo IV - Resultados obtidos com o primeiro protótipo (Seção 3.4)	41
Anexo V - Código para obter os dados (Seções 4.3 e 4.5)	42
Anexo VI - Resultados obtidos com o sistema com novas peças (Seção 4.4)	44

LISTA DE FIGURAS

1.1	Aplicações de placas de Peltier.....	2
2.1	Ilustração do efeito Peltier em materiais semicondutores	6
2.2	Estrutura de uma pastilha termoelétrica	7
2.3	Modelo de refrigerador termoelétrico	8
2.4	Ciclo de Carnot no plano T-S para uma máquina térmica	9
2.5	Comparação do rendimento de Carnot	10
3.1	Desenho esquemático do protótipo	14
3.2	Protótipo de sistema de refrigeração com 2 pastilhas termoelétricas.....	14
3.3	Sistema adaptado à caixa de isopor de 5,2 litros	15
3.4	Potência elétrica x Tensão de alimentação	18
3.5	Diferença de temperatura entre os lados das placas x Tensão de alimentação	19
3.6	Temperatura do lado frio das placas x Tensão de alimentação	20
3.7	Temperatura do lado quente das placas x Tensão de alimentação.....	20
3.8	Diferença de temperatura entre os lados das placas x Corrente elétrica	21
3.9	Eficiência energética x Tensão de alimentação	22
3.10	Rendimento de Carnot x Tensão de alimentação.....	22
3.11	Coeficiente de performance x Tensão de alimentação	23
4.1	Conjuntos de placas de Peltier	25
4.2	Desenho esquemático do sistema de refrigeração	26
4.3	Sistema de refrigeração adaptado à caixa de isopor de 5,15 litros	27
4.4	Caixa montada com sistema de medição	27
4.5	Estrutura e pinagem dos sensores LM-35	29
4.6	Potência elétrica x Número de placas	31
4.7	Diferença de temperatura da caixa de isopor x Número de placas	32
4.8	Eficiência energética x Número de placas	32
4.9	Razão (ΔT /Corrente elétrica) x Número de placas	33
4.10	Rendimento de Carnot x Número de placas	34
4.11	Coeficiente de performance x Número de placas	34
4.12	Resfriamento da caixa ligada	36
4.13	Aquecimento da caixa desligada	36

LISTA DE TABELAS

2.1	Faixas de temperatura segundo a classificação farmacopeica	4
I.1	Especificações das placas de Peltier.....	40
III.1	Valores Resistência x Temperatura para o termistor NTC	40
IV.1	Medições feitas para diferentes tensões de alimentação.....	41
IV.2	Medidas de desempenho calculadas dos resultados obtidos	41
VI.1	Medições feitas nos testes com diferentes números de placas.....	44
VI.2	Medidas de desempenho calculadas dos resultados obtidos	46

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	$[m^2]$
c	Calor específico	$[J/(kg.K)]$
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$[W/(m^2.K)]$
i	Corrente elétrica	$[A]$
K	Condutividade térmica	$[W/(m.K)]$
P	Potência	$[W]$
Q	Calor	$[J]$
R	Resistência elétrica	$[\Omega]$
R_t	Resistência elétrica do termistor NTC	$[\Omega]$
S	Entropia	$[J/K]$
T	Temperatura	$[^{\circ}C]$
t	Tempo	$[s]$
U	Coeficiente global de transferência de calor	$[W/(m^2.K)]$
u	Velocidade do ar junto a uma superfície	$[m/s]$
V	Tensão elétrica	$[V]$
x	Espessura de um corpo	$[m]$

Símbolos Gregos

Δ	Varição/Diferença entre duas grandezas similares	
η	Rendimento de Carnot	$[\%]$

Subscritos

<i>Carnot</i>	Relativo ao refrigerador de Carnot
<i>ext</i>	Relativo ao exterior da caixa de isopor
<i>frio</i>	Relativo ao lado frio das placas termoeletricas
<i>int</i>	Relativo ao interior da caixa de isopor
<i>máx</i>	Relativo ao valor máximo de uma grandeza
<i>quente</i>	Relativo ao lado quente das placas termoeletricas

Sobrescritos

$\dot{}$	Fluxo/Varição temporal
---------------------	------------------------

Siglas

COP	Coeficiente de performance (refrigeração)
CPRFB	Comissão Permanente de Revisão da Farmacopéia Brasileira
NTC	Coeficiente de temperatura negativo (Negative temperature coefficient)

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Esse capítulo faz uma primeira apresentação do conteúdo presente nesse trabalho. Serão abordados alguns aspectos gerais sobre o assunto estudado incluindo um breve resumo de estudos já realizados na área seguido por uma breve apresentação da estrutura e contribuição desse trabalho.

1.1 ASPECTOS GERAIS

Macagnan (2015) narra que, desde os tempos antigos, o ser humano buscou formas de conservar os alimentos e outros produtos perecíveis. Dentre esses métodos, um dos principais é o da refrigeração, ou seja, o condicionamento desses produtos em temperaturas inferiores à temperatura do ambiente.

Desde então, diversas técnicas foram desenvolvidas ao longo dos muitos anos da história do homem. Dentre alguns desses métodos estão: refrigeração mecânica de vapor, refrigeração por absorção e refrigeração por ejeção de vapor.

Nesse contexto, surgem os chamados materiais termolábeis, os quais apresentam uma maior sensibilidade à ação da temperatura. Medicamentos são um exemplo bastante comum de produtos termolábeis, pois neles podem ocorrer reações que levam a redução ou até anulação de seu efeito (Marin et al, 2003).

Portanto, esses produtos requerem o uso de métodos de refrigeração para a sua conservação. Contudo, as técnicas de refrigeração citadas acima necessitam de um sistema que ocupa um volume muito grande, o que prejudica a sua aplicação em situações em que o espaço disponível é muito limitado. Além disso, esses sistemas funcionam baseados na circulação de um fluido refrigerante, deixando esses refrigeradores sujeitos a problemas como um vazamento desse fluido.

Como uma alternativa para esse problema, existe a refrigeração termoelétrica baseada no Efeito Peltier, descoberto em 1834. Contudo, foi a partir de 1949 que a refrigeração termoelétrica começou a tomar impulso com o desenvolvimento de novos materiais semicondutores (Macagnan, 2015).

Com essas novas descobertas, surgiram as pastilhas do tipo Peltier, que por se tratarem de dispositivos de estado sólido que operam eletricamente, não apresentam peças móveis, gás freon, barulho ou vibração. Essas placas também são pequenas, tem uma alta durabilidade e precisão (Equipamentos Danvic, 2015). Contudo, segundo a Equipamentos Danvic (2015) e Macagnan (2015), existem algumas desvantagens como o baixo rendimento energético e a dissipação do calor gerado.

Esse trabalho consistirá em uma montagem seguido de uma análise para um refrigerador de pequeno volume usando um conjunto dessas pastilhas termoelétricas tanto em relação ao potencial de refrigeração quanto à eficiência energética.

1.2 ESTADO DA ARTE

Atualmente, existem sistemas de refrigeração construídos usando pastilhas termoelétricas que podem ser aplicados para a refrigeração de recipientes com um pequeno volume. E segundo Leismann et al (2007), de experimentos feitos no trabalho, concluiu-se que há a necessidade do uso de dois conjuntos compostos por dissipadores de calor e ventiladores, sendo um de cada lado da placa Peltier.

Mais exemplos do uso desse tipo de sistema para refrigeração para pequenos volumes usando dispositivos termoelétricos podem ser encontrados na Internet. Dentre esses, a abordagem do uso do conjunto dissipador/ventilador, sendo um conjunto para cada lado da placa, é a mais explorada por aplicar tanto a transferência de calor por condução quanto por convecção forçada, tornando o sistema mais eficiente.

Em adição, a Equipamentos Danvic (2015) aponta que pastilhas termoelétricas são utilizadas em outras aplicações pequenas de resfriamento como chips microprocessadores. Elas são também usadas em inúmeros setores como os de bens de consumo, automotivo, industrial e militar. Algumas aplicações são mostradas na Figura 1.1.



Figura 1.1. Aplicações de placas de Peltier (Equipamentos Danvic, 2015)

Contudo, a tecnologia existente no momento não possibilita o uso de equipamento para um aparelho de ar condicionado de médio ou grande porte. Isso porque com os módulos disponíveis atualmente, a maior potência que pode ser alcançada fica em torno 250W.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho está dividido nos capítulos descritos a seguir:

Um capítulo de conteúdo teórico consiste na apresentação do embasamento teórico envolvido na elaboração desse trabalho. Ele expande alguns conceitos apresentados na introdução.

Um capítulo mostra a primeira etapa desse trabalho com o desenvolvimento de um protótipo de refrigerador termoelétrico seguindo o modelo descrito na introdução teórica. Nele, são descritos os materiais usados tanto para o sistema em si quanto para as medições, o procedimento de montagem, os testes realizados para obtenção dos dados e os gráficos obtidos desses resultados comparando o sistema montado com o esperado de acordo com a especificação do fabricante das placas.

Outro capítulo mostra como foi feita a reconstrução do sistema usando novas peças. Nele, são novamente descritos os materiais usados, o procedimento de montagem com diferentes configurações (diferentes números de placas), os testes realizados para obtenção dos dados e os gráficos obtidos desses resultados. Adicionalmente, foi feito um teste adicional para analisar o comportamento do transitório da diferença de temperatura dentro da caixa de isopor no intervalo de 1 hora (3600 segundos).

Um capítulo final de conclusão mostra algumas considerações finais relativos aos resultados obtidos ao final do trabalho e apresenta algumas sugestões para estudos futuros. E, por fim, são apresentadas a bibliografia abordada e os anexos.

1.4 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho tem, além da motivação de armazenamento e transporte de produtos termolábeis, o propósito de oferecer novas informações e resultados obtidos por meio de experimentos com componentes reais para a área de estudo em refrigeração termoelétrica. As contribuições desse trabalho incluem:

- Fornecer dados experimentais para o estudo do funcionamento de sistemas de refrigeração de pequeno porte utilizando dispositivos termoelétricos;
- Explorar a possibilidade de montar diferentes configurações usando diferentes números de placas para encontrar sistemas mais eficientes;
- Fornecer resultados para o comportamento transitório do refrigerador termoelétrico.

CAPÍTULO 2 - CONTEÚDO TEÓRICO

Este capítulo consiste na apresentação do embasamento teórico envolvido na elaboração desse trabalho. Ele expande alguns conceitos já apresentados anteriormente.

2.1 MEDICAMENTOS TERMOLÁBEIS

Em relação a produtos farmacêuticos, há uma contra-indicação à exposição destes a temperaturas elevadas, pois uma temperatura acima da prevista pode acelerar o processo de decomposição dos mesmos por meio de reações químicas e biológicas, uma alteração que acaba por alterar não só seus prazos de validade como sua função.

Em especial, existem certos tipos de medicamentos que requerem certas condições de temperatura para que suas propriedades e características originais sejam conservadas. São os chamados medicamentos termolábeis. Estes apresentam uma maior sensibilidade à ação da temperatura. Esse tipo de medicamento requer, em geral, temperatura refrigerada ou fresca, devendo portanto ser armazenados em caixa térmica com temperatura controlada.

Segundo a Comissão Permanente de Revisão da Farmacopéia Brasileira (CPRFB), as diferentes formas de acondicionamento dos diversos tipos de produtos farmacêuticos podem ser classificadas de acordo com as faixas de temperatura descritas na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Faixas de temperatura segundo a classificação farmacopeica (Marin et al, 2003)

Classificação	Faixa de temperatura
Fria ou refrigerada	De 2 a 8 °C
Fresca	De 8 a 15 °C
Ambiente	De 15 a 30 °C
Quente	Acima de 30 °C

2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR (CARGAS TÉRMICAS)

De um modo geral, transferência de calor pode ser ocorrer de 3 maneiras. Por condução, no qual a troca de calor é feita entre dois materiais sólidos em contato um com o outro. Dessa forma, o calor é transmitido pelo próprio movimento dos átomos desses corpos sólidos. Por convecção, onde a troca é feita pelo movimento de algum material fluido, como o ar ou a água por exemplo. Nesse caso, esse movimento de fluido pode ser forçado com o uso de algum outro objeto, como um ventilador, o que intensifica a taxa de troca de calor. E por radiação, na qual o calor é transmitido por meio de ondas eletromagnéticas, ou seja, sem a necessidade de matéria para que haja o fluxo de calor (Fortes, 2009).

E Macagnan (2015) apresenta uma série de formas como o calor pode ser transferido, considerando um sistema de refrigeração. Essas transferências de calor devem ser levadas em conta no cálculo das cargas térmicas para o dimensionamento desse sistema de refrigeração.

No caso desse sistema, o propósito é manter a caixa fechada com o intuito de armazenar e/ou transportar os produtos. Devido a isso, a potencial carga térmica envolvida em regime permanente é a transferência de calor pela diferença de temperatura entre os lados externo e interno das paredes da caixa de isopor. A carga devido a esse método de transferência de calor pode ser calculada pelas seguintes equações para cada parede da caixa de isopor:

$$\dot{Q} = UA(T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) , \text{ onde:} \quad (2.1)$$

$$U = \frac{1}{\frac{x}{K} + \frac{1}{h_{\text{int}}} + \frac{1}{h_{\text{ext}}}} , \text{ onde:} \quad (2.2)$$

$$h_{\text{int}} = 1,6 + 0,66u_{\text{int}} , \text{ e} \quad (2.3)$$

$$h_{\text{ext}} = 1,6 + 0,66u_{\text{ext}} \quad (2.4)$$

- \dot{Q} : Fluxo de calor pela parede de isopor (do interior para o exterior da caixa) [J/s]
- U: Coeficiente global de transferência de calor [W/(m².K)]
- A: Área da parede de isopor [m²]
- T: Temperatura (externa e interna da caixa) [K]
- x: Espessura da parede de isopor [m]
- K: Condutividade térmica do isopor [W/(m.K)]
- h: Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m².K)]
- u: Velocidade do ar junto à superfície da parede de isopor [m/s]

2.3 EFEITO TERMOELÉTRICO (PELTIER)

Efeito termoelétrico é a designação dada a um conjunto de efeitos que relacionam diferenças de temperatura com diferenças de potencial elétrico em materiais condutores ou semicondutores. Esses efeitos são: efeito Seebeck, efeito Peltier e efeito Thomson. Nesse trabalho, será dado foco no Efeito Peltier.

O efeito Peltier foi descoberto em 1834 pelo físico francês Jean Charles Athanase Peltier. Esse efeito consiste na geração ou remoção de calor de uma junção formada por dois materiais condutores ou semicondutores dissimilares quando há neles um fluxo de corrente elétrica (Rowe, 2006).

De acordo com a Equipamentos Danvic (2015), isso ocorre pois esse fluxo de corrente elétrica gera uma transferência de calor forçada de um lado para o outro, podendo esse calor gerado ser então retirado com o uso de um dissipador de calor por exemplo. Seguindo esse princípio, podem ser criados dispositivos que, dependendo do sentido da corrente elétrica que os atravessa, atuam como aquecedores ou refrigeradores.

Uma ilustração desse efeito Peltier gerado pelo fluxo das cargas em materiais semicondutores é mostrada na Figura 2.1. Nessa figura é possível ver o deslocamento das cargas elétricas negativas (elétrons) no material do tipo N e um deslocamento das cargas positivas (buracos) no material do tipo P. Esse deslocamento de cargas é o que acaba por gerar o fluxo de calor de um lado para o outro (Souza, 2007):

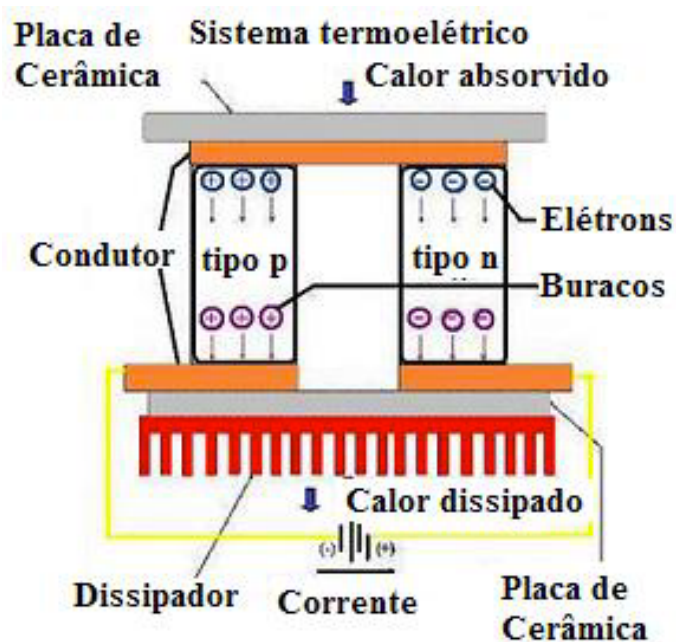


Figura 2.1. Ilustração do efeito Peltier em materiais semicondutores (Souza, 2007)

Contudo, Macagnan (2015) relata que a possibilidade do uso desse efeito com o propósito de refrigeração começou a ser mais explorada a partir de 1949 com o desenvolvimento de novos materiais semicondutores, o que possibilitou a criação das chamadas pastilhas termoelétricos, também conhecidas como placas ou módulos Peltier devido ao nome do efeito no qual estas se baseiam.

2.4 PLACAS DE PELTIER E REFRIGERADOR TERMOELÉTRICO

As pastilhas termoelétricas são, a princípio, pequenas com dimensões na ordem de alguns milímetros. Elas são compostas por uma série de elementos de material semicondutor, geralmente o telureto de bismuto (Bi_2Te_3) (Equipamentos Danvic, 2015). Esses pequenos grupos são então ligados em série eletricamente e em paralelo

termicamente. Por fim, esses blocos ligados são soldados em duas placas cerâmicas (Leismann et al, 2007). A Figura 2.2 mostra um esquema da estrutura dessas pastilhas.

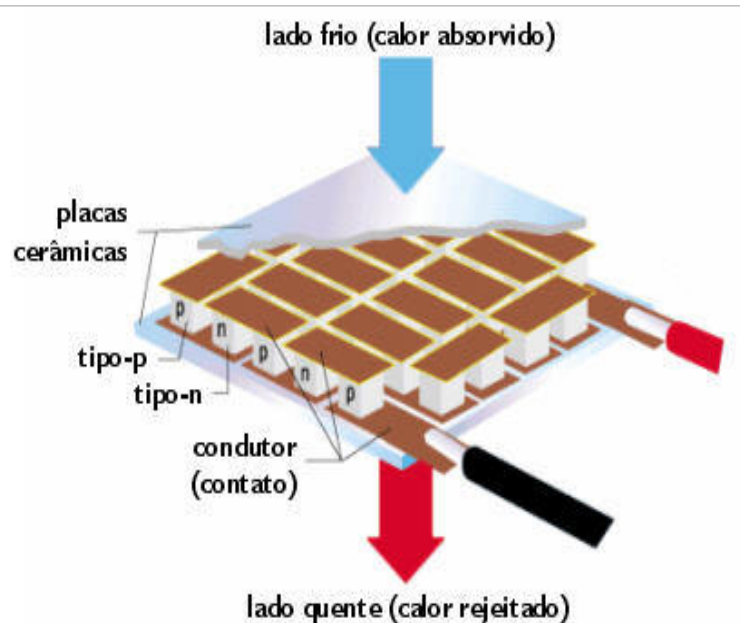


Figura 2.2. Estrutura de uma pastilha termoelétrica (Leismann et al 2007)

Leismann et al (2007) afirmam que o potencial de bombeamento de calor de um resfriador construído com essas placas é proporcional à corrente elétrica fornecida e ao número de grupos de material semicondutor presentes na placa.

