

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA (UFPB)
CENTRO DE TECNOLOGIA (CT)
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA (DEM)
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

THIAGO RODRIGUES ALEXANDRIA LEITE

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA CONCEPÇÃO DE UM CONDICIONADOR DE AR
AUTOMOTIVO UTILIZANDO MÓDULOS TERMOELÉTRICOS**

**JOÃO PESSOA – PB
2018**

L533a Leite, Thiago Rodrigues Alexandria

Análise da viabilidade da concepção de um condicionador de ar automotivo utilizando módulos termoelétricos. / Thiago Rodrigues Alexandria Leite. – João Pessoa, 2018.

59f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Jean Pierre Veronese.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Mecânica) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

THIAGO RODRIGUES ALEXANDRIA LEITE

ANÁLISE DA VIABILIDADE DA CONCEPÇÃO DE UM CONDICIONADOR DE AR
AUTOMOTIVO UTILIZANDO MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado
ao Departamento de Engenharia Mecânica como
requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jean Pierre Veronese

JOÃO PESSOA – PB
2018

THIAGO RODRIGUES ALEXANDRIA LEITE

ANÁLISE DA VIABILIDADE DA CONCEPÇÃO DE UM CONDICIONADOR DE AR
AUTOMOTIVO UTILIZANDO MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado
ao Departamento de Engenharia Mecânica como
requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jean Pierre Veronese
Departamento de Engenharia Mecânica – UFPB
(Orientador)

Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos
Departamento de Engenharia Mecânica – UFPB
(Coorientador)

Msc. Ismael Nickson Pinto de Araújo
Examinador

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Jean Pierre Veronese pela orientação.

Ao prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos pela orientação, paciência e suporte durante a realização experimental do trabalho.

A Ismael Nickson Pinto de Araújo por fazer parte de minha banca.

Aos meus pais pelo constante apoio e incentivo durante o curso.

A todos da minha família que me apoiaram durante essa jornada, em especial as minhas tias Albéria e Cristina pelo incondicional incentivo e apoio.

Aos colegas Ed Pascoal e Leonardo pela ajuda durante o experimento.

Ao professor Belo pelo suporte com a bomba e dissipadores.

Aos meus amigos Dener, Maria Helena e colegas de cursos que de certa forma contribuíram para que eu chegasse até aqui.

A Deus que sempre me deu forças para superar todas as dificuldades enfrentadas durante o curso.

RESUMO

O objetivo deste estudo é analisar a viabilidade técnica de um condicionador de ar termoelétrico automotivo autônomo através de módulos termoelétricos, em especial do efeito Peltier. Este efeito surge devido a uma força eletromotriz existente na união, originada pelas diferentes composições de cada união. Assim, a corrente pode fluir em ambos os sentidos, mas num dos sentidos da corrente o dispositivo absorve calor do meio que o rodeia e no outro irradia o calor absorvido ao meio ambiente. Para o experimento proposto foram utilizados seis módulos termoelétricos que usam óxido de alumínio como material cerâmico e que possuem 127 pares de material semicondutor à base de Silício. O tanque utilizado como reservatório de água no experimento foi fabricado utilizando uma chapa fina de ferro e isolado com espuma de polietileno revestida com alumínio para evitar perdas térmicas para o meio. Foi utilizada uma unidade evaporadora automotiva comum para o processo de troca de calor entre a água gelada e o ar do ambiente a ser refrigerado. Para as medições das temperaturas da água antes e depois de atravessar o tanque, assim como para as medições da temperatura ambiente e dentro da bancada utilizou-se um termômetro digital com 5 pontas de prova. Para a drenagem, utilizou-se uma bomba elétrica com potência de 34 W além de duas fontes chaveadas de 12V/25A. A velocidade do ar do cooler instalado na unidade evaporadora é obtida por um anemômetro e um termômetro infravermelho foi utilizado para medições de temperatura das superfícies dos módulos. Já temperatura da água parada foi obtida através de um termo higrômetro digital. Inicialmente esperou-se resultados mais satisfatórios, mas no decorrer de toda a fase experimental deparou-se com diversas variáveis que não estavam inseridas no projeto. Portanto, apesar dos resultados serem um pouco diferentes do esperado, o protótipo mostrou-se capaz de reproduzir de maneira satisfatória o comportamento de um sistema de refrigeração termoelétrico em um condicionador de ar veicular.

Palavras-chave: Condicionador de ar. Efeito Peltier. Refrigeração termoelétrica.

ABSTRACT

The objective of the study is to analyze the technical feasibility of an autonomous automotive thermoelectric air conditioner through thermoelectric modules, the Peltier effect. This effect arises due to an electromotive force existing in the union, originated by the different compositions of each union. Thus, the current can flow in both directions, but in one sense of the current the device absorbs heat from the surrounding medium and in the other radiates the heat absorbed into the environment. For the proposed experiment, six thermoelectric modules of aluminum oxide were used as ceramic material with 127 pairs of semiconductor material based on silicon. The tank used as a water reservoir in the experiment was fabricated using a thin sheet of iron and insulated with polyethylene foam coated with aluminum to avoid thermal losses to the medium. A common automotive evaporator unit was used for the process of heat exchange between the ice water and ambient air to be refrigerated. A digital thermometer with 5 test probes was used for the measurements of the water temperatures before and after the tank, as well as for the measurements of the ambient temperature and inside the workbench. For the drainage, an electric pump with power of 34 W was used, besides two switching sources of 12V / 25A. The air speed of the cooler installed in the evaporator unit is obtained by an anemometer and an infrared thermometer was also used. Already stopped water temperature was obtained through a digital hygrometer term. Initially, we expected more satisfactory results, but during the whole experimental phase we encountered several variables that were not included in the project. Therefore, although the results are somewhat different than expected, the prototype was able to reproduce satisfactorily the behavior of a thermoelectric cooling system in a vehicular air conditioner.

Keywords: Air conditioner. Peltier Effect. Thermoelectric cooling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Aparelho de Seebeck; (b) representação do experimento	16
Figura 2 - Medição da tensão gerada.....	17
Figura 3 - Constituição de um módulo termoelétrico	20
Figura 4 - Módulos Peltier comerciais (a) 1 estágio; (b) múltiplos estágios	21
Figura 5 – (a) Curvas de corrente com o lado quente a 25 °C (b) Curvas de corrente com o lado quente a 50 °C	22
Figura 6 - (a)Curvas de corrente com Th a 25 °C (b) Curvas de corrente com Th a 50 °C.	23
Figura 7 - Esquema representativo da condução em uma parede plana	25
Figura 8 - Desempenho de uma associação termoelétrica em função da diferença de temperatura.....	29
Figura 9 - Módulo Termoelétrico do experimento	31
Figura 10 - Chapa de aço usada para o tanque	32
Figura 11 - Tanque metálico utilizado no projeto.....	32
Figura 12 - Unidade evaporadora comum utilizada no projeto	33
Figura 13 - Bomba d'água utilizada no projeto	34
Figura 14 - Fontes de alimentação	34
Figura 15 - Anemômetro digital NA-3030	35
Figura 16 - Termômetro Infravermelho MT-320 MINIPA	36
Figura 17 - Termo Higrômetro digital Icel HT-20	37
Figura 18 - Temperatura Inicial dos módulos	38
Figura 19 - Menor temperatura obtida no teste	39
Figura 20 - Módulos conectados em paralelos três a três	39
Figura 21 - Temperatura inicial da água parada.....	40
Figura 22 - Temperatura final da água parada	41
Figura 23 - Bancada de teste do sistema	41
Figura 24 - Esquema do sistema proposto	42
Figura 25 - Sistema proposto pronto	43
Figura 26 - COP para diversos valores de diferença de temperaturas.....	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações do módulo TEC1-12706.....	22
Quadro 2 - Características Termômetro digital penta III	33
Quadro 3 - Especificações Anemômetro Icel NA-3030	35
Quadro 4 - Especificações do Termômetro Infravermelho MT-320 MINIPA.....	36
Quadro 5 - Especificações do Termo Higrômetro digital Icel HT-20.....	37
Quadro 6 - Resultados do teste com os módulos individuais	38
Quadro 7 - Resultados Teste com água parada.....	40
Quadro 8 - Resultados do teste com o sistema completo	43

LISTA DE SÍMBOLOS

V – Tensão elétrica

I – Corrente elétrica

R – Resistência elétrica

K – Condutividade térmica

α – Coeficiente de Seebeck

π – Coeficiente de Peltier

ΔT – Variação de temperatura

Q_J – Calor Joule

Q_P – Calor Peltier

φ – Coeficiente de desempenho

Q_f – Calor transferido ou bombeado pelo lado frio de um módulo termoelétrico

T_f – Temperatura do lado frio do módulo termoelétrico

ΔT_{max} – Máxima diferença de temperatura que um refrigerador termoelétrico é capaz de produzir