Essas pastilhas possuem, quando aplicadas a um sistema de refrigeração, um certo limite mínimo que a temperatura do seu lado frio pode atingir. Uma forma de reduzir esse valor mínimo, caso necessário, é uma melhoria no meio de dissipação de calor no lado quente da placa, reduzindo a temperatura desse lado. Isso, conseqüentemente, resfria mais o lado frio.

Uma outra alternativa, no entanto, é apresentada pela Equipamentos Danvic (2015). Este sugere o empilhamento de pastilhas para se chegar a temperaturas mais baixas. Dessa forma, para uma mesma corrente de alimentação, o lado frio voltado para o meio externo alcança uma temperatura mais baixa, pois o seu lado quente entra em equilíbrio térmico com o lado frio da outra placa. Mas, isso gera a complicação da necessidade de uma forma mais eficiente para a dissipação do calor gerado no processo, que é maior do que para apenas uma placa.

Por fim, como já citado anteriormente nesse trabalho, as grandes vantagens das placas Peltier são: o fato de elas serem pequenas, terem alta durabilidade, serem facilmente controladas e serem refrigeradores de estado sólido, ou seja sem partes móveis como um fluido de refrigeração por exemplo (Equipamentos Danvic, 2015).

Como apontado por Leismann et al (2007) e Souza (2007) a forma mais eficiente de usar as pastilhas Peltier para refrigeração é com o uso de um conjunto dissipador/ventilador tanto do lado quente quanto do lado frio das placas.

Nessa configuração, os dissipadores tem a função de fornecer uma área de superfície maior para que a transferência de calor com o ar em volta destes se torne mais eficiente. No lado quente, o objetivo principal é dissipar o calor gerado na placa, resfriando esse lado. No lado frio, o propósito é aumentar o potencial de resfriamento do ar ao redor da placa.

A função dos ventiladores é aumentar o fluxo de ar nos dissipadores de modo a favorecer a troca de calor por convecção melhorando o desempenho do sistema como um todo.

Para ilustrar isso, Souza (2007) apresenta a Figura 2.3 com a estrutura de um sistema de refrigeração termoelétrica adaptado a um pequeno recipiente a ser refrigerado. Nessa figura são mostrados os conjuntos dissipador/ventilador que são geralmente usados em ambos os lados dos módulos de Peltier:

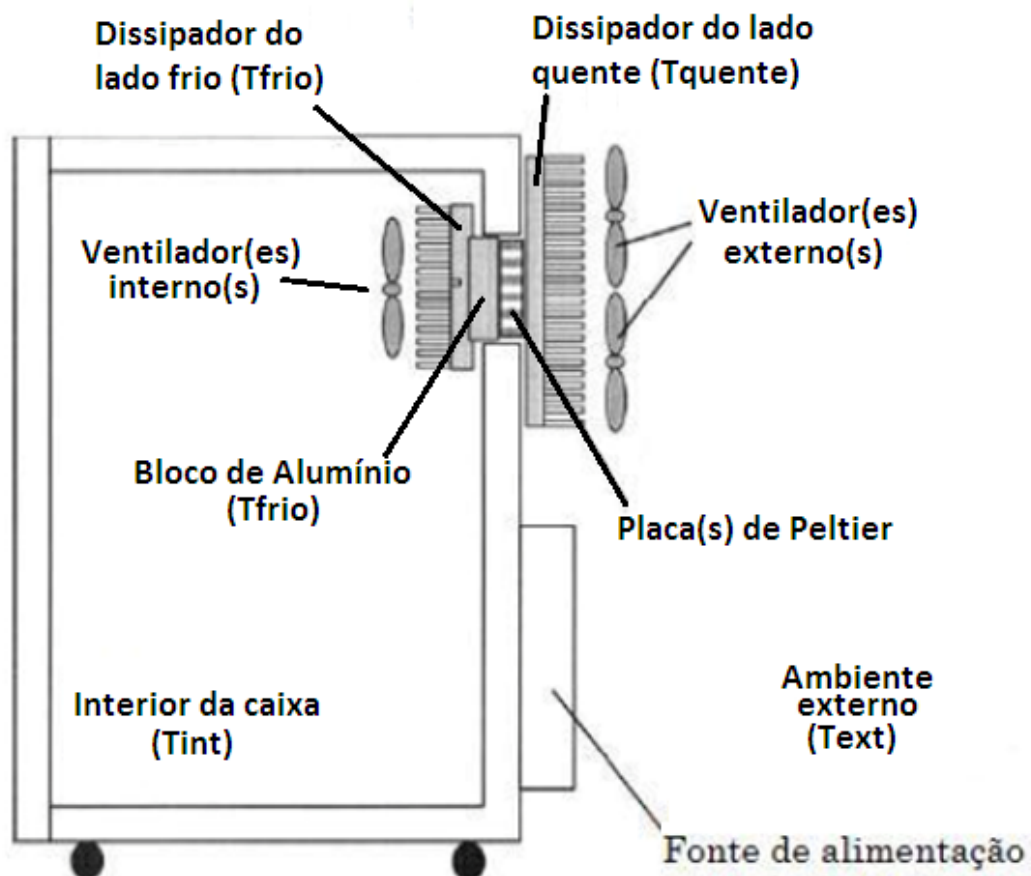


Figura 2.3. Modelo de refrigerador termoelétrico (Souza, 2007)

2.5 REFRIGERADOR E RENDIMENTO DE CARNOT

A máquina térmica ideal de Carnot é um modelo hipotético criado pelo físico e engenheiro francês Nicolas Leonard Sadi Carnot. Sua importância para essa área da termodinâmica é que nenhuma máquina térmica real que opere entre duas fontes térmicas de temperaturas diferentes pode ter uma eficiência maior que a máquina térmica de Carnot operando entre estas mesmas temperaturas (Núcleo de Construção de Objetos de Aprendizagem da UFPB (NOA/UFPB), 2016).

Por essa razão, esse modelo teórico é amplamente utilizado como parâmetro para a análise do rendimento de máquinas térmicas reais. Ele também pode ser usado da mesma forma para sistemas de refrigeração visto que estes também funcionam pelo mesmo princípio, mas operando no sentido inverso do chamado ciclo de Carnot, que é representado na Figura 2.4 em um gráfico de Temperatura por Entropia (T-S).

Nessa figura, são apresentadas os 4 processos reversíveis que compõem o ciclo de Carnot. No caso de um refrigerador, em um dos processos desse ciclo (de D para C), o calor é retirado da fonte fria (T_1) e, em outro processo (de B para A), esse calor é cedido à fonte quente (T_2). Em ambos os demais processos (de A para D e de C para B), não há troca de calor entre as fontes (entropia constante).

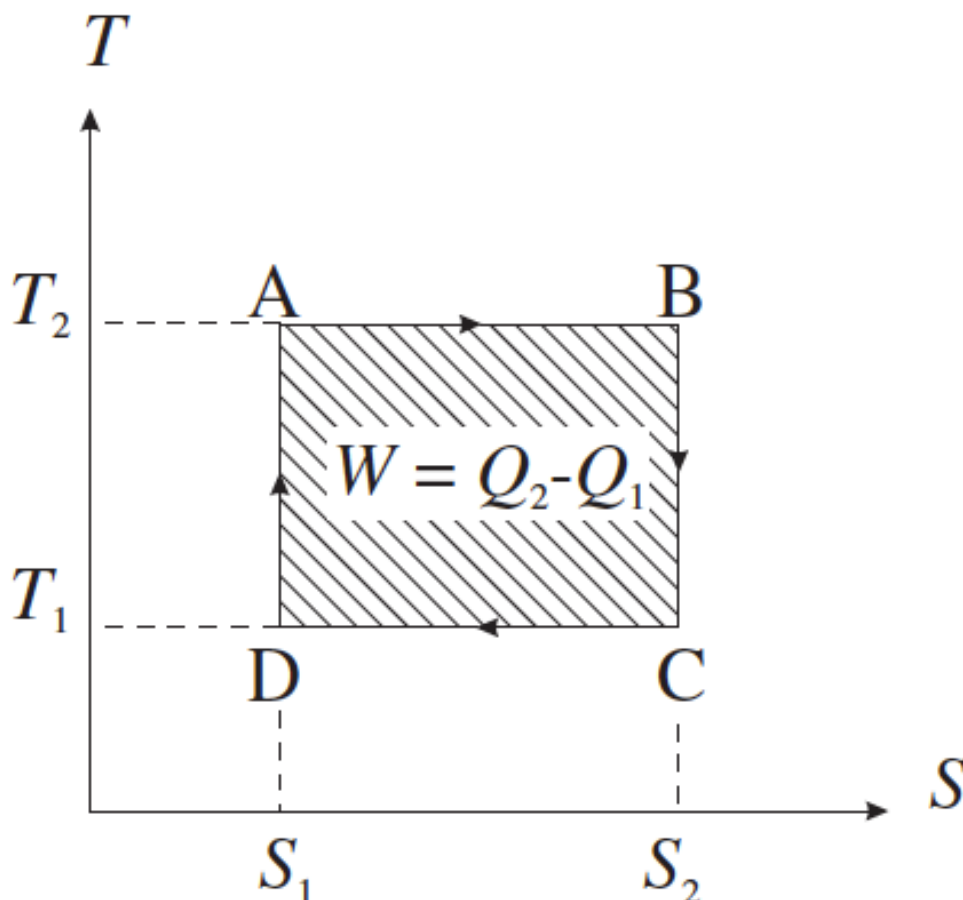


Figura 2.4. Ciclo de Carnot no plano T-S para uma máquina térmica (Fortes, 2009)

Como já citado anteriormente, a Equipamentos Danvic (2015) e Macagnan (2015) argumentam a respeito do baixo rendimento alcançado com sistema de refrigeração usando placas de Peltier, razão pela qual esse tipo de sistema ainda não pode substituir os demais métodos de refrigeração apesar de suas vantagens também já descritas acima.

Souza (2007) ressalta essa diferença com a Figura 2.5, que compara o rendimento com relação ao refrigerador ideal de Carnot para dois sistemas de refrigeração, sendo um o termoelétrico e o outro de compressão a vapor:

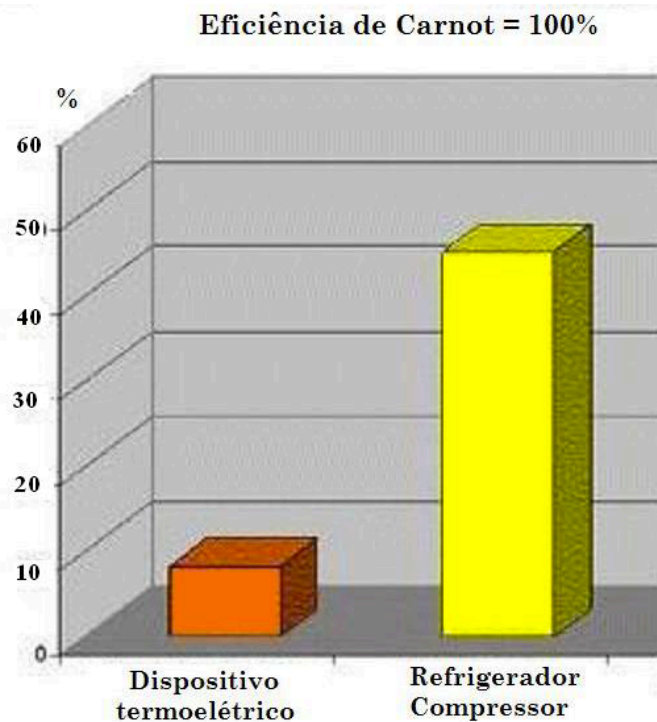


Figura 2.5. Comparação do rendimento de Carnot (Souza, 2007)

Em termos práticos e de acordo com o NOA/UFPB (2016), o valor do rendimento de Carnot para o refrigerador termoelétrico pode ser calculado usando a Equação 2.1, onde as temperaturas são usadas em graus Kelvin (temperatura absoluta):

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{frio}}}{T_{\text{quente}}} = \frac{T_{\text{quente}} - T_{\text{frio}}}{T_{\text{quente}}} \quad (2.1)$$

Além desse rendimento em relação à máquina ideal de Carnot, no caso de um refrigerador, existe também o chamado coeficiente de performance de refrigeração (COP). E, segundo o NOA/UFPB (2016), o valor desse COP pode ser calculado pela Equação 2.2, onde as temperaturas também estão em valores absolutos, ou seja, em graus Kelvin:

$$\text{COP} = \frac{T_{\text{frio}}}{T_{\text{quente}} - T_{\text{frio}}} \quad (2.2)$$

2.6 ERROS E PROPAGAÇÃO DE ERROS EXPERIMENTAIS

“Uma medida indireta de uma grandeza é efetuada através de uma série de medidas diretas de grandezas que se relacionam matematicamente com a grandeza em questão. Erros estão associados às grandezas medidas e vão se acumulando com as manipulações matemáticas das grandezas envolvidas. O estudo da influência dos erros individuais, no resultado das operações matemáticas que fornecem o valor da grandeza medida indiretamente é denominado propagação de erros. Os erros em uma quantidade calculada podem ser determinados a partir dos erros em cada uma das quantidades usadas.” (Instituto de Física da UnB (IF/UnB), 2006).

O IF/UnB (2006) mostra como fazer essa propagação de erros experimentais para diversas operações com variáveis medidas ou calculadas. Para ilustrar isso, considerando que deseja-se calcular uma grandeza $C = c \pm \Delta C$ como um resultado de outras duas grandezas já conhecidas $A = a \pm \Delta A$ e $B = b \pm \Delta B$, pode-se utilizar a seguinte lista de operações para calcular a propagação de erros:

- Adição ($C = A + B$; $c = a + b$):

$$\Delta C = \Delta A + \Delta B \quad (2.3)$$

- Subtração ($C = A - B$; $c = a - b$):

$$\Delta C = \Delta A + \Delta B \quad (2.4)$$

- Multiplicação ($C = A \cdot B$; $c = a \cdot b$):

$$\frac{\Delta C}{c} = \frac{\Delta A}{a} + \frac{\Delta B}{b} \quad (2.5)$$

- Divisão ($C = A/B$; $c = a/b$):

$$\frac{\Delta C}{c} = \frac{\Delta A}{a} + \frac{\Delta B}{b} \quad (2.6)$$

- Função com uma variável ($C = f(A)$; $c = f(a)$):

$$\Delta C = \left| \frac{df}{dA} \right|_{A=a} \cdot \Delta a \quad (2.7)$$

- Função com duas ou mais variáveis ($C = g(A, B, \dots)$; $c = g(a, b, \dots)$):

$$\Delta C = \left| \frac{\delta g}{\delta A} \right|_{A=a} \cdot \Delta A + \left| \frac{\delta g}{\delta B} \right|_{B=b} \cdot \Delta B + \dots \quad (2.8)$$

CAPÍTULO 3 – PROTÓTIPO

Este capítulo mostra a primeira etapa desse trabalho com o desenvolvimento de um protótipo de refrigerador termoelétrico seguindo o modelo apresentado na Seção 2.4 usando 2 placas de Peltier postas lado a lado. Nele, são descritos os materiais usados tanto para o sistema em si quanto para as medições, o procedimento de montagem, os testes realizados para obtenção dos dados (Anexo IV) e os gráficos obtidos desses resultados comparando o sistema montado com o esperado de acordo com a especificação do fabricante das placas (Anexo I).

3.1 MATERIAIS

Para a primeira etapa desse trabalho, foi montado um protótipo do sistema de refrigeração. Para tal, foram utilizados os seguintes materiais:

- Sistema de refrigeração (caixa)
 - 1 Caixa de isopor 5.2L (225x133x154mm)
 - Espessura das paredes: 15mm
 - 1 Fonte de computador
 - Tensões disponíveis: -12,0V / -5,0V / 3,3V / 5,0V / 12,0V
 - 2 Placas Peltier (HB Corporation modelo TEC-12706)
 - Valores máximos segundo “Datasheet” (Anexo I): 14,4V/6,4A
 - 4 Ventiladores para computador (12V/0,14A)
 - 1 Dissipador de calor de Alumínio 105x101x25mm (lado externo)
 - Área de contato (placas): 105x101mm
 - Área de contato (meio externo): 25187mm²
 - 1 Dissipador de calor de Alumínio 89x56x20mm (lado interno)
 - Área de contato (placas): 45x89mm
 - Área de contato (meio externo): 23443mm²
 - 1 Bloco alumínio (29x39x79mm)
 - Pasta térmica (PTI-G3006)
 - Fios e conectores
- Sistema de medição
 - 1 Multímetro digital (Yehai modelo YH-111)
 - Gradação: 0.01 [V ou A ou kΩ]
 - 1 Termistor com coeficiente de temperatura negativo (NTC) (10kΩ a 25°C):

$$T(Rt[\Omega])[^{\circ}C] = 234,42 - 22,656 \cdot \ln(Rt) \quad (3.1)$$

- 1 Termômetro de mercúrio
 - Escala: de -10 a 210°C
 - Gradação: 2°C
- Fios e conectores

3.2 MONTAGEM

Essa seção apresenta como foi o processo para montar o protótipo do sistema de refrigeração. E são apresentadas, ao final dessa seção, algumas imagens desse protótipo.

As 2 pastilhas termoelétricas utilizadas foram postas lado a lado, estando, dessa forma, ligadas termicamente em paralelo. Nessa configuração, o fluxo de calor entre o lado quente e o lado frio de cada placa atua de maneira independente uma placa da outra. E eletricamente, as placas foram conectadas em série. Dessa maneira, as placas foram postas como uma única placa de mesma espessura porém com o dobro da área de contato.

Tendo em mente o uso de um conjunto dissipador/ventilador tanto do lado quente quanto do lado frio das placas (Leismann et al, 2007; Souza, 2007), o protótipo do sistema com as duas placas usadas nessa etapa do trabalho foi montado da seguinte forma:

Do lado quente das placas, foi utilizado o dissipador com maior área de superfície em conjunto com 3 dos ventiladores disponíveis. Foram usados 3 ventiladores para aumentar o fluxo de ar pelo dissipador porque apesar de esse dissipador ocupar um certo volume este possui poucas aletas, o que aumenta em pouco a sua área de superfície em contato com o ar externo.

Com essa configuração esperou-se obter o máximo potencial de resfriamento do lado quente com as peças disponíveis, o que, por consequência, causaria uma queda na temperatura do lado frio das placas, aumentando o potencial de resfriamento.

Do lado frio, foram utilizados o dissipador e o ventilador que sobraram em conjunto com o bloco de alumínio, cujo propósito foi de criar um espaço entre o ventilador e a parede interna da caixa de isopor, favorecendo o fluxo de ar dentro da caixa e, consequentemente, a troca de calor entre o ar e o dissipador. Além disso, o bloco de alumínio serviu também para preencher o espaço da espessura da parede de isopor, de modo que o lado quente das placas ficasse fora do isopor.

Além disso, foi feito uso de uma pasta térmica entre as placas, os dissipadores e o bloco de alumínio para impedir a presença de espaços com ar entre suas superfícies, algo que prejudicaria a transferência de calor por condução visto que o ar é um mau condutor de calor (Souza, 2007).

A Figura 3.1 apresenta um desenho esquemático desse protótipo de sistema de refrigeração proposto, baseado em um modelo apresentado por Riberi & Strazza (2004). E o protótipo montado é mostrado na Figura 3.2 e ele adaptado à caixa de isopor é mostrado na Figura 3.3.