Q_q – Calor rejeitado pelo lado quente de um módulo termoelétrico

P_{en} – Potência de entrada fornecida

$\dot{m}_{ar}$ – Vazão mássica do ar

ρ_{ar} – Densidade do ar

$\dot{m}_{\acute{a}gua}$ – Vazão mássica da água

$\rho_{\acute{a}gua}$ – Densidade da água

T_{ent} - Temperatura de entrada da água no tanque

T_{sai} – Temperatura de saída da água no tanque

T_{amb} – Temperatura ambiente

T_{int} – Temperatura interna

$\dot{Q}$ – Taxa de calor removido

c_p – Calor específico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 GERAL	15
2.2 ESPECÍFICOS	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 EFEITOS TERMOELÉTRICOS.....	16
3.1.1 Efeito Seebeck	16
3.1.2 Efeito Peltier	17
3.1.3 Efeito Thomsom	18
3.2 MÓDULOS TERMOELÉTRICOS	19
3.2.1 Funcionamento dos módulos Peltier	21
3.2.2 Vantagens e desvantagens dos Módulos Peltier.....	23
3.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	24
3.3.1 Conceitos de Condução	24
3.3.2 Convecção	26
3.4 PARÂMETROS DO PROCESSO DE REFRIGERAÇÃO TERMOELÉTRICO	26
3.4.1 Taxa de bombeamento.....	26
3.4.2 Coeficiente de desempenho.....	28
3.4.3 Máxima diferença de temperatura ($\Delta T_{\text{máx}}$)	29
4 MATERIAIS.....	31
4.1. MÓDULOS TERMOELÉTRICOS	31
4.2. TANQUE METÁLICO	31
4.3. UNIDADE EVAPORADORA.....	33
4.4 TERMÔMETRO DIGITAL PENTA.....	33
4.5 BOMBA D'ÁGUA.....	34
4.6 FONTES.....	34
4.7 ANEMÔMETRO	35
4.8 TERMÔMETRO INFRAVERMELHO MT-320 MINIPA	35
4.9 TERMO HIGRÔMETRO.....	36
5 MÉTODOS E RESULTADOS	38
6 DISCUSSÕES.....	45
7 CONCLUSÃO	47

8 REFERÊNCIAS.....48

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, indicando uma tendência mundial, nota-se que os usuários de veículos automotivos estão cada vez mais preocupados com aspectos referentes ao conforto interno do que aos de desempenho veicular. Para atender estas exigências, a indústria automobilística tem desenvolvido sistemas de climatização que propiciem níveis de conforto adequados.

O sistema de refrigeração mais utilizado atualmente é o de compressão mecânica de vapor. Entretanto, tal sistema não é adequado para algumas aplicações onde há exigência, por exemplo, de baixo ruído, de alta confiabilidade ou até mesmo controle rigoroso da temperatura. Essa tecnologia faz uso de gases refrigerantes que, na maioria dos casos, são danosos ao meio ambiente. Por esse motivo, atualmente existe uma busca incansável pela obtenção de melhorias na eficiência desses sistemas, com a finalidade de reduzir do custo ambiental e energético. Como tecnologia alternativa na produção de frio, a refrigeração termoelétrica vem se destacando em virtude de seu baixo custo.

Segundo Santos (2007), existem várias formas de aproveitar o efeito termoelétrico. No entanto, as mais conhecidas e aplicadas são a geração de energia elétrica e a refrigeração, que utilizam módulos termoelétricos, feitos com elementos semicondutores tipo p-n entre duas placas de cerâmica.

Uma tecnologia promissora para cumprir essas finalidades são os dispositivos termoelétricos sólidos como as pastilhas ou células de Peltier. As pastilhas ou células de Peltier além de não utilizarem dos gases que causam danos ambientais, como nos sistemas de refrigeração comumente empregados, apresentam ainda as vantagens de: não possuírem partes móveis, serem livres de barulho ou vibrações, promoverem um controle de temperatura de alta qualidade, requererem pouca manutenção, serem compactos e de funcionamento relativamente simples (NNANNA, *et al.*, 2009,).

O estudo dos materiais termoelétricos começou por volta do século XIX, quando foi constatado que certos materiais, quando submetidos a uma diferença de temperatura, produziam tensão elétrica, o que viria a ser conhecido como efeito Seebeck. O efeito reverso, no qual através de uma tensão elétrica é possível produzir uma diferença de temperatura, ficou conhecido como efeito Peltier. Esses dois efeitos também são conhecidos como efeito termoelétrico Peltier-Seebeck.

O Efeito Peltier baseia-se na teoria de que quando uma corrente elétrica é induzida através de uma junção entre dois semicondutores com propriedades diferentes, o calor em um dos lados é absorvido e do outro dissipado. Os módulos são feitos por materiais termoelétricos semicondutores, selados entre duas placas através do qual uma corrente contínua mantém uma face quente e a outra fria.

Por fim, a utilização no meio automotivo de sistemas termoelétricos pode proporcionar a redução de emissões e impacto ambiental, devido à economia na utilização de combustíveis para funções que podem ser desempenhadas por módulos termoelétricos. Prevê-se também maior desenvolvimento do mercado de eletrônica automotiva e melhoria contínua do conforto dos passageiros, devido ao fato de que sistemas termoelétricos poderiam ser utilizados, por exemplo, para o aquecimento de assentos dos veículos em países frios e em mini-refrigeradores para bebidas, entre outras aplicações.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Analisar a viabilidade técnica de um condicionador de ar automotivo utilizando módulos termoelétricos.

2.2 ESPECÍFICOS

- a) Apresentar a aplicação dos efeitos termoelétricos no condicionamento de ar e na refrigeração através da revisão bibliográfica;
- b) Determinar as taxas de calor removido do ambiente de trabalho e a potência consumida pelo sistema através de análise experimental.
- c) Quantificar o coeficiente de performance da aplicação e verificar a viabilidade do sistema em estudo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 EFEITOS TERMOELÉTRICOS

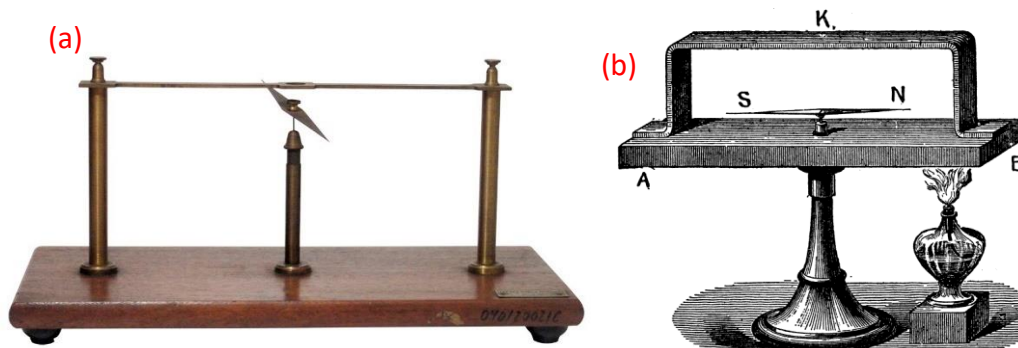
Efeitos termoelétricos são fenômenos que associam fluxo de calor com corrente elétrica (MACDONALD, 1962) (calor diretamente convertido em eletricidade); esses efeitos podem ser aplicados na construção de conversores de energia usando-se uma classe de materiais conhecidos como materiais termoelétricos (MINNICH *et al.*, 2009).

Existem três tipos de efeitos termoelétricos: efeito Seebeck, efeito Peltier e efeito Thomson. O primeiro deles ocorre quando há o surgimento de uma diferença de potencial em um circuito aberto formado por dois materiais distintos devido à diferença de temperatura nas junções. Esse efeito foi observado pela primeira vez por T.J. Seebeck em 1821.

3.1.1 Efeito Seebeck

Em 1821 o Estonês Thomas Johann Seebeck apresentou as primeiras definições do princípio da termoeletricidade, relacionando um presente gradiente de temperatura em uma estrutura bimetalúca com um campo magnético presente em suas proximidades sendo notado por alguma alteração na polaridade indicada por uma bússola onde, ao relacionar com as pesquisas de seu contemporâneo Oersted, deduziu estar fluindo uma corrente elétrica nos condutores da sua estrutura (TEJEDOR, 2006).