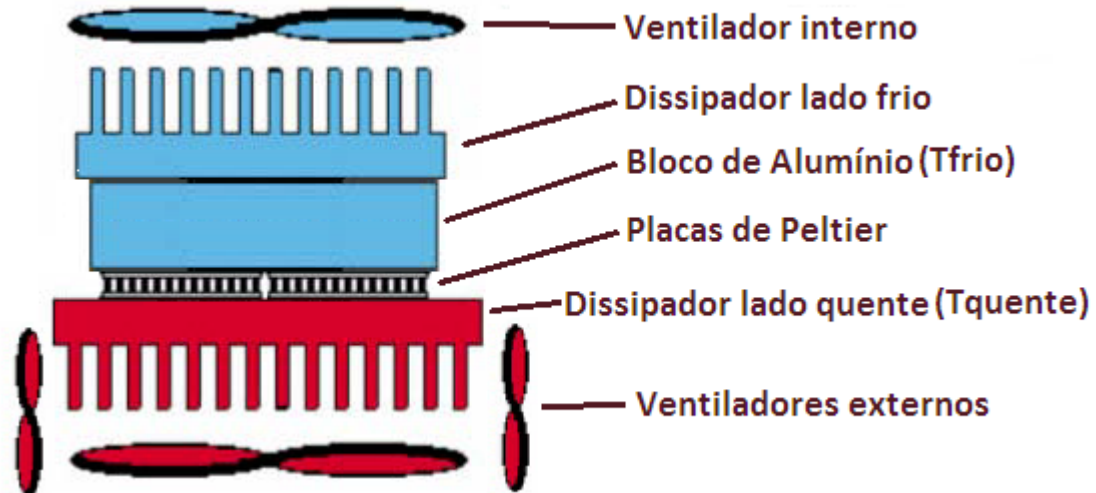


Figura 3.1. Desenho esquemático do protótipo (Riberi & Strazza, 2004)

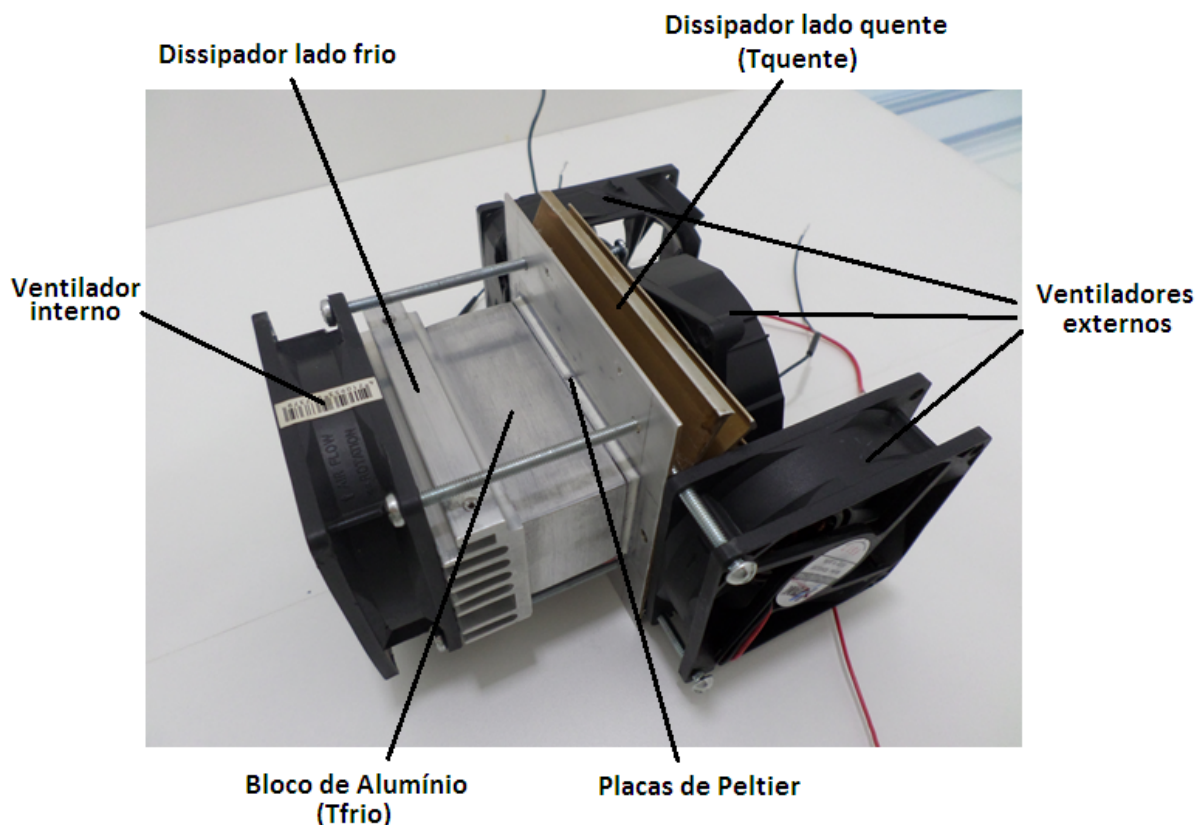


Figura 3.2. Protótipo de sistema de refrigeração com 2 pastilhas termoelétricas

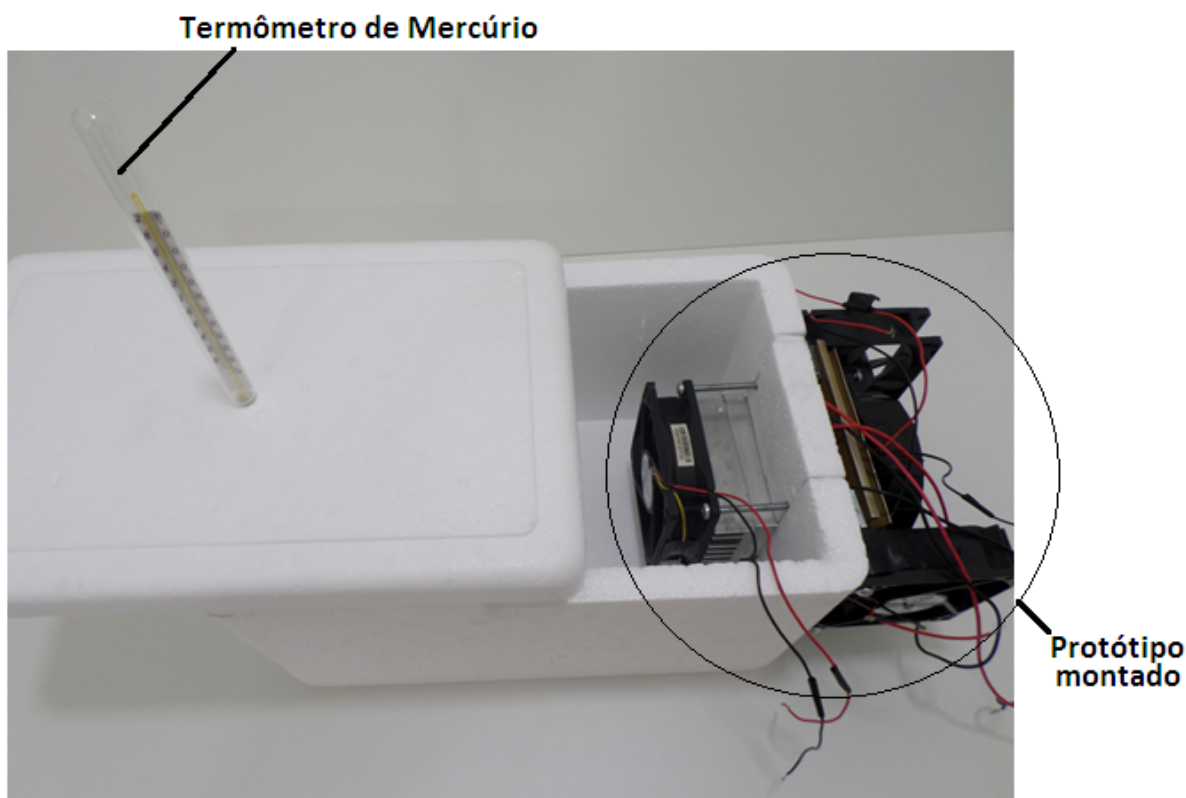


Figura 3.3. Sistema adaptado à caixa de isopor de 5,2 litros

3.3 MEDIÇÕES

Essa seção apresenta como os materiais descritos na Seção 3.1 foram usados para fazer as medições das grandezas elétricas e térmicas envolvidas no protótipo montado. Em seguida, ela apresenta brevemente a sequência de passos seguidos para a coleta de dados. Os resultados desse experimento estão presentes no Anexo IV.

O multímetro foi ligado às placas para medir tanto a tensão elétrica sobre elas quanto a corrente fluindo pelo circuito, lembrando que as pastilhas foram conectadas eletricamente em série.

O termistor NTC foi usado em conjunto com o multímetro para a obtenção dos valores para as temperaturas externa e interna da caixa de isopor e também para as temperaturas dos lados quente e frio das placas. Nesses casos, o multímetro foi usado para medir a resistência do termistor e com esse valor foram calculadas as temperaturas através da Equação 3.1. Essa equação foi obtida de uma calibração feita no sensor NTC durante um outro experimento usando um sensor AD590 como parâmetro. Os valores dessa calibração estão presentes na Tabela III.1.

Já o termômetro de mercúrio foi utilizado apenas para monitorar a redução da temperatura interna da caixa durante o experimento até essa temperatura se estabilizar e daí era usado para verificar a temperatura externa durante cada etapa do experimento.

Quanto ao procedimento para o experimento, usando a fonte de computador, foi possível obter diferentes valores de tensão de alimentação para as placas combinando as tensões disponíveis:

- +3,3V – 0,0V -> 3,3V
- +5,0V – 0,0V -> 5,0V
- +3,3V – (-5,0V) -> 8,3V
- +5,0V – (-5,0V) -> 10,0V
- +12,0V – 0,0V -> 12,0V
- +3,3V – (-12,0V) -> 15,3V
- +12,0V – (-5,0V) -> 17,0V
- +12,0V – (-12,0V) -> 24,0V

Como primeiro passo, antes de ligar as placas à fonte de computador, foram utilizados o termistor NTC em conjunto com o multímetro para medir a temperatura externa da caixa.

Com essa primeira medição feita foi realizado o seguinte experimento de coleta dos dados para cada um desses valores de tensão de alimentação descritos acima:

O multímetro era conectado em série com as placas para medir a corrente elétrica fluindo por elas e o termistor NTC ficava dentro da caixa com os fios para fora da caixa, de forma que não era preciso abrir a caixa para ter acesso a esses fios.

Depois de um certo tempo (cerca de 30 minutos após o início de cada teste), era aguardado até que a temperatura interna chegasse ao valor mínimo para aquela tensão de alimentação, ou seja, quando não era mais notada uma redução significativa da temperatura dentro da caixa medida pelo termômetro de mercúrio.

A ligação em série do multímetro com as placas era desfeita e era então substituída por uma ligação em paralelo para medir a tensão elétrica sobre as placas (lembrando que, ao desfazer a ligação em série, as placas eram religadas à fonte, então ainda havia corrente fluindo por elas).

Feita mais essa medição, o multímetro era então usado para medir o valor da resistência do termistor NTC, obtendo-se dessa forma a temperatura interna da caixa através da Equação 3.1.

E esse mesmo procedimento usando o termistor ligado ao multímetro era repetido tanto para a temperatura do lado frio quanto do lado quente das placas, nos quais o termistor era posto em contato com o corpo metálico mais próximo das placas por alguns minutos (cerca de 5 minutos). Nesse caso, os corpos metálicos eram o bloco de alumínio do lado frio e o dissipador de calor do lado quente.

Quanto às incertezas das medições, as grandezas medidas que foram medidas com o multímetro apresentam uma incerteza igual à gradação do multímetro, que, nesse caso, possui o valor de 0,01 [V ou A ou kΩ].

E, ao mesmo tempo que eram feitas essas medições com o termistor e o multímetro, o termômetro de mercúrio era usado para medir a temperatura ambiente, ou seja, externa da caixa. Mas como durante as etapas do teste (diferentes tensões de alimentação) não houve uma grande mudança da temperatura ambiente, foi assumido o mesmo valor médio para as diferentes etapas do experimento com uma incerteza de 1°C para mais ou para menos.

As demais incertezas dos resultados foram calculadas usando os princípios descritos na Seção 2.6, que trata justamente dessa questão. Esses erros estão registrados tanto nas Tabelas IV.1 e IV.2 quanto marcadas nos gráficos da seção seguinte (Seção 3.4).

Com os resultados obtidos utilizando esse protótipo, mostrados no Anexo IV, foram então construídos os gráficos apresentados na seção destinada aos resultados dessa etapa (Seção 3.4). Além disso, os valores estimados segundo a especificação do fabricante das placas foram calculados para comparação.

Por fim, vale lembrar que os ventiladores de computador usados funcionam sob a tensão de alimentação de 12V, portanto, em todos os testes feitos, estes ventiladores foram ligados em paralelo à tensão de 12V fornecida pela fonte.

3.4 RESULTADOS

Nessa seção, são apresentados, na forma de gráficos, os resultados obtidos com o protótipo montado usando 2 células de Peltier. Além disso, esses resultados são comparados com os valores estimados segundo as especificações do “Datasheet” (Anexo 1) para 2 placas de Peltier ligadas eletricamente em série, ou seja, na mesma configuração.

Dos gráficos abaixo, pode-se observar que o comportamento do protótipo montado foi semelhante ao comportamento esperado segundo os valores de especificação das placas de acordo com o “Datasheet” (Anexo I). A diferença entre os dois foi com relação aos valores obtidos considerando ambos sendo alimentados por uma mesma tensão de alimentação.

Além disso, pode-se observar também que os valores das tensões medidas não exatamente os valores esperados pela combinação das tensões fornecidas pela fonte de computador. As tensões medidas sempre apresentam um valor real um pouco menor devido a alguma perda de tensão que ocorre dentro do próprio sistema da fonte.

Primeiramente, da Figura 3.4, pode-se observar a maneira como a potência aumenta conforme a tensão de alimentação conectada aos módulos aumenta. Além disso, comparando o resultado experimental com o calculado usando as especificações das placas, nota-se que a potência fornecida na realidade foi menor do que esperado.

Nessa mesma figura (Figura 3.4), também nota-se que a diferença entre os valores obtidos no experimento e os valores calculados pelos dados do “datasheet” aumentam conforme a tensão de alimentação aumenta. E, visto que as placas de Peltier se comportam eletricamente como resistências elétricas, valendo então a relação da Equação 3.2, essa discrepância provavelmente se deve ao fato de a resistência elétrica das placas de Peltier no experimento ter um valor de resistência maior do que o esperado pela especificação do fabricante.

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3.2)$$

Outra evidência dessa diferença no valor da resistência elétrica pode ser verificada ao comparar os valores de corrente elétrica fluindo pelas placas (Tabela IV.1). No caso do experimento com o protótipo, os valores de corrente medidos foram menores do que os calculados com os dados do fabricante (Tabela I.1). Isso, para uma mesma tensão de alimentação, implica em uma maior resistência elétrica, segundo a Equação 3.3 abaixo:

$$V = R \cdot i \quad (3.3)$$

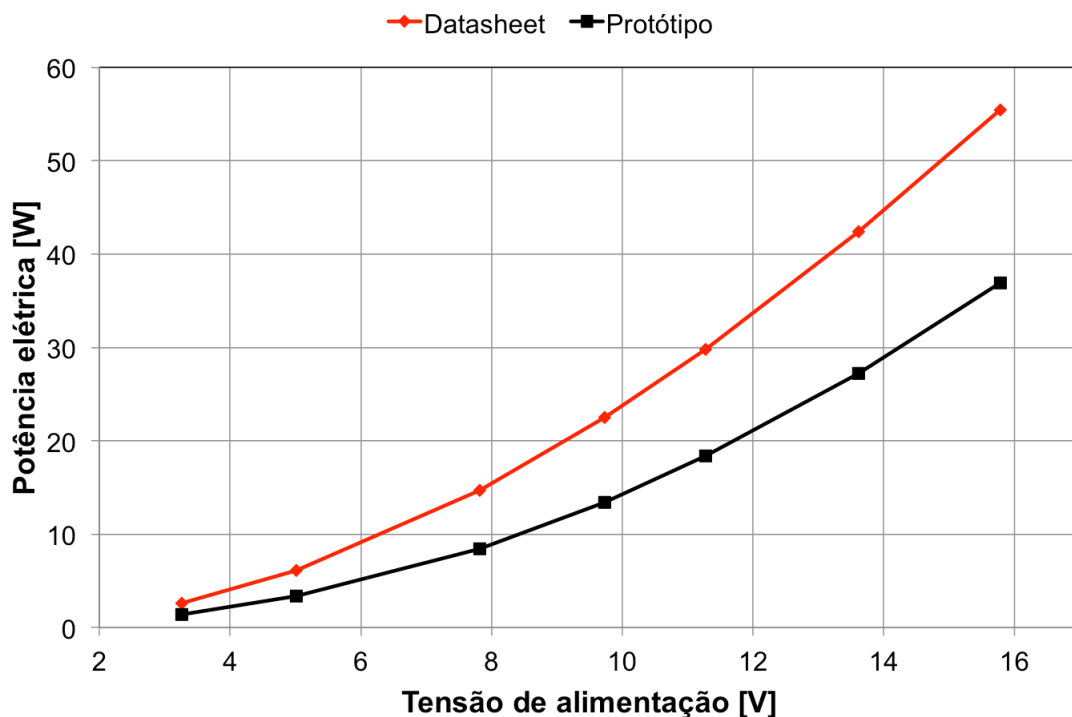


Figura 3.4. Potência elétrica x Tensão de alimentação

Essa diferença observada para a potência acaba refletindo na diferença de temperatura entre os lados das placas, como pode ser observado na Figura 3.5, na qual o protótipo obteve valores mais baixos do que o esperado segundo o fabricante das pastilhas. E pode-se notar também que essa diferença progride conforme uma curva que se aproxima bastante de uma linha reta.

E, visto que existe essa relação direta entre a potência elétrica fornecida às placas e a diferença de temperatura entre os lados das mesmas, o aumento da tensão elétrica sobre as placas tende a aumentar a diferença entre as duas curvas no gráfico da Figura 3.5.