Figura 1 - (a) Aparelho de Seebeck; (b) representação do experimento



Fonte: Madeira (2016)

Uma diferença de temperatura entre as junções de dois materiais diferentes provoca o aparecimento de uma tensão elétrica. Cada material possui um comportamento diferente perante estes fenômenos. Sendo assim, a quantificação do

fenômeno é denominada Coeficiente de Seebeck, no qual a relação entre as grandezas envolvidas pode ser representada pela Eq. (1)

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1)$$

Onde de acordo com Fernandes (2012):

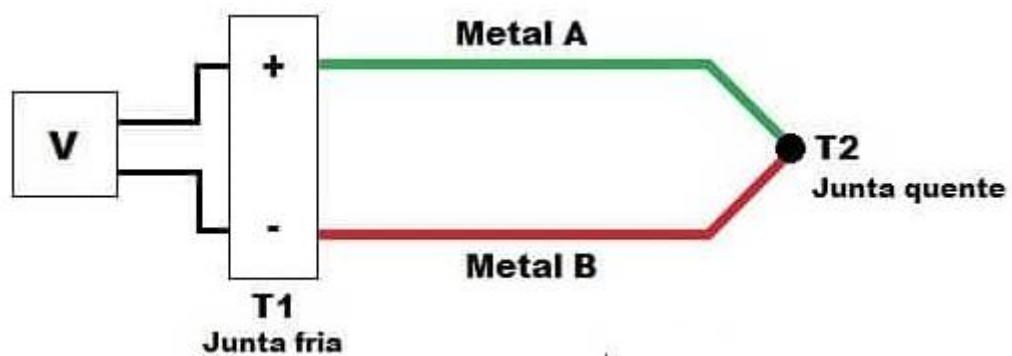
α é o Coeficiente de Seebeck

ΔV é a tensão nos terminais do dispositivo [V]

ΔT é a variação da temperatura na junção e na extremidade [°C]

Assim, a figura 2 representa esquematicamente este fenômeno através da movimentação dos elétrons de uma junção constituída por dois condutores distintos.

Figura 2 - Medição da tensão gerada



Fonte: Madeira (2016)

3.1.2 Efeito Peltier

De acordo com Fernandes (2012), o efeito Peltier consiste na passagem de corrente elétrica, com uma determinada intensidade, por dois materiais distintos, que vai fazer com que haja libertação de calor numa das uniões, enquanto na outra haverá absorção de calor. Este efeito surge devido a uma força eletromotriz existente na união, originada pelas diferentes composições de cada união. Assim, a corrente pode fluir em ambos os sentidos, mas num dos sentidos da corrente o dispositivo absorve calor do meio que o rodeia e no outro irradia o calor absorvido ao meio ambiente.

Idealmente, a quantidade de calor absorvida na extremidade fria e do calor dissipado na extremidade quente dependem do produto do coeficiente de Peltier e a corrente que flui através do material semicondutor. Praticamente o valor líquido de calor absorvido na extremidade fria devido ao efeito Peltier é reduzido por duas fontes,

o calor conduzido e calor devido ao efeito Joule ou calor de Joule (RIFFAT *et al.*, 2003).

Devido a diferença de temperatura entre as extremidades frias e quente do material semicondutor, o calor será conduzido através do material de semicondutor da extremidade quente para a extremidade fria. Com o aumento da corrente, a diferença de temperatura, e, assim, o calor conduzido, aumenta por causa do efeito Peltier.

No entanto, a outra perda, calor de Joule, é proporcional ao quadrado da corrente e, por conseguinte, torna-se eventualmente o fator dominante. Em qualquer dada corrente, o equilíbrio, térmico é estabelecido na extremidade fria, quando o efeito de Peltier na extremidade fria é igual à soma do calor conduzido mais metade do calor de Joule. A outra metade do calor de Joule vai para a extremidade quente (ASTRAIN *et al.*, 2012).

O calor de Peltier é dado pela Eq. (2):

$$Q_P = -\pi \cdot I = -\alpha T I \quad (2)$$

Onde

π é coeficiente Peltier

I é a corrente elétrica que flui na junção [A].

Para o caso mostrado na figura 2, π é positivo se a junção 1 aquece e a junção 2 resfria quando a corrente passa de 1 para 2, invertendo-se o sentido da corrente a junção que aquecia passa a resfriar.

3.1.3 Efeito Thomson

O último dos efeitos termoeletrônicos relaciona a quantidade de calor Q gerado num condutor, no qual se faz passar uma corrente elétrica, existindo, simultaneamente uma diferença de temperatura ΔT , ou seja, demonstra que a transferência de calor é proporcional à corrente elétrica e diferença de temperatura, num material termoeletrônico.

Segundo Thomson, num material condutor homogêneo, percorrido, por uma corrente elétrica, para além de uma libertação de calor por efeito de Joule, existe

libertação ou absorção de calor proporcional à intensidade de corrente, desde que exista um gradiente de temperatura no material (PIEADDE, 1997).

Partindo do princípio que existe uma diferença de temperatura, tem-se a equação 1 em que β é o coeficiente de Thomson e medido em V/C° K. Embora o efeito de Thomson não seja de principal importância para os dispositivos termoelétricos, não deverá ser desprezado nos cálculos detalhados.

O efeito de Thomson também relaciona os efeitos anteriores, de Seebeck e de Peltier, através da relação apresentada na Eq. 3 (PIEADDE, 1997):

$$q = \beta \times i \times \Delta T \quad (1) \quad (3)$$

$$\pi = \alpha \times T \quad (2)$$

π = *coeficiente de Peltier*

α = coeficiente de Seebeck

Ou seja, o coeficiente de Peltier é igual ao coeficiente de Seebeck multiplicado pela temperatura absoluta. A única exceção é quando um supercondutor apresenta resistência zero à passagem da corrente elétrica (PIEADDE, 1997).

3.2 MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

De acordo com Farias (2009), a termoeletricidade tem a sua origem com Alessandro Volta em 1800 que concluiu que a eletricidade causadora dos espasmos nas pernas do sapo estudadas por Luigi Galvani em 1780 era devida a um contato entre dois metais dissimilares. Essa conclusão foi precursora do princípio do termopar. Após estas descobertas, outros cientistas passaram a pesquisar os efeitos termoelétricos, dos quais se destacam Thomas Seebeck em 1821, Jean Peltier em 1834 e Joseph Thomson em 1848, que deram origem às denominações dos três efeitos termoelétricos, diferentes, mas relacionados entre si.

Um módulo termoelétrico ou célula termoelétrica de efeito Seebeck/Peltier, é, como o próprio nome indica, baseado nestes efeitos. É amplamente utilizado em aplicações de arrefecimento ou aquecimento onde o seu reduzido tamanho, a sua simples implementação, a vantagem de não necessitar de manutenção e o seu elevado tempo de vida, prevalecem sobre outros conversores como, por exemplo, evaporadores, condensadores ou compressores. Estes módulos são muito utilizados em pequenos frigoríficos portáteis, em equipamentos de laboratório, no arrefecimento

de processadores para aumentar o seu desempenho, adegas climatizadas (STRAZZA, 2008), entre várias aplicações.

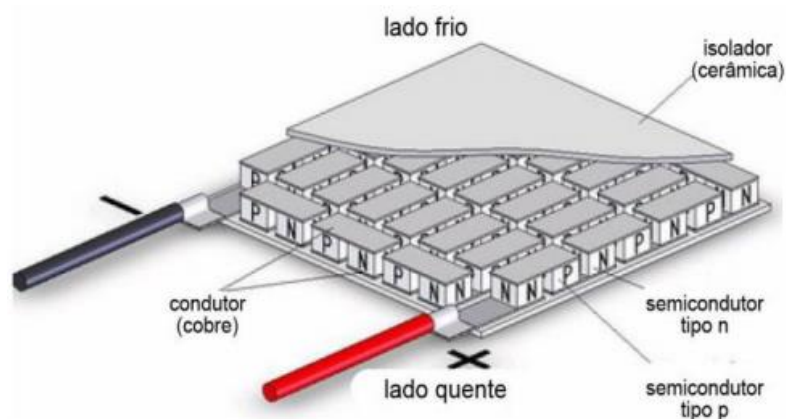
Na indústria, os módulos termoeétricos são utilizados no resfriamento de pequenos lasers, refrigeradores de diodo, pequenos geradores de corrente contínua que aproveitam o calor rejeitado por processos industriais, em circuitos de telecomunicação, etc.

Outra importante aplicação dos módulos é utilizá-los como gerador em áreas remotas (JONES *et al*, 2011), principalmente no uso doméstico, como alimentação de sistemas de comunicação, computadores portáteis (MUHTAROGLU *et al*, 2008), segurança, micro-refrigeradores e ar-condicionado (SILVA, 2010), podendo utilizar com fonte quente o calor de fogões à lenha (CHAMPIER *et al*, 2011).

Conforme Farias (2009), na indústria aeroespacial foi onde se obteve os maiores avanços e aplicações da termoeletricidade, devido à impossibilidade de se conectar à rede elétrica. A partir das aplicações nesta área é que foi possível justificar o seu emprego comercial.

A sua composição é feita por junções de materiais do tipo p e do tipo n de Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3), também chamados de termo-elementos, (SANTOS, 2010) ligados eletricamente em série por junções metálicas e termicamente em paralelo, como ilustra a Figura 3.

Figura 3 - Constituição de um módulo termoeétrico



Fonte: Portal da refrigeração (2018)

Quando é percorrida por uma corrente elétrica, esta entra pelo terminal (+), percorre todos os elementos em série e sai pelo outro terminal (-). Os pares térmicos encontram-se colocados entre duas placas de cerâmica planas a base do óxido ou

nitrato de alumínio que são utilizados para o contato térmico do módulo ao restante do sistema.

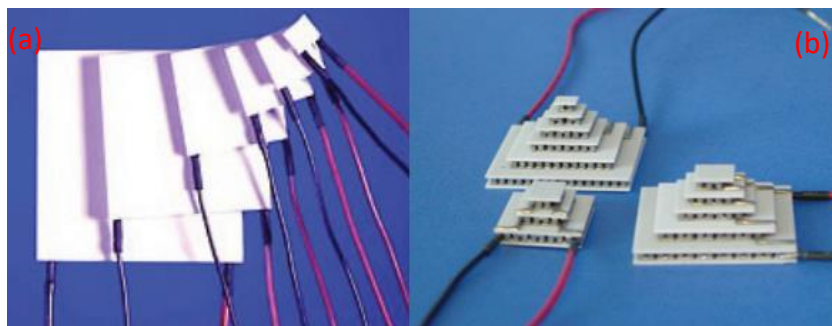
O princípio de funcionamento destes módulos baseia-se nos efeitos Seebeck e Peltier. No efeito Peltier, quando uma corrente percorre num sentido, uma das faces irá irradiar e a outra absorver calor. Quando essa corrente percorre no sentido contrário, as faces irradiadoras e absorvedoras de calor se invertem. Para uma boa eficácia, ambas as faces devem estar bem isoladas entre si. No funcionamento como geradores termoelétricos é utilizado o efeito Seebeck, onde a energia elétrica é gerada através de diferença de temperatura entre as faces.

3.2.1 Funcionamento dos módulos Peltier

O módulo é a maneira mais prática de se utilizar o efeito Peltier como refrigerador em larga escala, e consiste num arranjo de pequenos blocos de telureto de bismuto - Bi_2Te_3 do tipo N e tipo P montados alternadamente e eletricamente em série entre duas placas cerâmicas de boa condutividade térmica. Este arranjo faz com que todos os termoelementos bombeiem o calor na mesma direção - termicamente em paralelo (PORTAL DA REFRIGERAÇÃO, 2018).

Os módulos estão disponíveis no mercado em tamanhos que variam de $0,6 \times 0,6$ cm a aproximadamente 5×5 cm, e estes podem ser utilizados de diferentes maneiras: individualmente ou agrupados eletricamente em série, paralelo ou série-paralelo, Figura 4. Em algumas aplicações usa-se o módulo de multiestágios, isto é, vários módulos termicamente em série para obtenção de um maior ΔT .

Figura 4 - Módulos Peltier comerciais (a) 1 estágio; (b) múltiplos estágios



Fonte: Portal da refrigeração (2018)

Para a escolha dos módulos em um projeto de sistema de refrigeração devem ser levados em consideração alguns parâmetros que controlam o desempenho destes (MOURA, 2010). Os fabricantes disponibilizam curvas para algumas grandezas

relacionadas aos módulos termoeletrônicos por eles fabricados. Observando os limites de operação temos as combinações de valores de grandezas para os quais o sistema funcionará com desempenho necessário para cada tipo de projeto.

No quadro 1, tem-se as especificações do módulo *TEC1-12706*, fabricado pela empresa *Hebei IT (Shangai) Co. Ltd.*, utilizado no estudo para duas temperaturas do lado quente T_q .

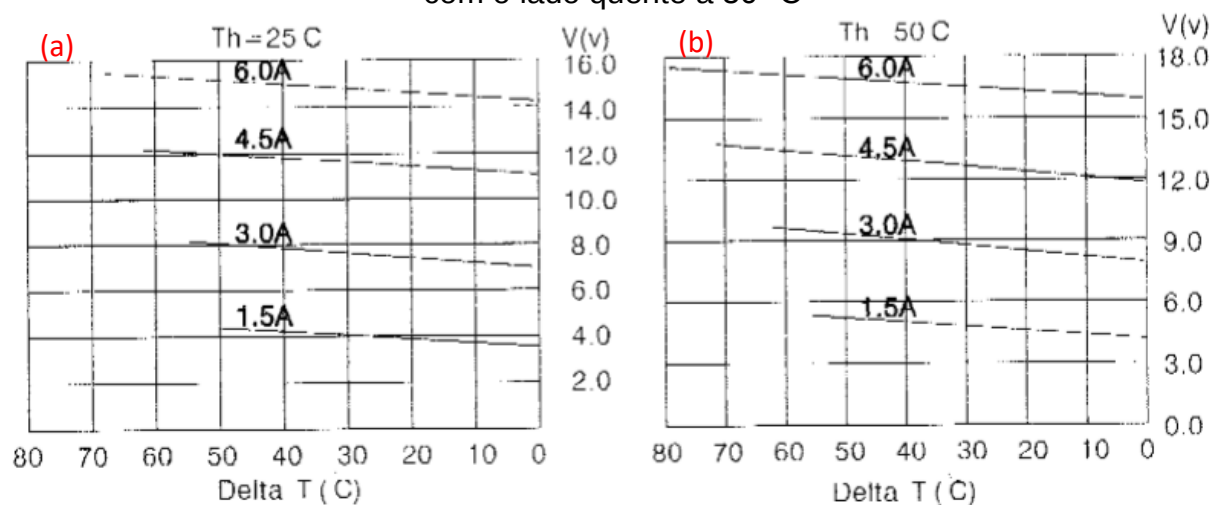
Quadro 1 - Especificações do módulo TEC1-12706

TEC1-12706		
Temperatura do Lado Quente (°C)	25	50
$Q_{\max}$ (Watts)	50	57
$\Delta T_{\max}$ (°C)	66	75
$I_{\max}$ (A)	6,4	6,4
$V_{\max}$ (V)	14,4	16,4
Resistência (Ω)	1,98	2,30

Fonte: Hebei IT (Shangai) Co. Ltd (s/a)

Ainda de acordo com o catálogo do fabricante *Hebei IT (Shangai) Co. Ltd* para temperaturas de lado quente de 25°C e 50°C obteve-se na figura 5 (a) curvas de corrente que circulam pelo módulo em função da tensão aplicada com $T_h = 25^\circ\text{C}$ e (b) curvas de corrente que circulam pelo módulo em função da tensão aplicada com T_h em 50 °C.

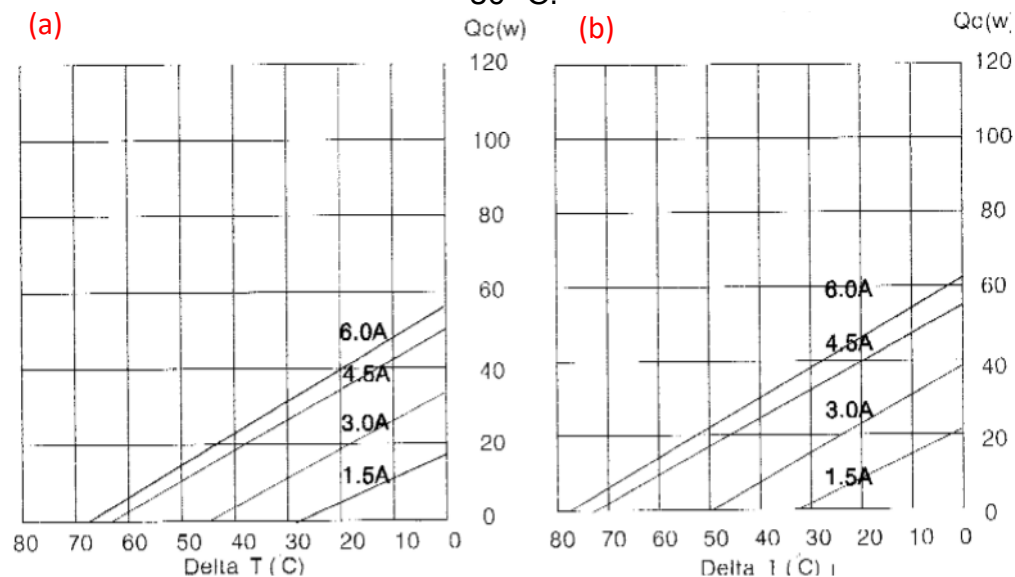
Figura 5 – (a) Curvas de corrente com o lado quente a 25 °C (b) Curvas de corrente com o lado quente a 50 °C



Fonte: Hebei IT (Shangai) Co. Ltd (s/a)

A figura 6 (a) relaciona a corrente em função gradiente de temperatura com $T_h = 25^\circ\text{C}$ e (b) corrente em função do gradiente de temperatura com $T_h = 50^\circ\text{C}$.