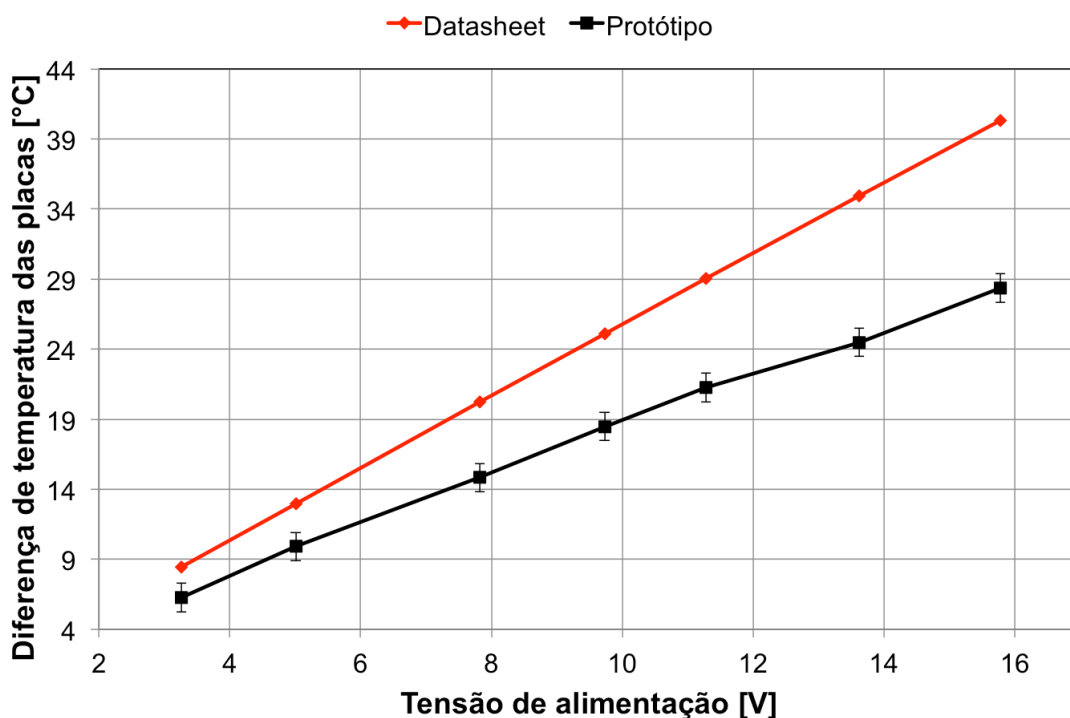


Figura 3.5. Diferença de temperatura entre os lados das placas x Tensão de alimentação

Por uma análise das Figuras 3.6 e 3.7, verifica-se que, por um lado, a temperatura do lado frio das placas tende a um valor limite conforme a tensão de alimentação aumenta, ou seja, quando a potência fornecida aumenta. E pelo outro lado, a temperatura do lado quente das placas cresce indefinidamente com o mesmo aumento da tensão de alimentação.

Isso mostra que, apesar do valor da diferença da temperatura aumentar com o aumento da tensão, o potencial de resfriamento do sistema chega a um limite, ou seja, um aumento indefinido da potência elétrica fornecida não acarreta em uma temperatura mais baixa do lado frio, mas sim em um aumento cada vez mais intenso da temperatura do lado quente, o que acabaria resultar na queima dos dispositivos termoeletrônicos.

Nesses gráficos (Figuras 3.6 e 3.7), mais uma vez, é observada a discrepância entre os dois sistemas com o aumento da tensão elétrica sobre as placas, que tende a aumentar a diferença entre as curvas nos gráficos.

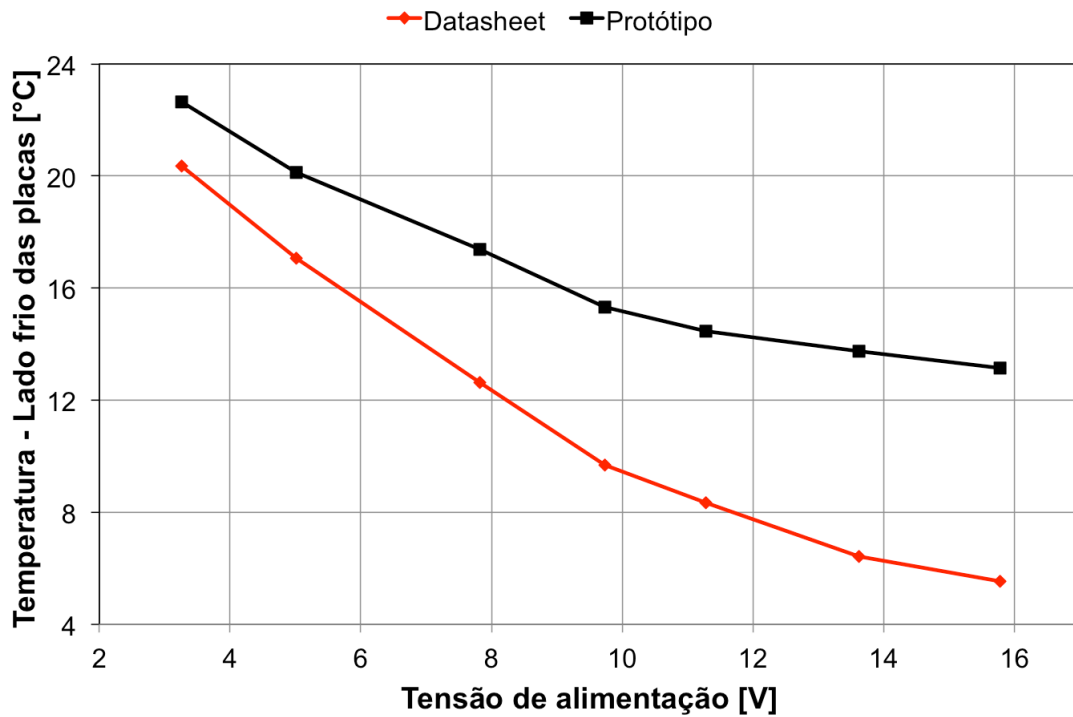


Figura 3.6. Temperatura do lado frio das placas x Tensão de alimentação

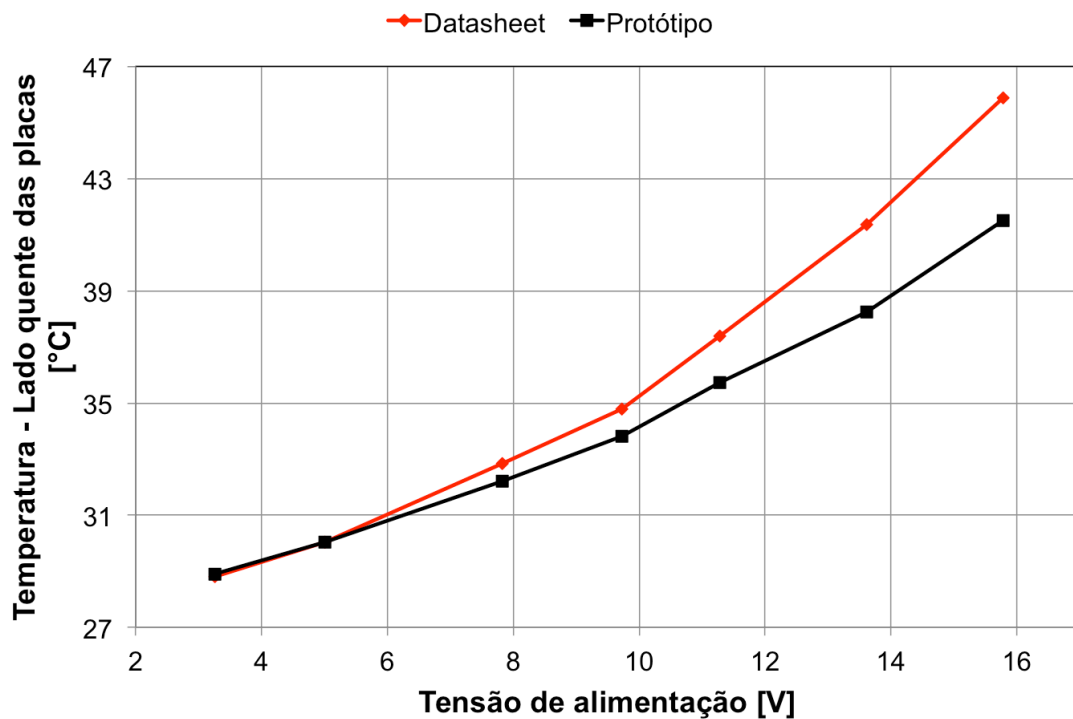


Figura 3.7. Temperatura do lado quente das placas x Tensão de alimentação

A Figura 3.8 ressalta o que já foi observado da análise da Figura 3.5, mas dando um foco maior na relação com corrente elétrica fluindo pelas placas usadas no protótipo. Isso também reforça a característica desses dispositivos de se comportar como resistências elétricas visto que a curva apresenta a mesma forma.

Além disso, percebe-se que o comportamento do sistema seguiu, levando em conta as incertezas das medições feitas, o esperado de acordo com a teoria apresentada por Leismann et al (2007) de que existe uma relação de proporcionalidade entre a corrente elétrica que percorre as placas e a diferença de temperatura resultante entre os lados quente e frio das placas, ou seja, a curva no gráfico pode ser aproximada por uma linha reta.

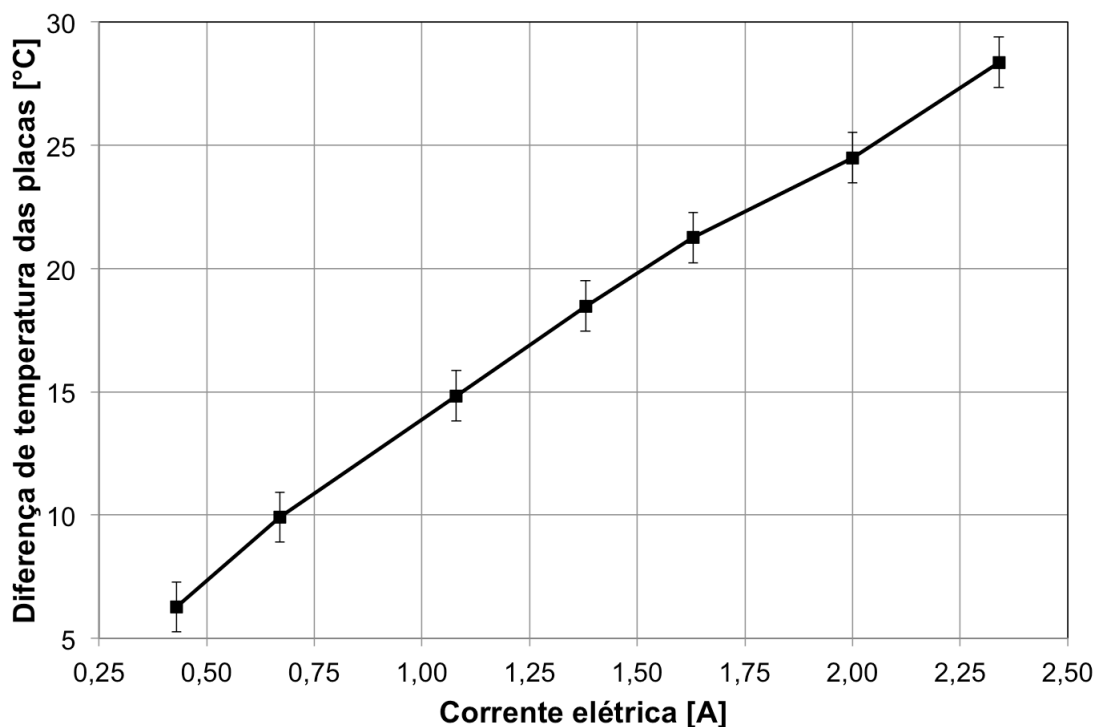


Figura 3.8. Diferença de temperatura entre os lados das placas x Corrente elétrica

Da Figura 3.9, observa-se o comportamento da eficiência energética dos sistemas, ou seja, a relação que existe entre a diferença de temperatura das partes interna e externa da caixa de isopor e a potência elétrica fornecida aos módulos. Daí pode-se confirmar a análise feita das Figuras 3.5 a 3.7 com relação à queda dessa eficiência com o aumento da potência uma vez que a temperatura interna da caixa tem uma relação direta com a temperatura do lado frio dos dispositivos termoelétricos.

Nessa mesma figura (Figura 3.9), o comportamento das curvas é diferente do observado anteriormente ao comparar as duas curvas. Nesse caso, o aumento da tensão elétrica sobre as placas tende a aproximar os valores da razão entre a diferença de temperatura das placas e a potência elétrica fornecida. Então, pode-se notar que, nesse aspecto, o comportamento do protótipo se aproxima do esperado pela especificação do fabricante das pastilhas. E, considerando as incertezas, esses valores podem ser ainda mais próximos.

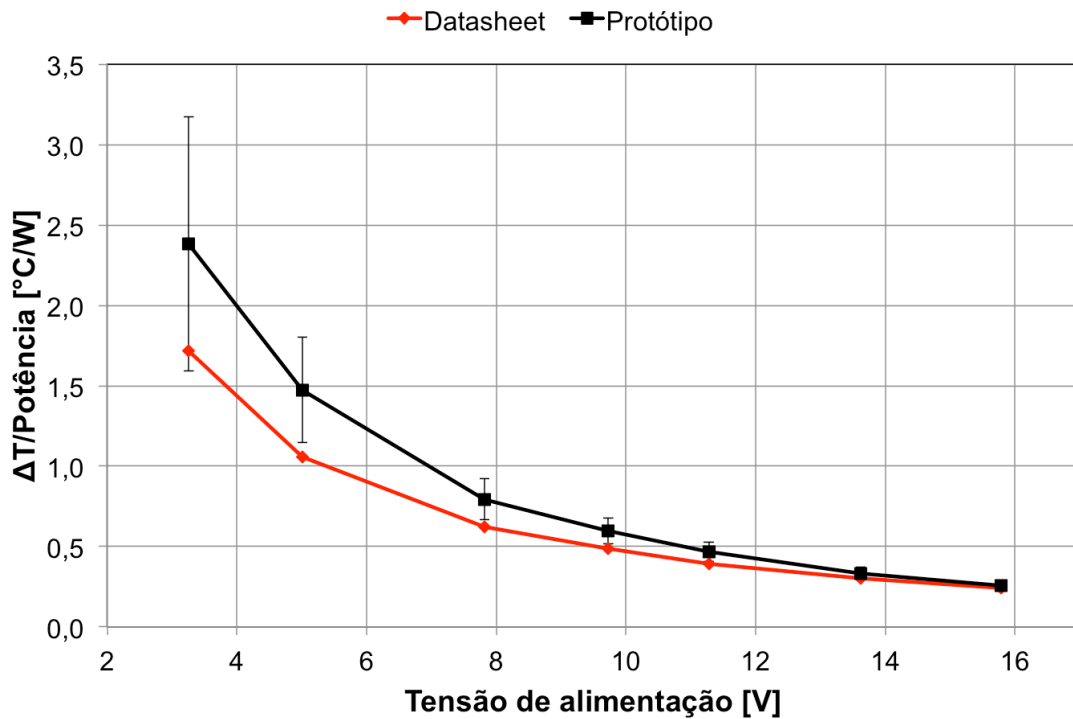


Figura 3.9. Eficiência energética x Tensão de alimentação

Já na Figura 3.10, observa-se o rendimento desses dois sistemas (“datasheet” e protótipo) quando comparados com o refrigerador ideal de Carnot levando em conta os valores alcançados das temperaturas dos lados quente e frio das placas de Peltier, sendo esse resultado calculado usando a Equação 2.5. Daí, confirma-se o que é dito a respeito do baixo valor desse rendimento para esse tipo de refrigerador, com valores menores de 10%.

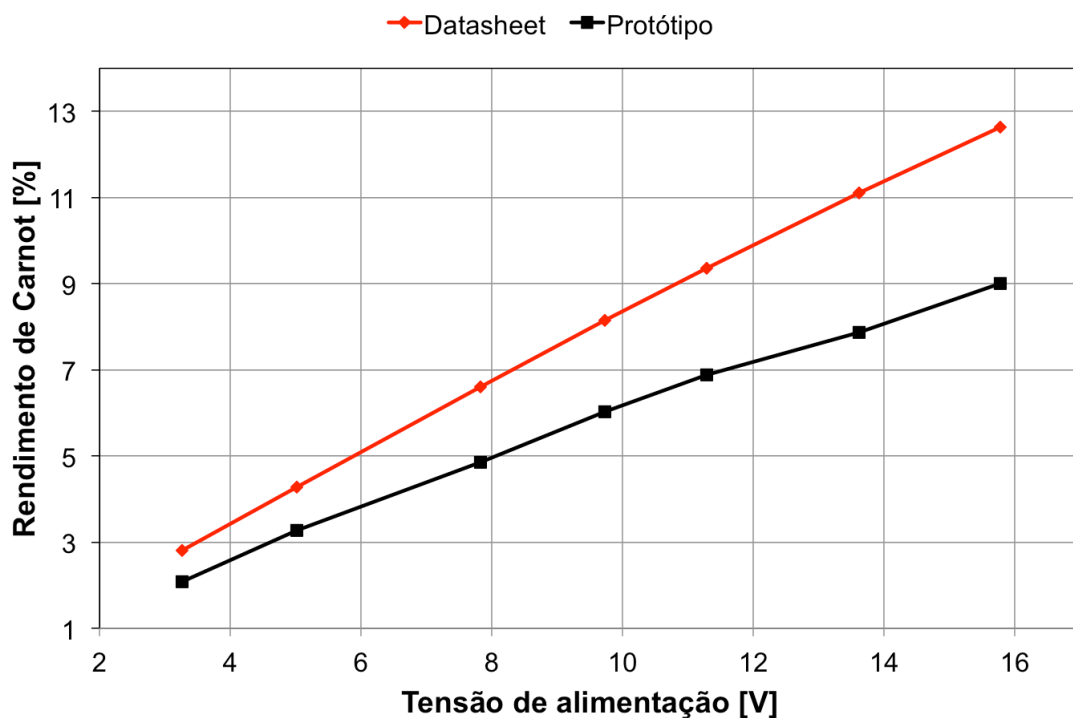


Figura 3.10. Rendimento de Carnot x Tensão de alimentação

Enfim, na Figura 3.11, observa-se o valor do coeficiente de performance (COP) dos dois sistemas (“datasheet” e protótipo), calculados pela Equação 2.6. Nesse gráfico, pode-se notar que o COP do protótipo apresentou valores maiores do que os esperados pelo fabricante. E pode-se notar que, conforme a tensão de alimentação aumenta, o valor do COP descrece, tendo um comportamento semelhante ao observado para a temperatura do lado frio das pastilhas (Figura 3.6).

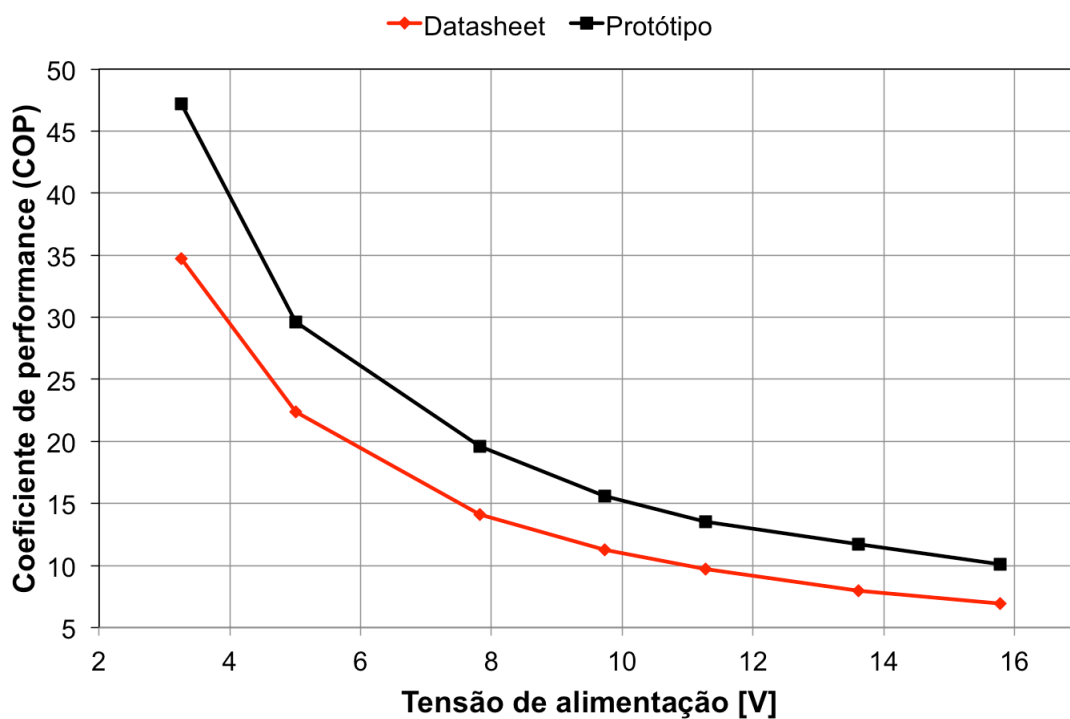


Figura 3.11. Coeficiente de performance x Tensão de alimentação

CAPÍTULO 4 – SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Este capítulo mostra como foi feita a reconstrução do sistema usando novas peças. Nele, são novamente descritos os materiais usados, o procedimento de montagem com diferentes configurações (diferentes números de placas), os testes realizados para obtenção dos dados (Anexo VI) e os gráficos obtidos desses resultados. Adicionalmente, foi feito um teste adicional para analisar o comportamento do transitório da diferença de temperatura da caixa dentro do período de 1 hora.