Figura 6 - (a) Curvas de corrente com T_h a 25 °C (b) Curvas de corrente com T_h a 50 °C.



Fonte: Hebei IT (Shangai) Co. Ltd (s/a)

3.2.2 Vantagens e desvantagens dos Módulos Peltier

O uso da tecnologia Peltier disponível nos módulos tem muitas vantagens como:

- a) Não utiliza partes mecânicas móveis para refrigeração, ideal para uso com câmeras de dispositivo de carga acoplada;
- b) Aquece ou resfria dependendo apenas da polaridade da alimentação, ideal para aplicações que exigem o controle eletrônico preciso da temperatura como lasers de diodo utilizados em telecomunicações;
- c) Dispensa o uso de gases refrigerantes, tecnologia 100 % estado sólido no que implica alta confiabilidade e baixos níveis de ruído;
- d) Permite a refrigeração pontual (localizada);
- e) Funcionam em qualquer orientação com/sem gravidade diferentemente dos refrigeradores baseados em compressores.

Mesmo com o grande número de vantagens, essa tecnologia também possui desvantagens, como:

- a) o alto custo dos semicondutores cuja fabricação exige tecnologia altamente especializada;

- b) a fonte de corrente contínua deve ser de baixa tensão e alta corrente;
- c) baixa eficiência energética;
- d) a aplicação se restringe a casos onde o custo do sistema e eficiência energética são menos importantes que disponibilidade de energia, a confiabilidade do sistema e tranquilo ambiente de operação.

3.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O calor, como forma de energia, pode ser transferido de um sistema para outro, como um resultado da diferença de temperatura. A análise termodinâmica está relacionada com a quantidade de transferência de calor, transferida de um sistema em um estado de equilíbrio para o outro (HILL, 1988).

Transferência de calor é o processo pelo qual o calor flui de um corpo de alta temperatura para um de temperatura mais baixa. O corpo quente é denominado fonte quente e o corpo frio fonte fria, ou receptor. Naturalmente, a transmissão de calor se dá da fonte quente para a fonte fria, e são três os modos de transmissão: condução, convecção e radiação, muito embora nos processos de troca térmica quase sempre ocorre a combinação de dois ou três destes modos. É possível identificar processos de transferência de calor em termos de equações e taxas apropriadas (INCROPERA *et al*, 2008).

Logo, um corpo nunca contém calor, mas o calor é identificado como tal quando cruza a fronteira do sistema. O calor é, portanto, um fenômeno transitório, que cessa quando não existe mais diferença de temperatura. Para aplicação prática dos efeitos Seebeck e Peltier o experimento utiliza os três modos de transferência de calor.

3.3.1 Conceitos de Condução

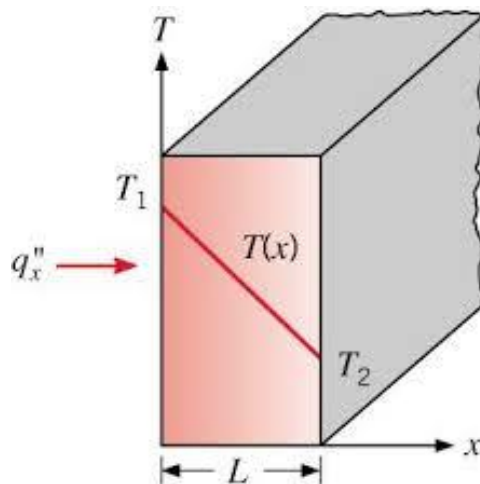
De acordo com Incropera *et. al.* (2008), a condução pode ser definida como o processo pelo qual a energia é transferida de uma região de alta temperatura para outra de temperatura mais baixa dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes de contato direto. Estes mecanismos podem ser visualizados como a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas de uma substância devido a interações entre elas.

Tomando o caso da figura 7, condução de calor constante através de uma grande parede plana de espessura L e a área A , onde a diferença de temperatura entre a parede é dada por: $\Delta T = T_2 - T_1$ (ÇENGEL, 2002).

Experiências mostraram que a taxa de transferência de calor Q através da parede é dobrada, quando a diferença da temperatura ΔT , da parede ou da área A , perpendicular à direção da transferência de calor, é dobrado. Mas é reduzida à metade quando a espessura da parede L é dobrada.

Assim, podemos concluir que a taxa de condução de calor através de uma camada plana é proporcional à diferença de temperatura através da camada e da área de transferência de calor, mas é inversamente proporcional à espessura da parede (ÇENGEL, 2002).

Figura 7 - Esquema representativo da condução em uma parede plana



Fonte: Çengel (2002)

Para a condução térmica, a Equação 4 é conhecida como Lei de Fourier, e é utilizada para se obter fluxo de calor transferido por condução através de uma parede unidimensional, de acordo com INCROPERA et al (2008).

$$\dot{Q} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Onde:

$\dot{Q}$ = Fluxo de calor por condução [W]

k = Condutividade térmica do material [W/m.k]

A = Área de seção transversal material [m²]

dT =Gradiente de temperatura

dx =Comprimento do Trajeto do calor [m]

A condutividade térmica (k) é uma propriedade física dos materiais que mede a capacidade de transferir calor através da sua seção. É definida como a potência térmica transferida por unidade de área ao longo de uma espessura unitária sujeita a uma diferença de temperatura unitária (W/m.K).

3.3.2 Convecção

A transferência de calor por convecção ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície, quando os dois se encontram a diferentes temperaturas. A transferência acontece tanto pelo movimento molecular aleatório quanto pelo movimento global do fluido. Ela pode ser natural (livre) ou forçada, dependendo das condições de escoamento do fluido. A Equação 5 é utilizada para se obter a quantidade do fluxo de calor transferido por convecção, independente do processo de convecção, de acordo com INCROPERA *et al* (2008).

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (5)$$

Onde:

$\dot{Q}$ = Fluxo de calor por condução [W]

h = Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m².k]

A =Área de seção transversal material [m²]

ΔT =Diferença de temperatura entre a superfície e o fluido [K]

3.4 PARÂMETROS DO PROCESSO DE REFRIGERAÇÃO TERMOELÉTRICO

Os parâmetros mais importantes para a avaliação da eficiência de um processo de refrigeração termelétrico são:

- a) a taxa de bombeamento de calor (Q_f) e;
- b) o coeficiente de desempenho (ϕ), também chamado (COP);
- c) a máxima diferença de temperatura ($\Delta T_{\text{máx}}$) que o dispositivo irá produzir.

3.4.1 Taxa de bombeamento

O “efeito refrigerante” ou taxa de bombeamento de calor é definido pela taxa de remoção de calor do corpo frio. A taxa de bombeamento de calor transferido do

reservatório frio, conforme Heikes e Ure Jr., (1961), é dada pela soma de três termos:

a) o calor de Joule liberado de cada corpo por unidade de tempo (Eq. 6):

$$Q_J = \frac{1}{2} I^2 R \quad (6)$$

Onde:

I = a corrente medida no sistema e;

R = é a resistência total dos materiais semicondutores do tipo n e tipo p que compõem o módulo termoeletrônico.

O calor Joule é o calor transferido da fonte térmica quente para a fria, em virtude da condutividade térmica do material e do gradiente de temperatura; é um fenômeno irreversível, que reduz o desempenho do sistema.

b) a taxa de transferência de calor para corrente igual a zero entre os corpos quente e frio (Eq. 7);

$$Q = K \Delta T \quad (7)$$

c) e a taxa de absorção de calor de Peltier de cada corpo (Eq. 8):

$$Q_P(T) = -\pi_{pn}(T) I_{pn} \quad (8)$$

Onde:

$\pi_{pn}(T)$ = o coeficiente de Peltier na temperatura;

T da associação composta pelo material do tipo p e do tipo n;

I_{pn} = a corrente fluindo na junção no sentido p para n.