4.1 MATERIAIS

Para a montagem do sistema de refrigeração, foi utilizada uma lista de materiais semelhante à descrita na Seção 3.1. Contudo, algumas peças foram trocadas tanto para melhorar a estrutura e o desempenho do sistema quanto para tornar o procedimento de medição mais rápido e simples:

- Sistema de refrigeração (caixa)
 - 1 Caixa de isopor 5,15L (255x153x132mm)
 - Espessura das paredes: 15mm
 - 1 Fonte de computador
 - Tensões disponíveis: -12,0V / -5,0V / 3,3V / 5,0V / 12,0V
 - 1 Fonte de alimentação (12V/2.5A)
 - 10 Placas Peltier (HB Corporation modelo TEC-12706)
 - Valores máximos segundo “Datasheet” (Anexo I): 14,4V/6,4A
 - 1 Dissipador de calor de Alumínio 90x90x15mm (lado externo)
 - Área de contato (placas): 90x90mm
 - Área de contato (meio externo): 77608mm²
 - 1 Dissipador de calor de Alumínio 89x56x20mm (lado interno)
 - Área de contato (placas): 45x89mm
 - Área de contato (meio externo): 23443mm²
 - 2 Ventiladores para computador 80x80x25mm (12V/0,14A)
 - Pasta térmica (Implastec)
 - Fios e conectores
- Sistema de medição
 - 1 Multímetro digital (Yehai modelo YH-111)
 - Gradação: 0,01 [V ou A]
 - 1 Placa Zduino Uno (compatível com software para Arduino)

- 5 Sensores de temperatura (National Semiconductor modelo LM-35)
 - 1 para temperatura externa e 2 para temperatura interna da caixa
 - 1 adaptado ao dissipador quente e 1 adaptado ao dissipador frio
- 1 Protoboard
- 1 Computador com o software para Arduino
- Fios e conectores

4.2 MONTAGEM

Essa seção apresenta como foi o processo para remontar o sistema de refrigeração na segunda etapa do trabalho utilizando novas peças e equipamentos tanto para o refrigerador em si quanto para o sistema de medição. E são apresentadas ao final algumas imagens do sistema montado.

Nessa segunda etapa, foi testada a influência do uso de diferentes números de placas de Peltier no sistema. Para tal, o processo de montagem e teste foi repetido para conjuntos com até 10 pastilhas termoelétricas ligadas todas eletricamente em série, mas dispostas conforme a Figura 4.1:



Figura 4.1. Conjuntos de placas de Peltier

Para cada montagem desse sistema, ainda foi mantido o uso de um conjunto dissipador/ventilador tanto do lado quente quanto do lado frio dos conjuntos de placas de Peltier, seguindo o mesmo modelo descrito por Leismann et al (2007) e Souza (2007):

Do lado quente do conjunto de placas, foi utilizado um novo dissipador de menor volume, mas com uma área de superfície mais bem distribuída e bem maior do que a utilizada no protótipo (cerca de 3 vezes maior).

Por causa de desse aumento da área de contato com o ar externo, o conjunto de 3 ventiladores foi substituído por apenas 1 ventilador, reduzindo ainda mais o volume ocupado pelo conjunto. Essa alteração foi feita com o objetivo de obter um potencial de resfriamento do lado quente melhor do que o obtido anteriormente ocupando um volume menor.

Do lado frio, foi utilizado o mesmo conjunto dissipador/ventilador, mas o bloco de alumínio foi removido, pois foi constatado que esse bloco deixava o sistema mais lento e com maior gasto de energia por se tratar de uma massa considerável de alumínio a mais que precisava ser resfriada.

E, assim como na etapa do protótipo, também foi feito uso de pasta térmica entre as placas e os dissipadores para impedir a presença de espaços com ar entre suas superfícies, pois, como já citado por Souza (2007), essas bolsas de ar prejudicam a transferência de calor por condução entre os componentes do sistema.

A Figura 4.2 apresenta um desenho esquemático do sistema montado durante essa etapa, baseado em um modelo apresentado por Riberi & Strazza (2004). E as Figuras 4.3 e 4.4 mostram o sistema de refrigeração e o sistema de medição montados e adaptados à caixa de isopor de 5,15L.

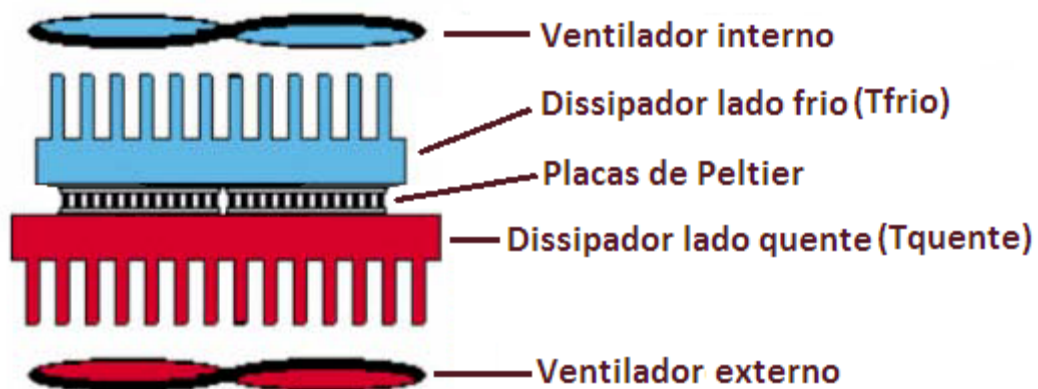


Figura 4.2. Desenho esquemático do sistema de refrigeração (Riberi & Strazza, 2004)

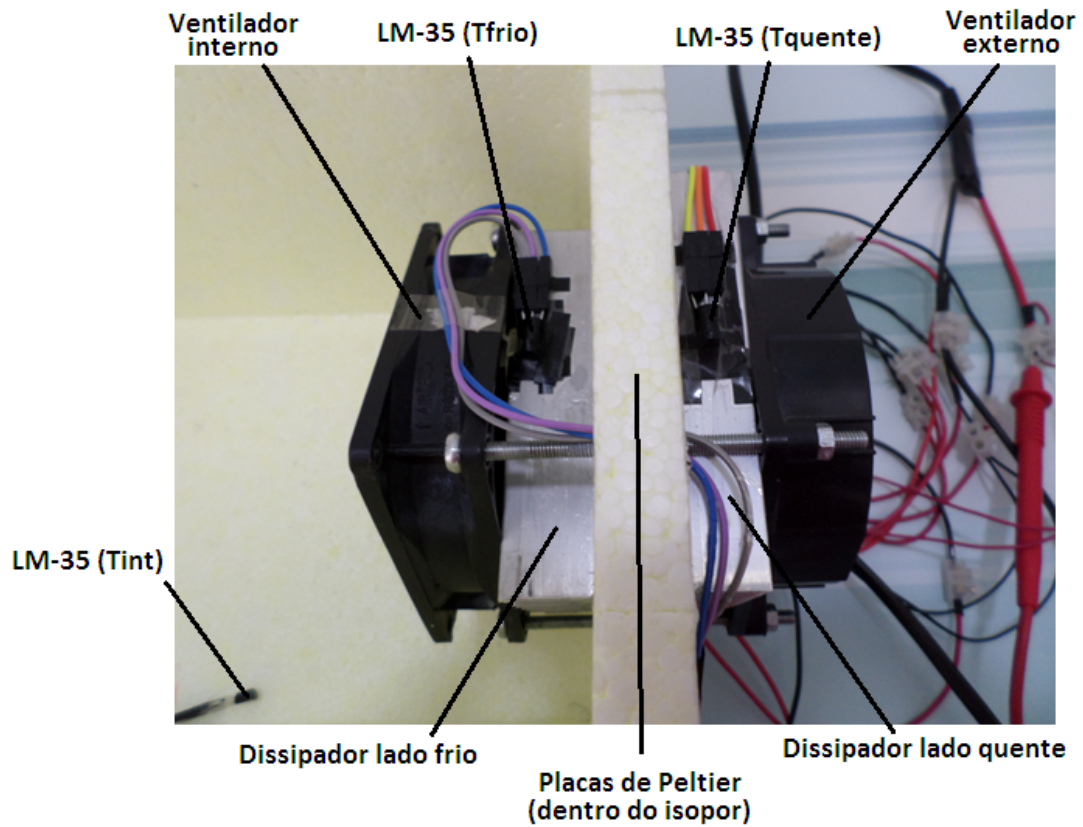


Figura 4.3. Sistema de refrigeração adaptado à caixa de isopor de 5,15 litros

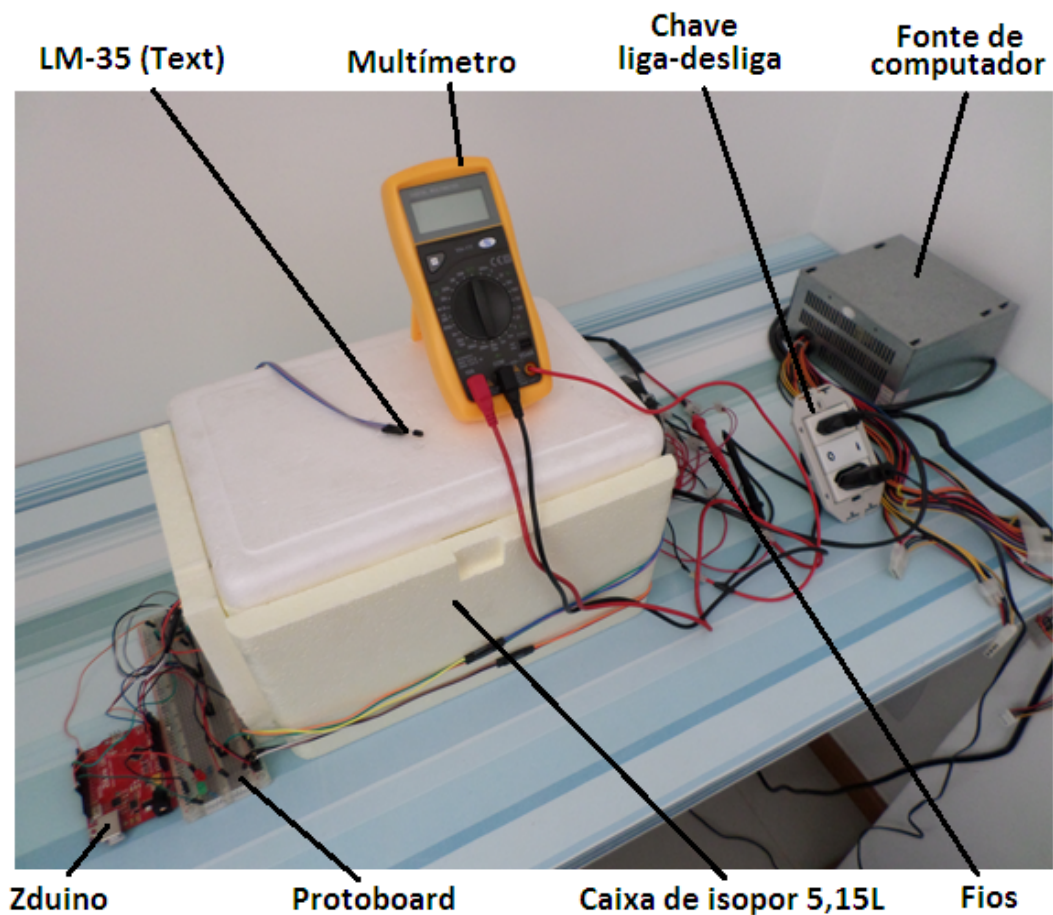


Figura 4.4. Caixa montada com sistema de medição

4.3 MEDIÇÕES (MÚLTIPLAS PLACAS)

Essa seção apresenta como foram feitas as alterações no sistema de medição e no processo para a coleta de dados nessa nova etapa do trabalho com o intuito de facilitar a aquisição dos dados durante os testes que seriam feitos. Em seguida, ela apresenta brevemente o procedimento de coleta de dados para as diferentes configurações testadas (diferentes números de placas). Os resultados desses experimentos estão presentes no Anexo VI.

Primeiramente, o multímetro continuou sendo utilizado para medir tanto a tensão elétrica quanto a corrente fluindo pelas placas. Vale lembrar que, em todas as configurações montadas, as placas usadas foram todas conectadas eletricamente em série. Isso facilitou as medições de tensão e corrente pois todas as pastilhas podiam ser vistas como uma única resistência elétrica sendo alimentada pela fonte de computador.

Contudo, a parte do sistema usada para medir os valores de temperatura foi alterada de modo a facilitar o procedimento de obtenção dos dados. Nesse caso, o termistor NTC foi substituído pelo conjunto composto pelos sensores de temperatura LM-35 e pelo Zduino, que foi então conectado ao computador para a obtenção dos valores para as temperaturas externa e interna da caixa de isopor e também para as temperaturas dos lados quente e frio das placas.

Foram usados ao todo 5 sensores LM-35 dispostos da seguinte forma: 1 foi colocado sobre a tampa da caixa de isopor para medir a temperatura externa; 2 foram postos dentro da caixa para medir a temperatura interna da caixa (foi calculada a média desses 2 sensores); 1 sensor foi colado ao dissipador do lado frio do conjunto de pastilhas termoelétricas para medir a temperatura desse lado; e o último LM-35 foi colado ao dissipador do lado quente para medir sua temperatura.

Nesse trabalho, os sensores LM-35 foram alimentados pelos terminais de 5V e GND da placa Zduino. E o pino de sinal de cada LM-35 foi ligado a uma entrada para leitura de sinal analógico do Zduino (entradas A0, A1, A2, A3 e A4).

Nos testes realizados, a placa Zduino recebeu os dados dos sensores LM-35 e através do código mostrado no Anexo V calculou e mostrou na tela do computador, pelo monitor serial, as temperaturas externa e interna da caixa e as temperaturas dos lados quente e frio das placas. Para o cálculo da temperatura, foi usada a conversão especificada pelo fabricante dos sensores, mostrada na Figura 4.5:

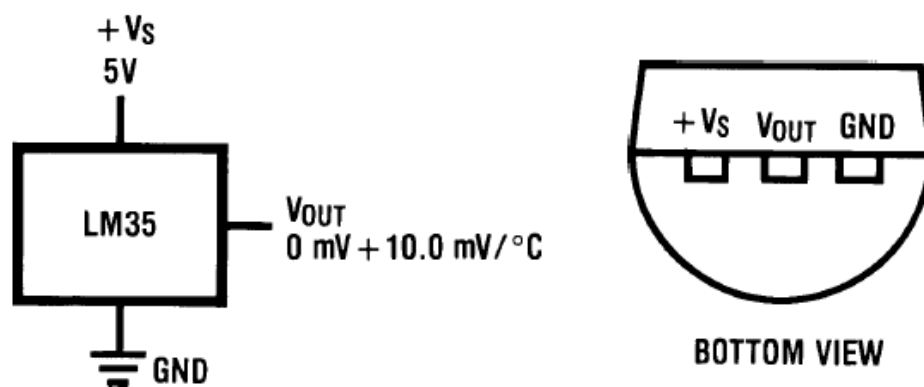


Figura 4.5. Estrutura e pinagem dos sensores LM-35 (National Semiconductors, 2000)

Além disso, para reduzir a influência de possíveis ruídos nos cálculos das temperaturas, o código mostrado no Anexo V usou, para o cálculo das temperaturas, uma técnica de média móvel. Nessa média móvel são registrados os 10 últimos valores lidos pelos sensores. E, para minimizar ainda mais os ruídos, foram desprezados os valores lidos pelos sensores caso a diferença entre estes valores sejam maiores do que 25% do valor atual da média calculada.

Dessa forma, seguindo o mesmo esquema de combinar as tensões fornecidas pela fonte de computador, foram obtidos os dados desse novo sistema para um dos diferentes conjuntos de placas de Peltier ligadas eletricamente em série sendo alimentadas pelas seguintes tensões:

- +3,3V – 0,0V → 3,3V
- +5,0V – 0,0V → 5,0V
- +3,3V – (-5,0V) → 8,3V
- +5,0V – (-5,0V) → 10,0V
- +12,0V – 0,0V → 12,0V
- +3,3V – (-12,0V) → 15,3V
- +12,0V – (-5,0V) → 17,0V
- +12,0V – (-12,0V) → 24,0V

Pela forma como esse novo sistema de medição foi construído, o procedimento de aquisição de dados foi bastante simplificado e bem menos trabalhoso. O procedimento descrito abaixo foi repetido para todas as montagens feitas (todos os conjuntos de pastilhas) para cada um desses valores de tensão de alimentação descritos acima:

As conexões do multímetro para a medição de corrente foram ligadas em série com as placas para medir a corrente elétrica fluindo pelo conjunto e as conexões para a medição de tensão foram conectadas em paralelo com o arranjo de placas.

No entanto, pelo fato de haver o terminal comum entre o voltímetro e o amperímetro do multímetro (COM), a tensão teve de ser medida invertida, ou seja, o valor lido era negativo. Mas isso não altera os valores lidos no teste e permitiu que ambas as medições fossem feitas sem precisar desconectar o multímetro.

Nesses testes, os valores de temperaturas eram acompanhados em tempo real e, quando estas se estabilizavam (cerca de 30 minutos após o início de cada teste), os valores medidos do multímetro e as temperaturas mostradas na tela do computador eram registrados na Tabela VI.1.

Quanto às incertezas das medições, as grandezas medidas que foram medidas com o multímetro apresentam uma incerteza igual à gradação do multímetro, igual a 0,01 [V ou A].

Já com as medições feitas com os sensores LM-35 existe uma incerteza decorrente da aproximação feita durante o processo de conversão analógica-digital devido à função `analogRead`. Segundo Arduino (2016), essa incerteza apresenta o valor de 4,9mV. Esse valor de tensão, combinado à conversão mostrada na Figura 4.5 (relação tensão-temperatura para os sensores LM-35), resulta em uma incerteza de 0,49°C.

E, assim como na etapa do protótipo, as demais incertezas dos resultados foram calculadas usando os princípios descritos na Seção 2.6. Esses erros estão registrados tanto nas Tabelas VI.1 e VI.2 quanto marcadas nos gráficos da seção seguinte (Seção 4.4).

Com os resultados obtidos utilizando o sistema montado com as diversas configurações, mostrados no Anexo VI, foram então construídos os gráficos apresentados na seção destinada aos resultados dessa etapa (Seção 4.4). Esses gráficos tem o objetivo de comparar o desempenho do sistema em função da quantidade de placas usadas.

Por fim, vale lembrar que os ventiladores de computador usados funcionam sob a tensão de alimentação de 12V, portanto, em todos os testes feitos, estes ventiladores foram ligados em paralelo à tensão de 12V fornecida pela fonte.

4.4 RESULTADOS (MÚLTIPLAS PLACAS)

Nessa seção são apresentados, na forma de gráficos, os resultados obtidos dos testes realizados com o sistema de refrigeração termoelétrica nas diferentes configurações utilizadas, ou seja, para diferentes números de placas.

Para questão de comparação, foram usados como parâmetro os resultados obtidos para a tensão de alimentação de 12V, pois essa é a tensão mais convencional em baterias de automóveis visto que a aplicação em uma situação de transporte de produtos é uma das motivações desse trabalho.

Primeiramente, da Figura 4.6, nota-se que um aumento no número de placas utilizadas leva a uma redução da potência elétrica fornecida ao sistema. Isso era o esperado pois uma vez que as placas são ligadas eletricamente em série sendo que estas possuem um comportamento elétrico resistivo, há uma redução da corrente elétrica que flui pelas placas para uma mesma tensão de alimentação, o que reduz a potência já que esta é o resultado do produto da tensão com a corrente.

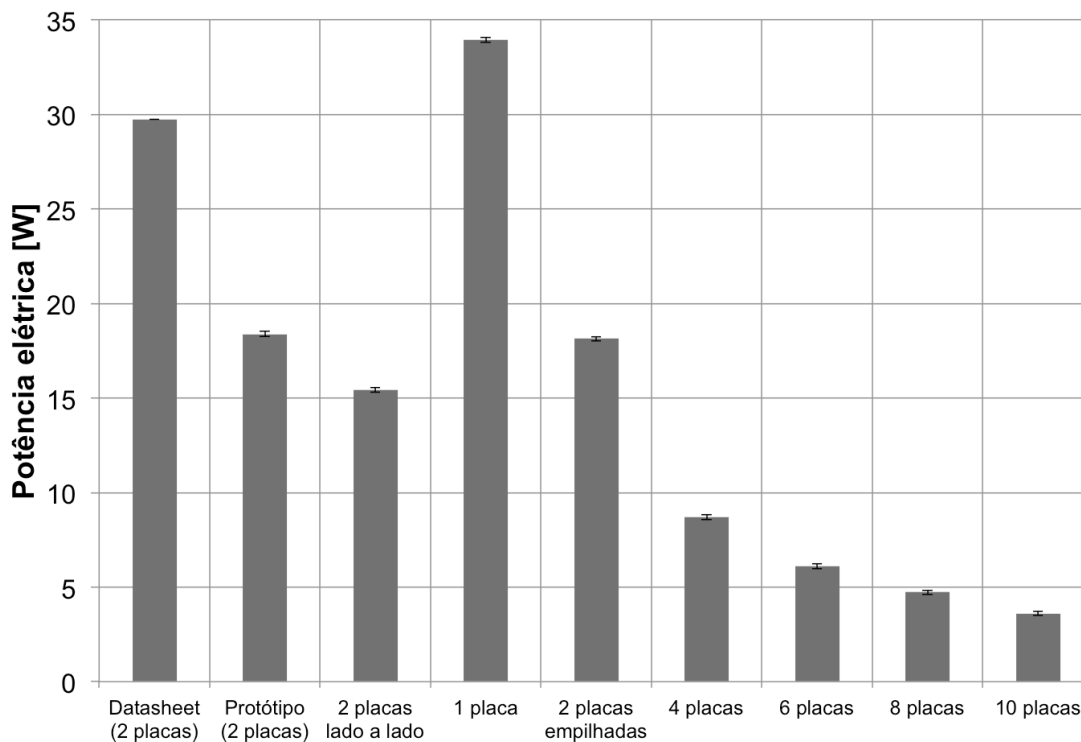


Figura 4.6. Gráfico Potência elétrica x Número de placas (Tensão de 12V)

Por consequência, na Figura 4.7, nota-se um comportamento similar ao do gráfico anterior. De uma forma geral, um aumento no número de placas utilizadas também leva a uma redução da diferença de temperatura entre o interior e o exterior da caixa. Isso é compreensível visto que houve uma redução na potência elétrica fornecida ao conjunto de pastilhas termoeletricas.

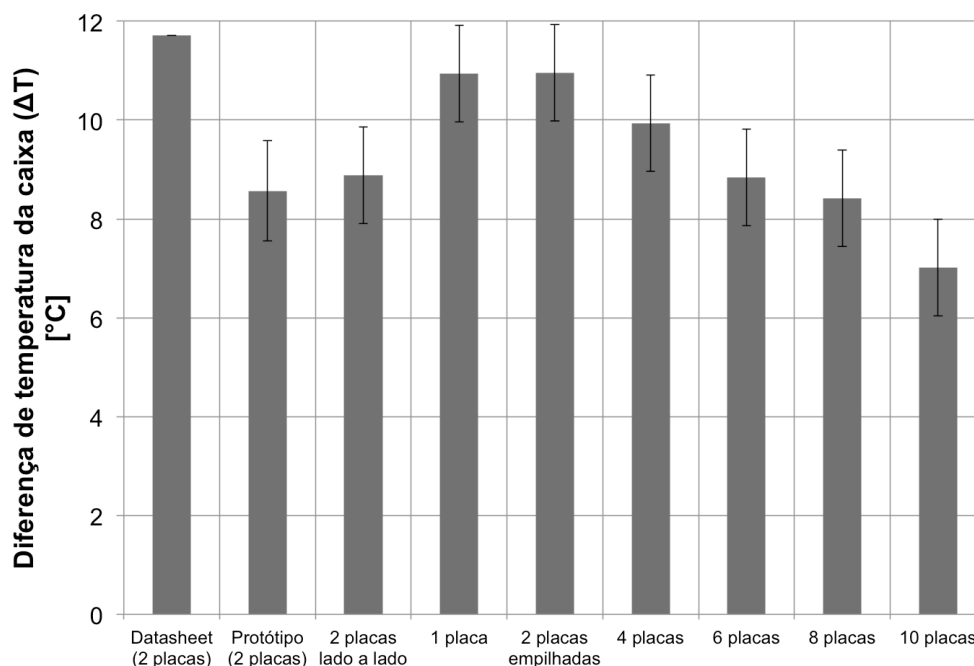


Figura 4.7. Diferença de temperatura da caixa x Número de placas (Tensão de 12V)

Das observações obtidas desses dois gráficos, percebe-se que surge a necessidade de uma análise de custo-benefício já que se deseja tanto uma boa diferença de temperatura quanto uma redução da potência elétrica fornecida ao sistema.

Para tal, foi considerado utilizar um parâmetro que leve em conta esses dois valores. E esse novo parâmetro é a eficiência energética, que pode ser obtida por meio da razão entre a diferença de temperatura obtida e da potência fornecida. Esse parâmetro é mostrado na Figura 4.8, no qual se percebe um comportamento inverso aos dois gráficos anteriores (Figuras 4.6 e 4.7).

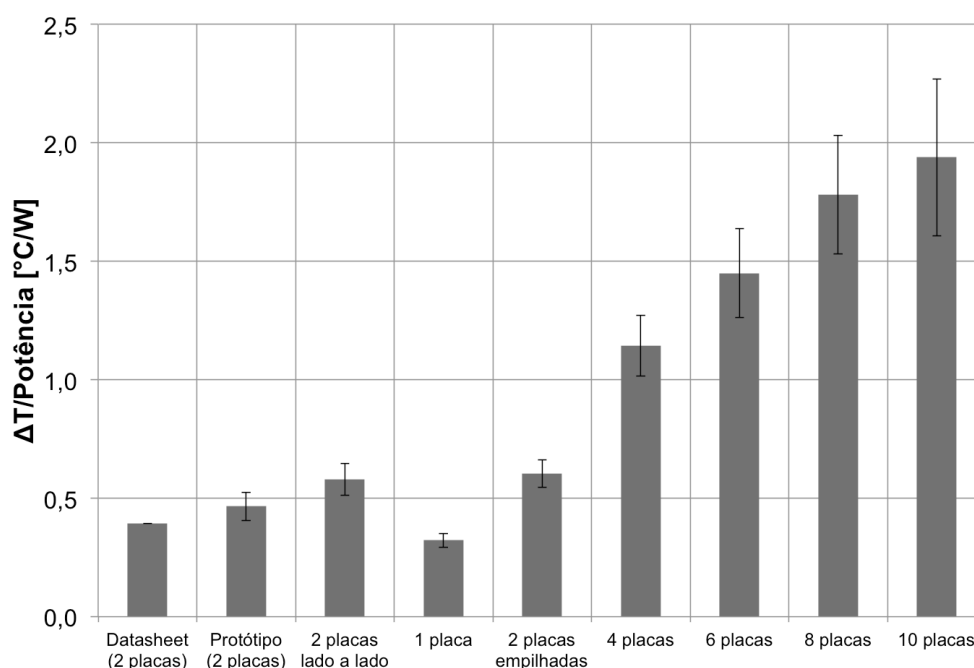


Figura 4.8. Eficiência energética x Número de placas (Tensão de 12V)

Além disso, para ressaltar a vantagem do uso de mais placas de Peltier no sistema, como sugerido pela Equipamentos Danvic (2015), e visto que a diferença de temperatura entre os lados das placas é proporcional à corrente que flui por elas (Leismann et al, 2007), foi criado um gráfico mostrando a razão entre a diferença de temperatura dentro da caixa de isopor e a corrente fluindo pelo sistema, mostrado na Figura 4.9.

Nesse mesmo gráfico (Figura 4.9), pode-se perceber que, para cada conjunto de 2 placas lado a lado que eram empilhadas às demais, havia um aumento da razão entre a diferença de temperatura pelo valor de corrente elétrica. Isso reforça a análise feita para o gráfico da eficiência energética (Figura 4.8) visto que ambas as curvas apresentam o mesmo comportamento.

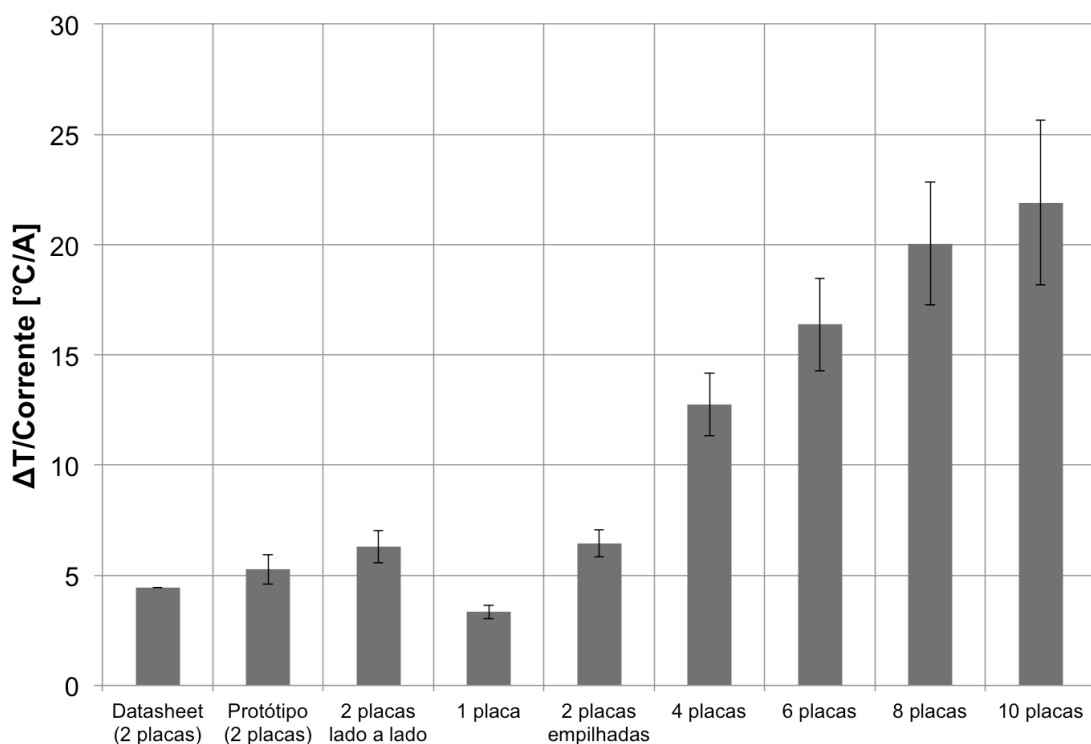


Figura 4.9. Razão ($\Delta T/Corrente$ elétrica) x Número de placas (Tensão de 12V)

No próximo gráfico (Figura 4.10), observa-se o rendimento do sistema em seus diversos arranjos de placas quando comparados com o refrigerador ideal de Carnot levando em conta os valores alcançados das temperaturas dos lados quente e frio de cada estrutura, sendo esse resultado calculado usando a Equação 2.5. Com isso, é visto que o rendimento para esse tipo de refrigerador continua baixo, com valores sempre abaixo de 11% para a tensão de alimentação de 12V, considerando as estruturas montadas.

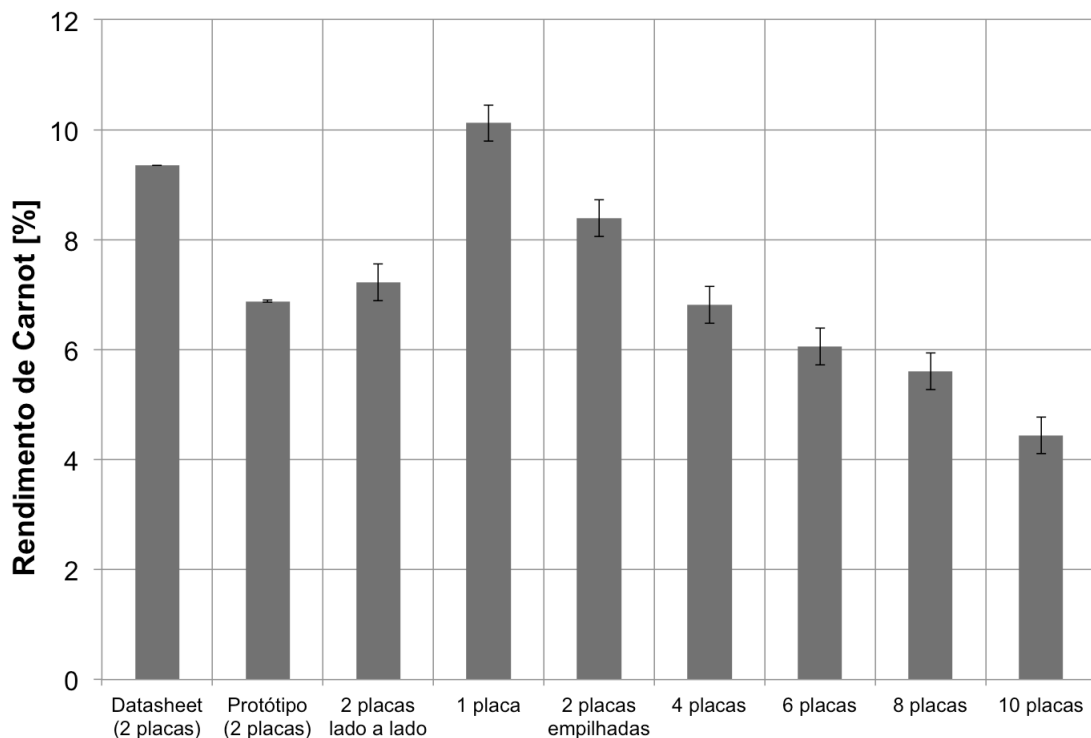


Figura 4.10. Rendimento de Carnot x Número de placas (Tensão de 12V)

Do último gráfico (Figura 4.11), observa-se o valor do COP do sistema em seus diversos arranjos de placas levando em conta os valores medidos das temperaturas dos lados quente e frio de cada estrutura, sendo esse resultado calculado usando a Equação 2.6. Desse gráfico, pode-se notar que, para a mesma alimentação de 12V, o uso de mais placas de Peltier no sistema resultou por elevar o valor desse coeficiente.

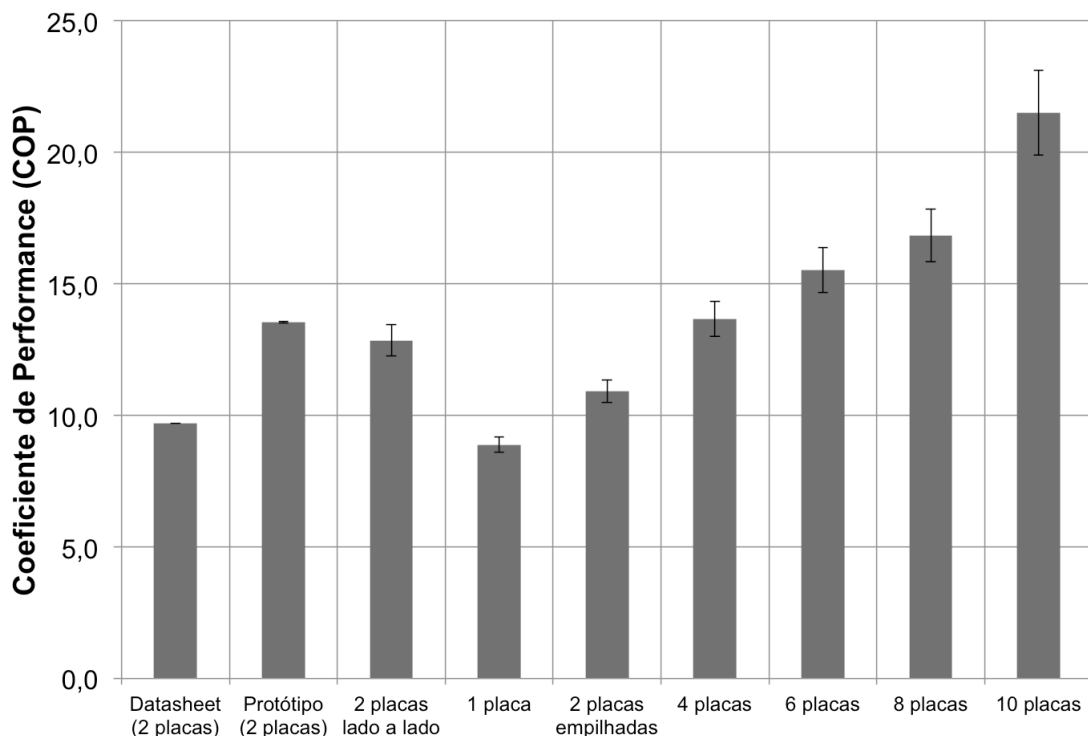


Figura 4.11. Coeficiente de performance x Número de placas (Tensão de 12V)

Como último comentário desse experimento, uma observação que pode-se fazer dos resultados apresentados nessa seção, é a de que houve uma melhora no desempenho com a reconstrução do sistema. Isso é percebido ao comparar os resultados obtidos no protótipo com os resultados no sistema com novas peças usando 2 placas termoelétricas lado a lado, ou seja, usando o mesmo arranjo de placas.

4.5 MONTAGEM E MEDIÇÕES (COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO)

Essa seção descreve o último experimento feito nesse trabalho, que consistia em verificar o comportamento transitório da diferença de temperatura entre o interior e o exterior da caixa tanto com o acionamento do sistema quanto com o desligamento do mesmo. Nesse teste, foi utilizado o sistema montado com o conjunto formado por 8 placas de Peltier, pois esse foi o último modelo montado durante o experimento anterior dessa etapa do trabalho (Seção 4.2).