A partir das equações (3) e (8), temos que:

$$-\pi_{pn}(T) I_{pn} = -\alpha T I_{pn} \quad (9)$$

Desta forma, a taxa de bombeamento de calor é dada pela soma das equações anteriores:

$$Q_f = \alpha T_f I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T \quad (10)$$

No bombeamento de calor a direção positiva da corrente é de n para p na junção fria. Como a tensão nos terminais é dada pela soma das tensões termoeletrônica e a tensão Joule:

$$V = \alpha \Delta T \quad (11)$$

$$V = IR$$

Logo,

$$V = \alpha \Delta T + IR \quad (12)$$

Para a corrente tem-se:

$$I = \frac{V - \alpha \Delta T}{R} \quad (13)$$

A potência fornecida pode ser encontrada pela Eq. (14):

$$P = VI \quad (14)$$

A partir das equações (13) e (14), tem-se:

$$P = \alpha I \Delta T + I^2 R \quad (15)$$

Essa equação também pode ser escrita em função de V, substituindo (13) em (14). Logo:

$$P = V \left(\frac{V - \alpha \Delta T}{R} \right) \quad (16)$$

3.4.2 Coeficiente de desempenho

O coeficiente de desempenho é o quociente da taxa de remoção de calor do corpo frio dividido pela potência aplicada ao circuito (HEIKES & URE JR., 1961), assim:

$$\varphi = \frac{Q_f}{P} \quad (17)$$

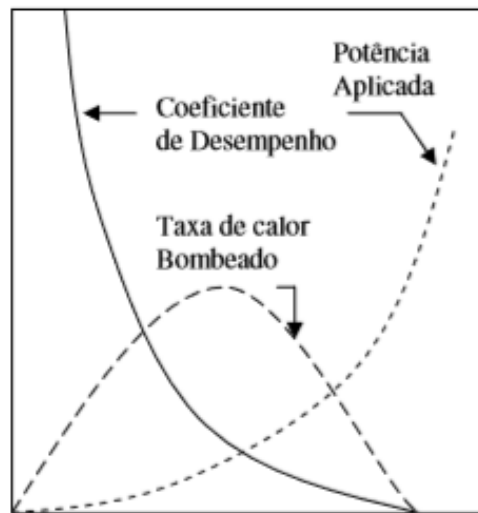
Logo,

$$\varphi = \frac{\alpha T_f I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T}{\alpha I \Delta T + I^2 R} \quad (18)$$

Para Heikes; Ure (1961), o coeficiente de desempenho dependerá da diferença de temperatura entre os corpos quente e frio, que será maior com uma diferença de temperatura menor.

Na Figura 8 o coeficiente de desempenho, a taxa de bombeamento de calor e a potência fornecida de um refrigerador típico são mostrados como função da diferença de temperatura. É assumido que para cada variação de temperatura (ΔT) a tensão aplicada pode ser ajustada para maximizar o coeficiente de desempenho.

Figura 8 - Desempenho de uma associação termoeétrica em função da diferença de temperatura



Fonte: Heikes; Ure (1961) para T_h fixo

Ainda segundo Heikes; Ure (1961), quando a diferença de temperatura diminui o coeficiente de desempenho tende a um valor máximo. A taxa de bombeamento de calor inicia em zero atinge um valor máximo e depois diminui quando a diferença de temperatura aumenta. Pode ser visto que a taxa de bombeamento de calor será pequena para pequenas diferenças de temperatura. Porém deve ser lembrado que os parâmetros devem ser ajustados para maximizar o coeficiente de desempenho.

3.4.3 Máxima diferença de temperatura ($\Delta T_{\text{máx}}$)

Fazendo-se a derivada da taxa de transferência de calor Equação (9) com relação a I e igualando-se o resultado a zero, determina-se qual é a corrente que maximiza a taxa de bombeamento de calor.

A partir da equação (10), temos que o valor da corrente que satisfaz a condição $\frac{dq}{dI} = 0$ é:

$$\frac{dq}{dI} = \alpha T_f - IR \quad (19)$$

Portanto, o valor da corrente é dado por:

$$I = \frac{\alpha T_f}{R} \quad (20)$$

Substituindo na Eq. (10), temos:

$$Q_f = \alpha T_f \left(\frac{\alpha T_f}{R} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha T_f}{R} \right)^2 R - K \Delta T \quad (21)$$

$$Q_f = \left(\frac{\alpha^2 T_f^2}{2R} \right) - K \Delta T \quad (22)$$

Da equação (10), temos que a máxima diferença de temperatura que um refrigerador termoelétrico é capaz de produzir é:

$$\Delta T_{max} = \frac{\alpha^2 T_f^2}{2RK} \quad (23)$$

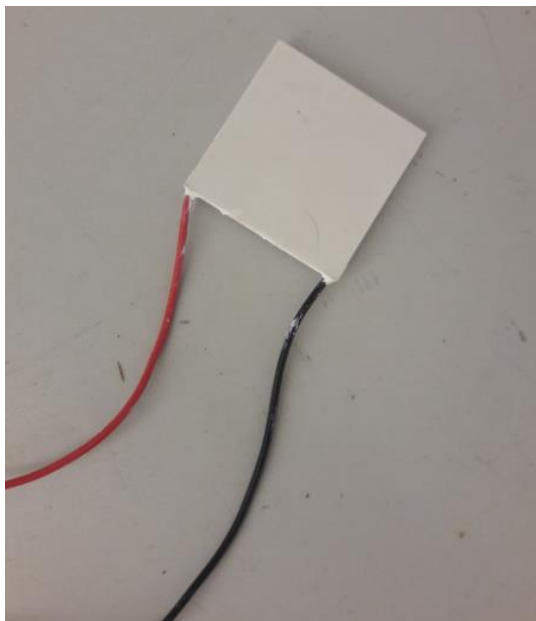
Esta situação ocorre quando a junção fria está termicamente isolada.

4 MATERIAIS

4.1. MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

Para o experimento proposto foram utilizados seis módulos termoeletricos do Fabricante Hebei I.T (Shangai) Co Ltd, modelo TEC1-12706, com dimensões de 40x40x3,4 mm, conforme figura 9. Esses módulos utilizam óxido de alumínio como material cerâmico e possuem 127 pares de material semicondutor à base de Silício.

Figura 9 - Módulo Termoeletrico do experimento



Fonte: Acervo pessoal (2018)

4.2. TANQUE METÁLICO

O tanque utilizado como reservatório de água no experimento tem dimensões de 280x100x80mm e foi fabricado utilizando uma chapa fina de ferro, figura 10. Após cortada, a chapa foi dobrada nas dimensões pretendidas e logo depois foram aplicados vários cordões de solda para o fechamento do tanque.

Em seguida, utilizou silicone para vedar possíveis espaços que poderiam deixar a água vaziar.

Figura 10 - Chapa de aço utilizada para o tanque



Fonte: Acervo pessoal (2018)

Por último, todo o tanque foi isolado utilizando espuma de polietileno revestida com alumínio para evitar perdas térmicas para o meio. Na figura 11 é possível visualizar o tanque já finalizado que foi utilizado no projeto.

Figura 11 - Tanque metálico utilizado no projeto



Fonte: Acervo pessoal (2018)

4.3. UNIDADE EVAPORADORA

Foi utilizado uma unidade evaporadora automotiva comum para o processo de troca de calor entre a água gelada e o ar do ambiente a ser refrigerado. O modelo consiste basicamente em uma serpentina, onde passará a água gelada, em contato com várias aletas para melhorar o processo de troca de calor.

Figura 12 - Unidade evaporadora comum utilizada no projeto



Fonte: Acervo pessoal (2018)

4.4 TERMÔMETRO DIGITAL PENTA

Para as medições das temperaturas da água antes e depois de atravessar o tanque, assim como para as medições da temperatura ambiente e dentro da bancada, utilizou-se um termômetro digital com 5 pontas de prova. Esse modelo foi escolhido por ser uma ferramenta de grande versatilidade e excelente para medições de temperaturas nesse tipo de projeto. Algumas especificações desse dispositivo são apresentadas no quadro 2.