Na montagem desse sistema, no entanto, foi usada a outra fonte de alimentação de 12V, que foi ligada às placas (conectadas entre si eletricamente em série) e aos ventiladores de computador usados para a circulação do ar pelos dissipadores de calor. Essa fonte foi usada pois a fonte de computador se desativava devido a um sistema interno de proteção que a desligava quando havia uma grande variação de corrente.

O procedimento de medição foi semelhante ao descrito na Seção 4.3. Contudo, nessa parte do trabalho, os dados necessários eram apenas os fornecidos dos 3 sensores LM-35 usados para medir as temperaturas externa e interna da caixa de isopor.

Nesse teste, a placa Zduino recebeu os dados dos sensores LM-35 e com uma outra parte do código mostrado no Anexo V, que fornecia o tempo transcorrido e a diferença de temperatura medida, forneceu os dados que foram então usados para a construção dos gráficos mostrados na seção abaixo (Seção 4.6).

4.6 RESULTADOS (COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO)

Ao fim, são apresentados os resultados do comportamento temporal de resfriamento para o sistema de refrigeração montado usando 8 células termoelétricas durante o intervalo de tempo de 3600 segundos (1 hora).

Das Figuras 4.12 e 4.13, verifica-se que o comportamento transitório da diferença de temperatura obtida com esse sistema de refrigeração segue um modelo de primeira ordem, podendo, portanto, ser equacionado por uma função de crescimento/decaimento exponencial com os seguintes parâmetros:

- Valor final/inicial: 9,25°C
- Constante de tempo: 450 segundos ou 7,5 minutos

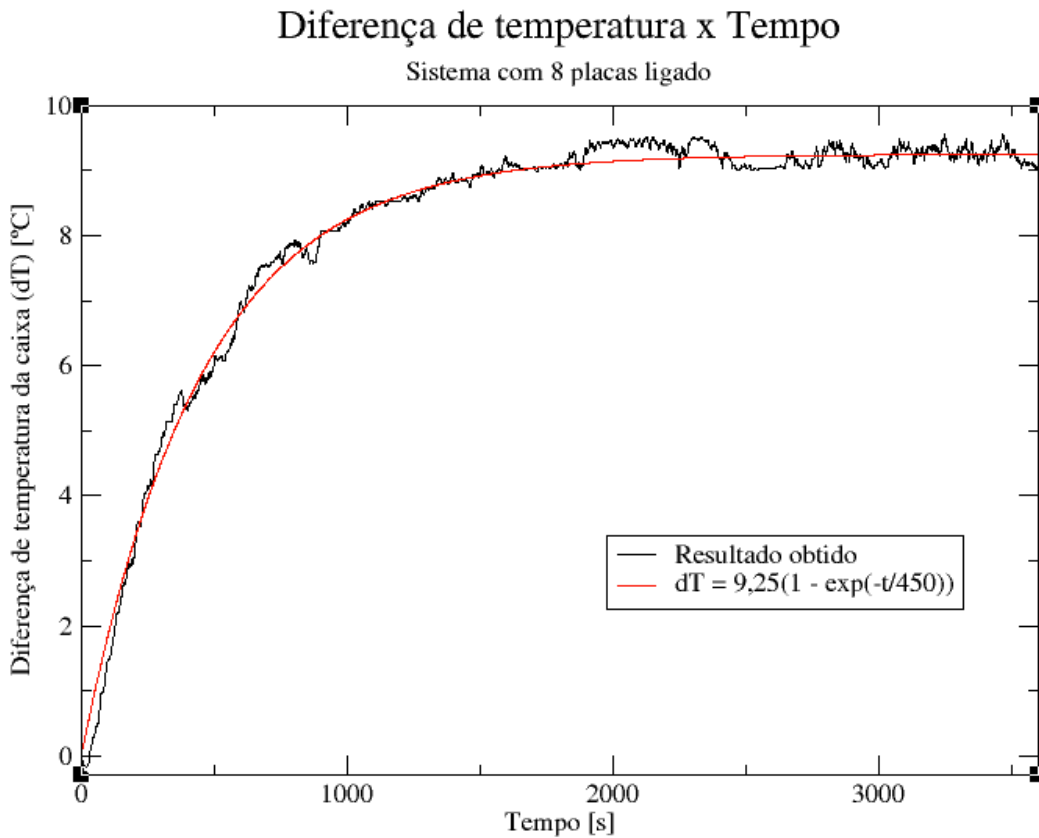


Figura 4.12. Resfriamento da caixa ligada

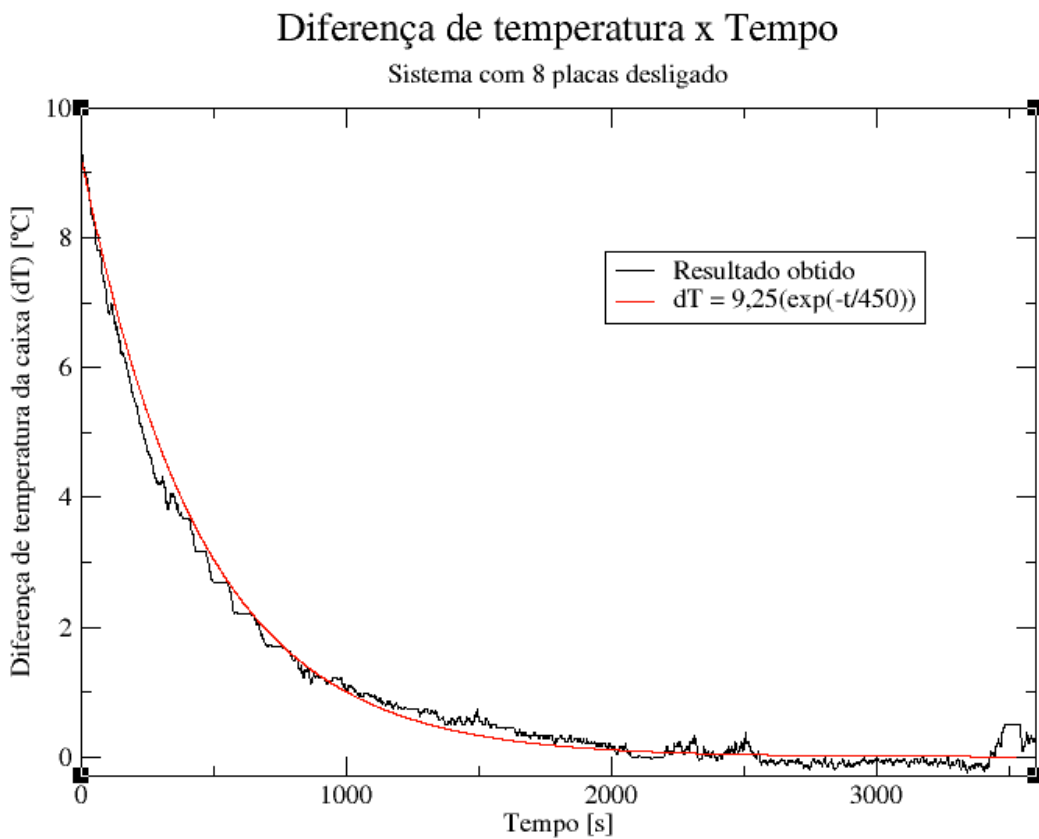


Figura 4.13. Aquecimento da caixa desligada

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO

Este último capítulo mostra algumas considerações finais relativas aos resultados obtidos nesse trabalho. Ele também inclui uma pequena lista de sugestões para possíveis trabalhos futuros nessa área de estudo de refrigeração termoelétrica.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como conclusão, espera-se que esse trabalho tenha sido uma nova contribuição para essa área de pesquisa em refrigeração utilizando dispositivos termoelétricos.

Neste trabalho, foi mostrado, por meio de experimentos reais, que é possível utilizar pastilhas termoelétricas em sistemas de refrigeração para pequenos volumes. Além disso, foi explorado o uso de múltiplas placas de Peltier com o objetivo de alcançar uma maior razão entre a diferença de temperatura e o valor de corrente elétrica fluindo pelas placas.

Resumindo, o sistema montado conseguiu, ao final, gerar um gradiente de temperatura de até $9,25^{\circ}\text{C}$ entre o interior da caixa de 5,15 litros e o meio externo com uma potência elétrica fornecida às placas de cerca de 5W, ou seja, foi alcançada uma eficiência energética de pouco mais de 1,8 graus Celsius por Watt de potência elétrica fornecida às placas.

No entanto, foi confirmado o que as referências citadas afirmavam a respeito desse tipo de refrigerador de estado sólido quanto ao seu rendimento em relação ao refrigerador de Carnot. Dos resultados, foi visto que esse rendimento apresenta valores bem baixos (máximo em torno de 10%).

Ainda falando dos resultados, foi conferido, pela análise dos gráficos para o comportamento temporal do sistema, que a diferença de temperatura do interior da caixa de isopor segue um modelo de primeira ordem, podendo ser representado por uma equação de crescimento/decaimento exponencial com constante de tempo da ordem de alguns minutos.

Em relação à motivação desse trabalho, diante de todos os resultados obtidos, constata-se que o sistema tem um potencial de resfriamento limitado, o que tem sido o maior inconveniente para a implementação desse tipo de tecnologia. Por isso, para que a aplicação visada possa ser plenamente atendida com esses resultados, seria necessário que a temperatura externa da caixa fosse de cerca de 20°C para medicamentos frescos e cerca de 15°C para medicamentos frios.

Uma possível alternativa para melhorar esse desempenho seria um aumento da área de superfície externa do dissipador (meio externo), levando a uma melhor dissipação de calor do lado quente do conjunto de placas termoelétricas aumentando e um aumento do fluxo de ar por esse dissipador. Um estudo com novos materiais semicondutores pode também ser uma maneira de se atingir esse objetivo.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseando-se nos resultados obtidos, foi montada a seguinte lista com algumas sugestões para expandir a pesquisa feita nesse trabalho explorando esse tópico de refrigeradores termoelétricos de pequeno porte:

- Sistema de controle (termostato)
 - Sistema eletroeletrônico/Arduino
 - Modo de plena potência
 - Modo de economia de energia
- Melhor dissipação de calor no lado quente das placas Peltier
- Avaliação de fontes de energia alternativas para possível portabilidade
 - Bateria de carro (acendedor de cigarros)
 - Baterias recarregáveis de alta capacidade de carga
 - Célula fotovoltaica

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arduino. ARDUINO REFERENCE. Arduino. 2016. Disponível em < <https://www.arduino.cc>>. Acesso em 8 de jan. 2016.
- Equipamentos Danvic. INTRODUÇÃO AO EFEITO PELTIER. São Paulo: Peltier, 2015. Disponível em <<http://www.peltier.com.br>>. Acesso em 17 de ago. 2015.
- Fortes, A. TERMODINÂMICA. Brasília/DF: ENM/UnB. 2009. 100p.
- HB Corporation. DATASHEET TEC-12706. Coreia do Sul: HB Corporation. Disponível em <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/227422/ETC2/TEC1-12706.html>>. Acesso em 12 de ago. 2015.
- Instituto de Física da UnB. APOSTILA DE FÍSICA 1 EXPERIMENTAL. Brasília/DF: IF/UnB. 2006. 82p.
- Leismann, I. A.; Oliveira A. R. P.; Santin, A. O. COOLER PELTIER MICROCONTROLADO. Curitiba/Paraná:PUCPR. 2007. Disponível em <<http://www.ppgia.pucpr.br/~santin/ee/2007/1s/3/>>. Acesso em 12 de ago. 2015.
- Macagnan, M. H. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE REFRIGERAÇÃO. São Leopoldo: Unisinos. 2015. 146p.
- Marin, N. et al. ASSISTÊNCIA FARMACÊUTICA PARA GERENTES MUNICIPAIS. Rio de Janeiro: Opas/OMS. 2003. 373p.
- National Semiconductor. DATASHEET LM-35. Califórnia/EUA: National Semiconductor. 2000. Disponível em <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/8866/NSC/LM35.html>>. Acesso em 8 de jan. 2016.
- Núcleo de Construção de Objetos de Aprendizagem da UFPB. CICLO DE CARNOT: Objeto de aprendizagem: Segunda Lei da Termodinâmica. Paraíba: NOA/UFPB. Disponível em <http://www.fisica.ufpb.br/~romero/objetosaprendizagem/Rived/15bCarnot/materiais/saiba_mais.pdf>. Acesso em 30 de jun. 2016.
- Protolab. TABELA DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO. Sorocaba/SP: Protolab. Disponível em <<http://www.protolab.com.br/Tabela-Conductividade-Material-Construcao.htm>>. Acesso em 12 de ago. 2015.
- Riberi, R. M.; Strazza, F. PROJETO DE UMA MICRO-ADEGA CLIMATIZADA DE BAIXO CUSTO. São Paulo/SP. 2004. 50p.
- Rowe, D. M. THERMOELECTRICS HANDBOOK: Macro to nano. Boca Raton/USA: CRC Press, 2006. 1014p.
- Souza, D. H. C. OTIMIZAÇÃO DO USO DE REFRIGERADORES TERMOELÉTRICOS EM PROCESSOS DE REFRIGERAÇÃO. Brasília/DF: ENM/UnB. 2007. 61p.

ANEXOS

Anexo I - Tabela I.1. Especificações das placas de Peltier (HB Corporation, 2015)

Temperatura lado quente [°C]	25	50
$Q_{\text{máx}}$ [W]	50	57
$\Delta T_{\text{máx}}$ [°C]	66	75
$i_{\text{máx}}$ [A]	6,40	6,40
$V_{\text{máx}}$ [V]	14,40	16,40
Resistência do módulo [Ω]	1,98	2,30

Anexo II - Propriedades físicas dos materiais (Protolab, 2015)

- Alumínio
 - Densidade: 2697kg/m³
 - Calor específico: 900J/(kg.K)
 - Condutividade térmica: 237W/(m.K)
- Ar
 - Densidade: 1,2754kg/m³
 - Calor específico: 1004,16J/(kg.K)
 - Condutividade térmica: 0,023W/(m.K)
- Isopor
 - Densidade: 50kg/m³
 - Calor específico: 1300J/(kg.K)
 - Condutividade térmica: 0,037W/(m.K)
- Pasta térmica (PTI-G3006)
 - Condutividade térmica: 5W/(m.K)
- Pasta térmica (Implastec)
 - Condutividade térmica: 1,2W/(m.K)

Anexo III - Tabela III.1. Valores Resistência x Temperatura para o termistor NTC

Temperatura [°C]	Resistência [k Ω]
0.00	32.74
5.00	25.44
10.00	19.92
15.00	15.72
20.00	12.50
25.00	10.00
30.00	8.06
35.00	6.53
40.00	5.33
45.00	4.37
50.00	3.60

Anexo IV - Resultados obtidos com o primeiro protótipo (Seção 3.4)

Tabela IV.1. Medições feitas para diferentes tensões de alimentação

	V [V]	i [A]	T _{ext} [°C]	T _{int} [°C]	T _{quente} [°C]	T _{frio} [°C]
Valores estimados "Datasheet" (Anexo I) (2 placas lado a lado)	3,26	0,80	27,86	23,35	28,81	20,35
	5,01	1,23	27,86	21,38	30,03	17,05
	7,82	1,88	27,86	18,72	32,83	12,62
	9,73	2,31	27,86	16,95	34,78	9,68
	11,28	2,64	27,86	16,15	37,38	8,34
	13,62	3,11	27,86	14,99	41,35	6,41
	15,78	3,51	27,86	14,46	45,86	5,53
Protótipo (2 placas lado a lado)	3,26 ± 0,01	0,43 ± 0,01	27,86 ± 1,00	24,52 ± 0,02	28,91 ± 0,03	22,64 ± 0,02
	5,01 ± 0,01	0,67 ± 0,01	27,86 ± 1,00	22,91 ± 0,02	30,03 ± 0,03	20,12 ± 0,02
	7,82 ± 0,01	1,08 ± 0,01	27,86 ± 1,00	21,15 ± 0,02	32,21 ± 0,03	17,38 ± 0,02
	9,73 ± 0,01	1,38 ± 0,01	27,86 ± 1,00	19,83 ± 0,02	33,80 ± 0,03	15,32 ± 0,01
	11,28 ± 0,01	1,63 ± 0,01	27,86 ± 1,00	19,29 ± 0,02	35,72 ± 0,04	14,47 ± 0,01
	13,62 ± 0,01	2,00 ± 0,01	27,86 ± 1,00	18,84 ± 0,02	38,25 ± 0,04	13,76 ± 0,01
	15,78 ± 0,01	2,34 ± 0,01	27,86 ± 1,00	18,44 ± 0,02	41,50 ± 0,05	13,14 ± 0,01

Tabela IV.2. Medidas de desempenho calculadas dos resultados obtidos

	P [W]	ΔT [°C]	ΔT/P [°C/W]	ΔT/i [°C/A]	η _{Carnot} [%]	COP
"Datasheet"	2,62	4,51	1,72	5,61	2,80	34,70
	6,14	6,48	1,06	5,29	4,28	22,35
	14,70	9,14	0,62	4,87	6,61	14,14
	22,49	10,91	0,49	4,72	8,15	11,27
	29,75	11,71	0,39	4,44	9,35	9,70
	42,37	12,87	0,30	4,14	11,11	8,00
	55,41	13,40	0,24	3,82	12,64	6,91
Protótipo	1,40 ± 0,04	3,34 ± 1,02	2,38 ± 0,79	7,77 ± 2,55	2,08 ± 0,02	47,18 ± 0,35
	3,36 ± 0,06	4,95 ± 1,02	1,47 ± 0,33	7,39 ± 1,63	3,27 ± 0,02	29,59 ± 0,14
	8,45 ± 0,09	6,71 ± 1,02	0,79 ± 0,13	6,21 ± 1,00	4,86 ± 0,02	19,59 ± 0,06
	13,43 ± 0,11	8,03 ± 1,02	0,60 ± 0,08	5,82 ± 0,78	6,02 ± 0,02	15,61 ± 0,04
	18,39 ± 0,13	8,57 ± 1,02	0,47 ± 0,06	5,26 ± 0,66	6,88 ± 0,02	13,54 ± 0,03
	27,24 ± 0,16	9,02 ± 1,02	0,33 ± 0,04	4,51 ± 0,53	7,86 ± 0,02	11,72 ± 0,03
	36,93 ± 0,18	9,42 ± 1,02	0,26 ± 0,03	4,03 ± 0,45	9,01 ± 0,02	10,09 ± 0,02