Quadro 2 - Características Termômetro digital penta III

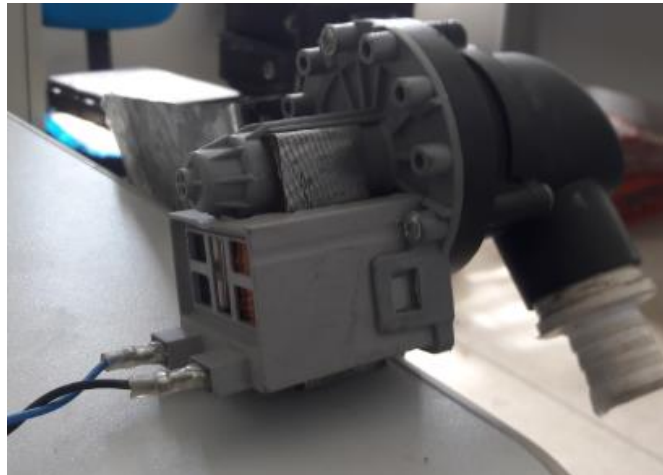
Alimentação	9 V
Faixa de medição	-50 a 105° C
Temperatura de operação	0 a 50° C
Resolução	0,1° C de -50 a 105 ° C
Número de sensores	5
Cabo dos sensores	1x26 AWG tipo microfone

Fonte: Full Gauge (2018)

4.5 BOMBA D'ÁGUA

Foi utilizado uma bomba elétrica de drenagem (figura 13) da fabricante RobertShaw modelo BAV1101-05UC com potência de 34 W.

Figura 13 - Bomba d'água utilizada no projeto



Fonte: Acervo pessoal (2018)

4.6 FONTES

Foram utilizadas duas fontes chaveadas de 12V/25A, conforme figura 14.

Figura 14 - Fontes de alimentação



Fonte: Acervo pessoal (2018)

4.7 ANEMÔMETRO

Para medição da velocidade do ar do cooler instalado na unidade evaporadora foi utilizado um anemômetro do fabricante ICEL modelo AN-3030, figura 15. As especificações desse aparelho estão mostradas no quadro 3.

Quadro 3 - Especificações Anemômetro ICEL NA-3030

Alimentação	9 V
Faixa de medição	1 a 25 m/s
Temperatura de operação	0 a 50° C
Display	LCD Duplo

Fonte: ICEL (2018)

Figura 15 - Anemômetro digital NA-3030



Fonte: Acervo pessoal (2018)

4.8 TERMÔMETRO INFRAVERMELHO MT-320 MINIPA

Foi utilizado também para medições de temperatura um termômetro infravermelho modelo MT-320 MINIPA, figura 16. Esse tipo de aparelho consegue

fazer medições de temperatura sem contato através da energia infravermelha irradiada da superfície mirada.

Figura 16 - Termômetro Infravermelho MT-320 MINIPA



Fonte: Acervo pessoal (2018)

As especificações do modelo utilizado estão apresentadas no quadro 4.

Quadro 4 - Especificações do Termômetro Infravermelho MT-320 MINIPA

Alimentação	9 V
Faixa de medição	-50 a 580°C
Temperatura de operação	0 a 50°C
Resolução	0,1°C
Tempo de resposta	< 0,8 segundos
Resposta Espectral	8~14 μm

Fonte: MINIPA (2018)

4.9 TERMO HIGRÔMETRO

Foi utilizado um termo higrômetro digital da marca ICEL modelo HT-210, figura 17, para medições de temperatura no teste com água parada.

Figura 17 - Termo Higrômetro digital Icel HT-20



Fonte: Acervo pessoal (2018)

As especificações do modelo utilizado se encontram no quadro 5.

Quadro 5 - Especificações do Termo Higrômetro digital ICEL HT-20

Alimentação	1,5 V
Faixa de medição de temperatura	-50 a 70°C
Faixa de medição de umidade	10%RH a 90%RH
Resolução	0,1°C e 0,1%RH

Fonte: ICEL (2018)

5 MÉTODOS E RESULTADOS

Primeiramente cada módulo termoeletrico foi testado individualmente. Para o experimento foram utilizados três módulos termoeletricos em três tipos diferentes de dissipadores de calor com características parecidas. O lado quente dos módulos foi colocado em contato com os dissipadores e foi utilizada pasta térmica para se obter um melhor contato. O lado frio dos módulos se encontrava inicialmente em torno de 23,4 °C e posteriormente as placas foram ligadas à fonte de energia.

Figura 18 - Temperatura Inicial dos módulos



Fonte: Acervo pessoal (2018)

Foram feitas dez medições de temperatura, a cada trinta segundos, para os três tipos de dissipadores. Os resultados obtidos estão mostrados no quadro 6.

Quadro 6 - Resultados do teste com os módulos individuais

Dissipadores			
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
1	7°C	6,1°C	8°C
2	5,4°C	3,5°C	2,8°C
3	2,1°C	1,7°C	4,5°C
4	-0,5°C	-1,3°C	0,5°C
5	-1,5°C	0,8°C	-1,4°C
6	-1°C	-1,5°C	-2,8°C
7	-0,8°C	-2,5°C	-2,5°C
8	0,9°C	-2,1°C	-3,2°C
9	-1,6°C	-2,2°C	-3°C
10	-1,5°C	-0,5°C	-3,2°C

Fonte: Dados da pesquisa (2018)

Figura 19 - Menor temperatura obtida no teste



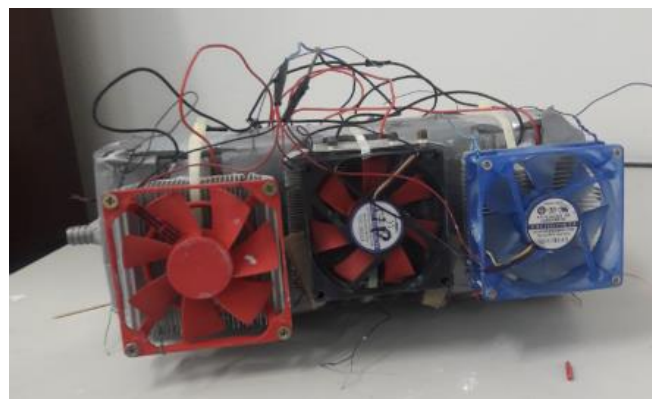
Fonte: Acervo pessoal (2018)

Em seguida, foi testado a capacidade de resfriamento do conjunto proposto com os seis módulos ligados.

Como a capacidade máxima de corrente de cada fonte era de 25 A, foi utilizado três módulos em paralelo para cada fonte, figura 20, pois a corrente máxima de cada módulo é de 6,4 A, com os três chegando ao máximo de 19,2 A.

Os seis módulos termoeletrônicos foram fixados ao tanque com os lados frios das placas voltadas para o tanque de modo a conseguir retirar calor da água. Foram acoplados a cada módulo dissipadores de calor conectados a coolers, de modo a melhorar ainda mais a dissipação de calor. Utilizou-se pasta térmica para melhorar a região de contato tanto na interface tanque-módulo como na interface módulo-dissipador.

Figura 20 - Módulos conectados em paralelos três a três



Fonte: Acervo pessoal (2018)

A água do tanque se encontrava inicialmente a 26,9 °C.

Figura 21 - Temperatura inicial da água parada



Fonte: Acervo pessoal (2018)

A ponta de prova do termo higrômetro foi colocada dentro do tanque para as mediações de temperatura com a água parada e foram feitas dez medições, uma a cada cinco minutos. Os resultados estão mostrados no quadro 7.

Quadro 7 - Resultados Teste com água parada

	Temperatura
1	26,9 °C
2	24,1°C
3	23,2°C
4	21,2°C
5	19,6°C
6	18,7°C
7	17,8°C
8	16,2°C
9	14,5°C
10	14,1°C

Fonte: Dados da pesquisa (2018)

Figura 22 - Temperatura final da água parada



Fonte: Acervo pessoal (2018)

Por último foi realizado um teste utilizando o sistema com uma bomba conectada, fazendo a água circular percorrendo o caminho bomba-reservatório-evaporador. O evaporador foi colocado em uma bancada de modo a simular o ambiente a ser refrigerado, figura 23. A bancada tem dimensões de 740x740x700 mm e foi isolada com poliestireno com espessura de 50 mm nas laterais e 20 mm na parte inferior. Toda a tubulação do sistema foi isolada utilizando espuma de polietileno com revestimento de alumínio.