Anexo V - Código para obter os dados (Seções 4.3 e 4.5)

```
int val[5];
float mv[5][10];
float soma[5];
float temp[5];
int a = 10;
int inicio = a;
int contatempo = -(a - 1);
int estado = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  pinMode(13, INPUT);

  delay(1000);

  Serial.println();
  Serial.println();

  for (int i = 0; i < a; i++)
  {
    for (int j = 0; j < 5; j++)
    {
      mv[j][i] = 0;
      soma[j] = 0;
      temp[j] = 0;
    }
  }
}

void loop()
{
  int i, j;

  if (digitalRead(13) == HIGH)
  {
    estado = (estado + 1) % 2;
    if (inicio == 0)
    {
      contatempo = 0;
    }
    while (digitalRead(13) == HIGH);
  }

  if (inicio != 0)
  {
    inicio -= 1;
    if (inicio == 0)
    {
      Serial.println("Começou");
    }
  }
}
```

```
for (i = 0; i < 5; i++)
{
  soma[i] -= mv[i][0];
  for (j = 0; j < (a - 1); j++)
  {
    mv[i][j] = mv[i][j + 1];
  }
  val[i] = analogRead(i);
  if (abs(((val[i] / 1024.0) * 500) - temp[i]) >
(0.25 * temp[i]))
  {
    if (temp[i] != 0.0)
    {
      mv[i][a - 1] = mv[i][a - 2];
    }
    else
    {
      mv[i][a - 1] = (val[i] / 1024.0) * 500;
    }
  }
  else
  {
    mv[i][a - 1] = (val[i] / 1024.0) * 500;
  }
  soma[i] += mv[i][a - 1];
  temp[i] = soma[i] / (a - inicio);
}

if ((estado == 0) || (inicio != 0))
{
  Serial.print(contatempo / 60);
  Serial.print("min ");
  Serial.print(contatempo % 60);
  Serial.println("seg");

  Serial.print("Temperatura externa: ");
  Serial.print(temp[0]);
  Serial.print("*C (");
  Serial.print(mv[0][a - 1]);
  Serial.print("/");
  Serial.print(((val[0] / 1024.0) * 500));
  Serial.println(")");

  Serial.print("Temperatura interna: ");
  Serial.print((temp[1] + temp[2]) / 2);
  Serial.print("*C (");
  Serial.print(temp[1]);
  Serial.print("(");
  Serial.print(mv[1][a - 1]);
  Serial.print("/");
  Serial.print(((val[1] / 1024.0) * 500));
  Serial.print(")");
  Serial.print(temp[2]);
  Serial.print("(");
  Serial.print(mv[2][a - 1]);
  Serial.print("/");
  Serial.print(((val[2] / 1024.0) * 500));
```

```

Serial.println(")");

Serial.print("Temperatura lado frio: ");
Serial.print(temp[3]);
Serial.print("*C (");
Serial.print(mv[3][a - 1]);
Serial.print("/");
Serial.print((val[3] / 1024.0) * 500);
Serial.println(")");

Serial.print("Temperatura lado quente: ");
Serial.print(temp[4]);
Serial.print("*C (");
Serial.print(mv[4][a - 1]);
Serial.print("/");
Serial.print((val[4] / 1024.0) * 500);
Serial.println(")");

Serial.print("Delta Temperatura: ");
Serial.print(temp[0] - ((temp[1] + temp[2]) / 2));
Serial.println("*C");

Serial.println();
contatempo++;
}

else
{
  Serial.print(contatempo);
  Serial.print("\t");
  Serial.println(temp[0] - ((temp[1] + temp[2]) / 2));
  contatempo++;
}
delay(1000);
}

```

Anexo VI - Resultados obtidos com o sistema com novas peças (Seção 4.4)

Tabela VI.1. Medições feitas nos testes com diferentes números de placas

Número de placas	V [V]	i [A]	T _{ext} [°C]	T _{int} [°C]	T _{quente} [°C]	T _{frio} [°C]
2 placas lado a lado	3,29 ± 0,01	0,39 ± 0,01	26,37 ± 0,49	23,75 ± 0,49	28,17 ± 0,49	21,44 ± 0,49
	5,08 ± 0,01	0,60 ± 0,01	26,37 ± 0,49	21,75 ± 0,49	28,76 ± 0,49	19,19 ± 0,49
	7,66 ± 0,01	0,97 ± 0,01	26,42 ± 0,49	19,02 ± 0,49	30,22 ± 0,49	14,75 ± 0,49
	9,51 ± 0,01	1,26 ± 0,01	26,22 ± 0,49	17,68 ± 0,49	32,32 ± 0,49	12,79 ± 0,49
	10,95 ± 0,01	1,41 ± 0,01	24,41 ± 0,49	15,53 ± 0,49	31,74 ± 0,49	9,72 ± 0,49
	13,29 ± 0,01	1,78 ± 0,01	24,02 ± 0,49	13,99 ± 0,49	33,94 ± 0,49	8,01 ± 0,49
	15,71 ± 0,01	2,05 ± 0,01	24,41 ± 0,49	13,72 ± 0,49	36,77 ± 0,49	6,35 ± 0,49
1 placa	3,30 ± 0,01	1,03 ± 0,01	23,93 ± 0,49	18,31 ± 0,49	26,86 ± 0,49	14,16 ± 0,49
	4,66 ± 0,01	1,15 ± 0,01	24,41 ± 0,49	17,90 ± 0,49	28,37 ± 0,49	12,70 ± 0,49
	7,46 ± 0,01	2,44 ± 0,01	24,41 ± 0,49	14,23 ± 0,49	32,18 ± 0,49	7,81 ± 0,49
	9,09 ± 0,01	2,97 ± 0,01	24,90 ± 0,49	13,96 ± 0,49	35,30 ± 0,49	7,23 ± 0,49
	10,35 ± 0,01	3,28 ± 0,01	25,73 ± 0,49	14,79 ± 0,49	38,96 ± 0,49	7,37 ± 0,49
2 placas empilhadas	3,24 ± 0,01	0,50 ± 0,01	25,39 ± 0,49	21,31 ± 0,49	27,69 ± 0,49	18,46 ± 0,49
	5,10 ± 0,01	0,79 ± 0,01	25,39 ± 0,49	18,68 ± 0,49	28,42 ± 0,49	14,70 ± 0,49
	8,00 ± 0,01	1,23 ± 0,01	25,73 ± 0,49	16,33 ± 0,49	30,42 ± 0,49	10,25 ± 0,49
	9,40 ± 0,01	1,49 ± 0,01	25,88 ± 0,49	15,09 ± 0,49	31,98 ± 0,49	8,84 ± 0,49
	10,67 ± 0,01	1,70 ± 0,01	25,88 ± 0,49	14,92 ± 0,49	33,54 ± 0,49	7,81 ± 0,49
4 placas (2 pilhas de 2 placas lado a lado)	3,35 ± 0,01	0,22 ± 0,01	25,49 ± 0,49	22,80 ± 0,49	27,25 ± 0,49	20,36 ± 0,49
	5,14 ± 0,01	0,35 ± 0,01	25,34 ± 0,49	20,51 ± 0,49	27,73 ± 0,49	17,48 ± 0,49
	7,81 ± 0,01	0,54 ± 0,01	25,49 ± 0,49	18,14 ± 0,49	29,10 ± 0,49	14,16 ± 0,49
	9,70 ± 0,01	0,68 ± 0,01	23,54 ± 0,49	15,14 ± 0,49	28,22 ± 0,49	10,69 ± 0,49
	11,15 ± 0,01	0,78 ± 0,01	24,61 ± 0,49	14,67 ± 0,49	29,93 ± 0,49	9,28 ± 0,49
	13,71 ± 0,01	0,98 ± 0,01	24,61 ± 0,49	13,21 ± 0,49	31,93 ± 0,49	7,23 ± 0,49
	16,10 ± 0,01	1,16 ± 0,01	23,44 ± 0,49	12,11 ± 0,49	32,32 ± 0,49	6,30 ± 0,49
	21,30 ± 0,01	1,58 ± 0,01	24,41 ± 0,49	11,91 ± 0,49	37,74 ± 0,49	4,74 ± 0,49

6 placas (2 pilhas de 3 placas lado a lado)	3,34 ± 0,01	0,14 ± 0,01	25,34 ± 0,49	22,75 ± 0,49	26,56 ± 0,49	21,00 ± 0,49
	5,15 ± 0,01	0,24 ± 0,01	25,88 ± 0,49	22,22 ± 0,49	28,17 ± 0,49	19,58 ± 0,49
	7,85 ± 0,01	0,36 ± 0,01	25,88 ± 0,49	19,63 ± 0,49	28,91 ± 0,49	16,06 ± 0,49
	9,78 ± 0,01	0,46 ± 0,01	25,49 ± 0,49	17,58 ± 0,49	29,20 ± 0,49	13,18 ± 0,49
	11,29 ± 0,01	0,54 ± 0,01	25,20 ± 0,49	16,36 ± 0,49	30,08 ± 0,49	11,72 ± 0,49
	13,83 ± 0,01	0,68 ± 0,01	24,76 ± 0,49	14,65 ± 0,49	33,06 ± 0,49	8,30 ± 0,49
	16,08 ± 0,01	0,81 ± 0,01	24,27 ± 0,49	12,99 ± 0,49	32,57 ± 0,49	7,47 ± 0,49
	21,50 ± 0,01	1,12 ± 0,01	23,49 ± 0,49	11,33 ± 0,49	35,99 ± 0,49	3,42 ± 0,49
8 placas (2 pilhas de 4 placas lado a lado)	3,29 ± 0,01	0,11 ± 0,01	26,86 ± 0,49	24,66 ± 0,49	29,25 ± 0,49	23,49 ± 0,49
	5,09 ± 0,01	0,18 ± 0,01	26,86 ± 0,49	23,44 ± 0,49	29,49 ± 0,49	21,58 ± 0,49
	7,74 ± 0,01	0,28 ± 0,01	26,81 ± 0,49	21,00 ± 0,49	29,79 ± 0,49	17,68 ± 0,49
	9,60 ± 0,01	0,35 ± 0,01	26,37 ± 0,49	19,29 ± 0,49	30,37 ± 0,49	15,67 ± 0,49
	11,25 ± 0,01	0,42 ± 0,01	25,88 ± 0,49	17,46 ± 0,49	30,18 ± 0,49	13,18 ± 0,49
	13,65 ± 0,01	0,51 ± 0,01	26,81 ± 0,49	17,04 ± 0,49	32,57 ± 0,49	12,16 ± 0,49
	15,93 ± 0,01	0,60 ± 0,01	26,61 ± 0,49	16,16 ± 0,49	33,35 ± 0,49	11,23 ± 0,49
	21,50 ± 0,01	0,82 ± 0,01	24,41 ± 0,49	13,23 ± 0,49	33,59 ± 0,49	7,32 ± 0,49
10 placas (2 pilhas de 5 placas lado a lado)	3,33 ± 0,01	0,08 ± 0,01	25,39 ± 0,49	23,71 ± 0,49	26,37 ± 0,49	22,85 ± 0,49
	5,12 ± 0,01	0,13 ± 0,01	25,39 ± 0,49	22,46 ± 0,49	26,86 ± 0,49	20,95 ± 0,49
	7,86 ± 0,01	0,21 ± 0,01	23,93 ± 0,49	19,19 ± 0,49	25,93 ± 0,49	16,60 ± 0,49
	9,75 ± 0,01	0,27 ± 0,01	24,37 ± 0,49	18,60 ± 0,49	27,00 ± 0,49	15,67 ± 0,49
	11,30 ± 0,01	0,32 ± 0,01	23,93 ± 0,49	16,92 ± 0,49	26,95 ± 0,49	13,62 ± 0,49
	13,79 ± 0,01	0,39 ± 0,01	23,93 ± 0,49	15,65 ± 0,49	27,98 ± 0,49	11,72 ± 0,49
	16,06 ± 0,01	0,46 ± 0,01	24,41 ± 0,49	15,14 ± 0,49	29,00 ± 0,49	11,18 ± 0,49
	21,60 ± 0,01	0,64 ± 0,01	23,44 ± 0,49	13,16 ± 0,49	30,18 ± 0,49	8,30 ± 0,49

Tabela VI.2. Medidas de desempenho calculadas dos resultados obtidos

Número de placas	P [W]	ΔT [°C]	$\Delta T/P$ [°C/W]	$\Delta T/i$ [°C/A]	η_{Carnot} [%]	COP
2 placas lado a lado	1,28 ± 0,01	2,62 ± 0,98	2,04 ± 0,82	6,72 ± 2,68	2,23 ± 0,33	43,77 ± 6,42
	3,05 ± 0,01	4,62 ± 0,98	1,52 ± 0,35	7,70 ± 1,76	3,17 ± 0,33	30,55 ± 3,17
	7,43 ± 0,01	7,40 ± 0,98	1,00 ± 0,14	7,63 ± 1,09	5,10 ± 0,33	18,61 ± 1,21
	11,98 ± 0,01	8,54 ± 0,98	0,71 ± 0,09	6,78 ± 0,83	6,39 ± 0,33	14,64 ± 0,76
	15,44 ± 0,01	8,88 ± 0,98	0,58 ± 0,07	6,30 ± 0,74	7,22 ± 0,33	12,85 ± 0,59
	23,66 ± 0,01	10,03 ± 0,98	0,42 ± 0,04	5,63 ± 0,58	8,44 ± 0,33	10,84 ± 0,43
	32,21 ± 0,01	10,69 ± 0,98	0,33 ± 0,03	5,21 ± 0,50	9,82 ± 0,33	9,19 ± 0,31
1 placa	3,40 ± 0,01	5,62 ± 0,98	1,65 ± 0,31	5,46 ± 1,00	4,23 ± 0,33	22,62 ± 1,78
	5,36 ± 0,01	6,51 ± 0,98	1,21 ± 0,20	5,66 ± 0,90	5,20 ± 0,33	18,24 ± 1,17
	18,20 ± 0,01	10,18 ± 0,98	0,56 ± 0,06	4,17 ± 0,42	7,98 ± 0,33	11,53 ± 0,48
	27,00 ± 0,01	10,94 ± 0,98	0,41 ± 0,04	3,68 ± 0,34	9,10 ± 0,33	9,99 ± 0,36
	33,95 ± 0,01	10,94 ± 0,98	0,32 ± 0,03	3,34 ± 0,31	10,12 ± 0,33	8,88 ± 0,29
2 placas empilhadas	1,62 ± 0,01	4,08 ± 0,98	2,52 ± 0,66	8,16 ± 2,12	3,07 ± 0,33	31,59 ± 3,40
	4,03 ± 0,01	6,71 ± 0,98	1,67 ± 0,27	8,49 ± 1,34	4,55 ± 0,33	20,98 ± 1,53
	9,84 ± 0,01	9,40 ± 0,98	0,96 ± 0,11	7,64 ± 0,86	6,64 ± 0,33	14,05 ± 0,70
	14,01 ± 0,01	10,79 ± 0,98	0,77 ± 0,08	7,24 ± 0,70	7,58 ± 0,33	12,19 ± 0,54
	18,14 ± 0,01	10,96 ± 0,98	0,60 ± 0,06	6,45 ± 0,61	8,39 ± 0,33	10,92 ± 0,43
4 placas	0,74 ± 0,01	2,69 ± 0,98	3,65 ± 1,50	12,23 ± 4,99	2,29 ± 0,33	42,60 ± 6,11
	1,80 ± 0,01	4,83 ± 0,98	2,68 ± 0,62	13,80 ± 3,18	3,41 ± 0,33	28,35 ± 2,75
	4,22 ± 0,01	7,35 ± 0,98	1,74 ± 0,27	13,61 ± 2,06	4,94 ± 0,33	19,23 ± 1,29
	6,60 ± 0,01	8,40 ± 0,98	1,27 ± 0,17	12,35 ± 1,62	5,82 ± 0,33	16,19 ± 0,93
	8,70 ± 0,01	9,94 ± 0,98	1,14 ± 0,13	12,74 ± 1,42	6,81 ± 0,33	13,68 ± 0,67
	13,44 ± 0,01	11,40 ± 0,98	0,85 ± 0,08	11,63 ± 1,12	8,10 ± 0,33	11,35 ± 0,47
	18,68 ± 0,01	11,33 ± 0,98	0,61 ± 0,06	9,77 ± 0,93	8,52 ± 0,33	10,74 ± 0,42
	33,65 ± 0,01	12,50 ± 0,98	0,37 ± 0,03	7,91 ± 0,67	10,61 ± 0,33	8,42 ± 0,26

6 placas	0,47 ± 0,01	2,59 ± 0,98	5,54 ± 2,50	18,50 ± 8,30	1,86 ± 0,33	52,90 ± 9,38
	1,24 ± 0,01	3,66 ± 0,98	2,96 ± 0,92	15,25 ± 4,70	2,85 ± 0,33	34,08 ± 3,93
	2,83 ± 0,01	6,25 ± 0,98	2,21 ± 0,41	17,36 ± 3,19	4,25 ± 0,33	22,51 ± 1,75
	4,50 ± 0,01	7,91 ± 0,98	1,76 ± 0,26	17,20 ± 2,50	5,30 ± 0,33	17,87 ± 1,12
	6,10 ± 0,01	8,84 ± 0,98	1,45 ± 0,19	16,37 ± 2,11	6,05 ± 0,33	15,52 ± 0,85
	9,40 ± 0,01	10,11 ± 0,98	1,08 ± 0,12	14,87 ± 1,65	8,09 ± 0,33	11,37 ± 0,47
	13,02 ± 0,01	11,28 ± 0,98	0,87 ± 0,09	13,93 ± 1,38	8,21 ± 0,33	11,18 ± 0,45
	24,08 ± 0,01	12,16 ± 0,98	0,50 ± 0,05	10,86 ± 0,97	10,54 ± 0,33	8,49 ± 0,27
8 placas	0,36 ± 0,01	2,20 ± 0,98	6,08 ± 3,27	20,00 ± 10,70	1,90 ± 0,33	51,50 ± 8,82
	0,92 ± 0,01	3,42 ± 0,98	3,73 ± 1,28	19,00 ± 6,48	2,61 ± 0,33	37,26 ± 4,66
	2,17 ± 0,01	5,81 ± 0,98	2,68 ± 0,55	20,75 ± 4,23	4,00 ± 0,33	24,02 ± 1,98
	3,36 ± 0,01	7,08 ± 0,98	2,11 ± 0,35	20,23 ± 3,37	4,84 ± 0,33	19,65 ± 1,34
	4,73 ± 0,01	8,42 ± 0,98	1,78 ± 0,25	20,05 ± 2,80	5,60 ± 0,33	16,84 ± 1,00
	6,96 ± 0,01	9,77 ± 0,98	1,40 ± 0,17	19,16 ± 2,29	6,68 ± 0,33	13,98 ± 0,69
	9,56 ± 0,01	10,45 ± 0,98	1,09 ± 0,12	17,42 ± 1,92	7,22 ± 0,33	12,86 ± 0,59
	17,63 ± 0,01	11,18 ± 0,98	0,63 ± 0,06	13,63 ± 1,36	8,56 ± 0,33	10,68 ± 0,42
10 placas	0,27 ± 0,01	1,68 ± 0,98	6,31 ± 4,47	21,00 ± 14,83	1,18 ± 0,33	84,09 ± 23,47
	0,67 ± 0,01	2,93 ± 0,98	4,40 ± 1,81	22,54 ± 9,25	1,97 ± 0,33	49,76 ± 8,31
	1,65 ± 0,01	4,74 ± 0,98	2,87 ± 0,73	22,57 ± 5,73	3,12 ± 0,33	31,06 ± 3,30
	2,63 ± 0,01	5,77 ± 0,98	2,19 ± 0,45	21,37 ± 4,41	3,77 ± 0,33	25,49 ± 2,24
	3,62 ± 0,01	7,01 ± 0,98	1,94 ± 0,33	21,91 ± 3,74	4,44 ± 0,33	21,51 ± 1,61
	5,38 ± 0,01	8,28 ± 0,98	1,54 ± 0,22	21,23 ± 3,05	5,40 ± 0,33	17,52 ± 1,08
	7,39 ± 0,01	9,27 ± 0,98	1,25 ± 0,16	20,15 ± 2,56	5,90 ± 0,33	15,96 ± 0,90
	13,82 ± 0,01	10,28 ± 0,98	0,74 ± 0,08	16,06 ± 1,78	7,21 ± 0,33	12,86 ± 0,60