Figura 23 - Bancada de teste do sistema

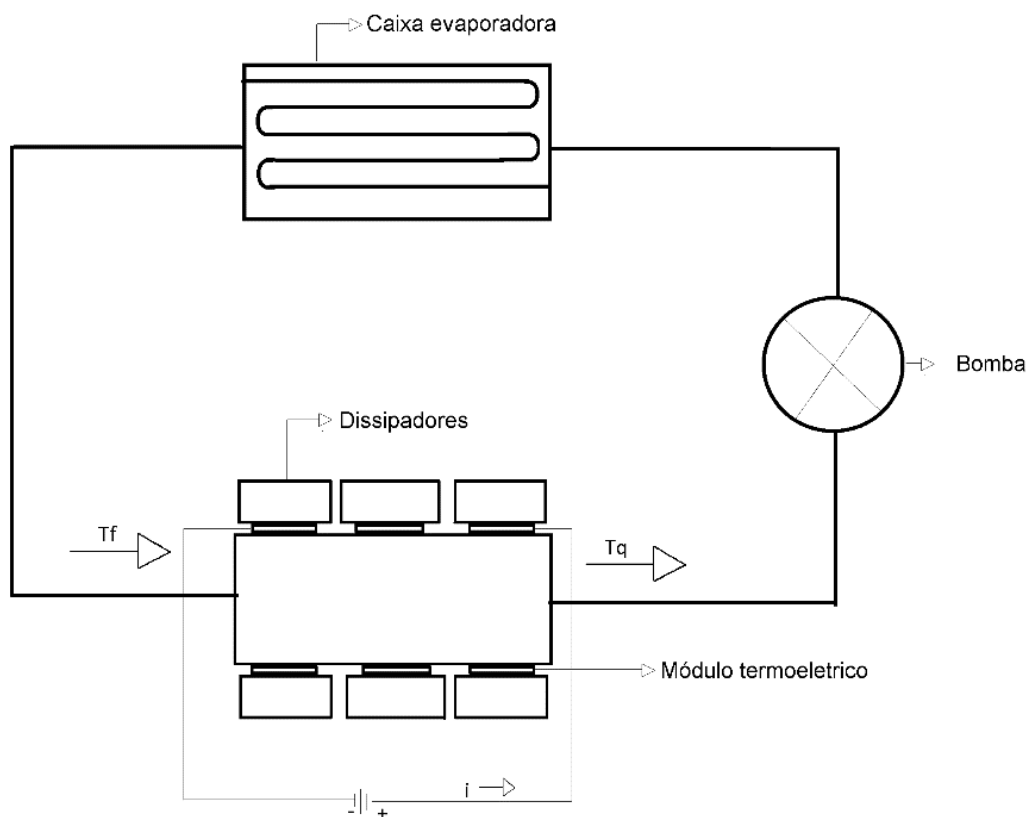


Fonte: Acervo pessoal (2018)

A água inicialmente a temperatura ambiente foi bombeada de modo que atravessasse o tanque de resfriamento que está com o sistema termoeletrico acoplado, fazendo assim baixar a sua temperatura. E, seguida, essa água mais fria vai passar pelo evaporador, trocando assim calor com o ar do ambiente a ser refrigerado, fazendo-o baixar de temperatura.

Foi utilizado um termopar com cinco pontas de prova. Uma ponta de prova foi colocada na entrada do reservatório, outra na saída, outra deixada no ambiente fora da bancada e outra dentro da bancada. A velocidade do ar no evaporador foi medida com um anemômetro e foi registrado em média 2m/s. Na figura 24 é possível visualizar o esquema do sistema proposto.

Figura 24 - Esquema do sistema proposto



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 25 - Sistema proposto pronto

Fonte: Acervo pessoal (2018)

O sistema foi colocado em funcionamento onde foram realizadas quatorze medições em intervalos de tempos crescentes de modo a testar a capacidade dos módulos. Os resultados estão apresentados no quadro 8.

Quadro 8 - Resultados do teste com o sistema completo

	T_{ent} (°C)	T_{sai} (°C)	T_{amb} (°C)	T_{int} (°C)	T_{tempo} (min)
1	23,5	23,4	23,0	23,3	0
2	23,1	23,1	23,1	23,3	2
3	23,0	22,9	23,3	23,4	4
4	22,9	22,8	23,3	23,2	6
5	22,8	22,7	23,2	23,1	8
6	22,4	22,4	23,3	22,9	10
7	21,5	21,4	23,8	22,2	20
8	19,7	19,6	24,2	21,7	30
9	19,0	18,8	24,2	21,4	40
10	18,3	18,3	24,8	20,7	50
11	17,5	17,2	25,0	20,2	60
12	17,0	16,9	25,2	19,7	70
13	17,9	17,9	25,3	20,3	80
14			25,6		90 (desligado)

Fonte: Dados da pesquisa (2018)

Na figura 23 (a) é apresentada a temperatura interna da bancada inicial e na (b) a temperatura interna mais baixa através das medições em intervalos de tempos crescentes.

Figura 23 – (a) Temperatura interna inicial (b) temperatura interna mais baixa



Fonte: Acervo pessoal (2018)

6 DISCUSSÕES

Pelo teste dos módulos individuais foi observado que módulos termoelétricos são bastante eficientes em retirar calor de um lado e transferir para o outro, visto que os lados frios saíram de uma temperatura de quase 24 °C para até -3,2 °C em questão de segundos, podendo chegar em temperaturas ainda mais baixas caso se obtenha uma dissipação de calor ainda mais eficiente.

No teste com água parada o sistema projetado obteve desempenho satisfatório, visto que conseguiu baixar a temperatura da água do tanque em 12,8 °C, ou seja, forneceu aos 2,24 litros de água cerca de 120 KJ.

No teste da bancada onde foi simulado um ambiente automotivo a ser refrigerado foi observado que o sistema também apresentou um desempenho razoável, visto que conseguiu baixar a temperatura do ambiente interno em quase 4 °C. Observou-se também que após 70 minutos de operação o sistema começou a esquentar e logo foi desligado. Retirados os módulos, foi constatado que dois dos seis módulos estavam queimados. A possível causa dessa queima foi que os módulos já estavam um pouco degradados devido a experimentos realizados passados no laboratório.

Por último resolveu-se investigar a capacidade de refrigeração do sistema. Como não se possuía equipamentos que pudesse auxiliar em medições mais exatas das temperaturas do lado quente e lado frio dos módulos, estabelecemos algumas condições iniciais para o nosso cálculo:

- a) Definiu-se a temperatura do lado quente em 50 °C;
- b) Com base em observações durante o experimento, definimos uma diferença de temperatura entre os lados do módulo de 25 °C;
- c) Os módulos foram alimentados com uma corrente de 6A e uma tensão de 12 V;
- d) Foi desprezada a tensão termoelétrica em cada terminal.

Pelas curvas de desempenho que foi disponibilizado pelo fabricante dos módulos apresentadas pela figura 6 (b), observou que pelas condições estabelecidas acima, cada módulo irá fornecer cerca de 42 W. Como temos seis módulos, o Q_f será então:

$$Q_f = (6)(42) = 252 \text{ W}$$

Utilizando a Eq. (14) para calcular a potência fornecida para cada módulo e sabendo que foram utilizados seis módulos, temos que:

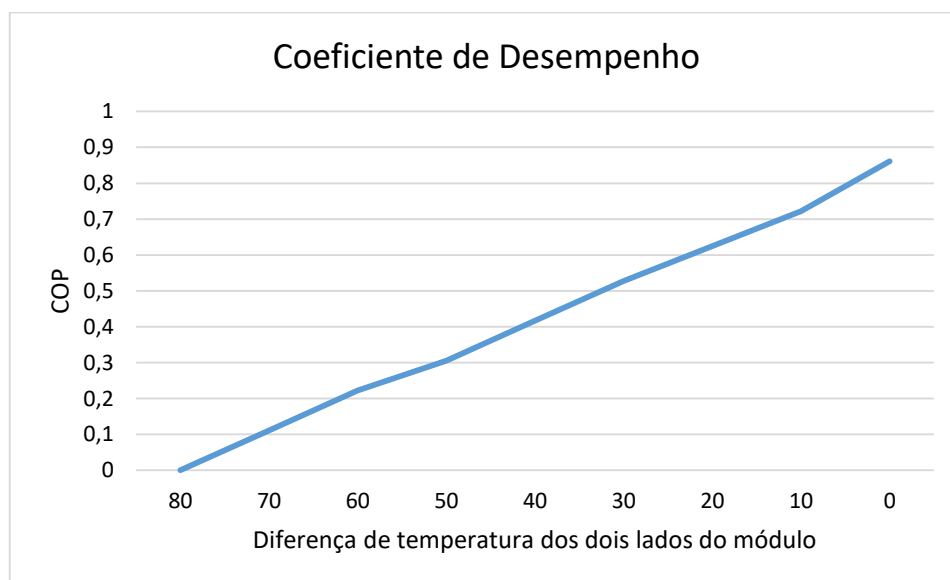
$$P = (6)VI = (6)(12)(6) = 432 \text{ W}$$

A partir da Eq. (17), temos que o coeficiente de desempenho é de:

$$\varphi = \frac{Q_f}{P} = \frac{252}{432} = 0,583$$

Comparando com vários valores de diferença de temperatura entre os lados do módulo obtemos o gráfico abaixo. Observa-se então a importância de um bom sistema de dissipação de calor, pois quanto mais calor o sistema de dissipação remover do lado quente, maior será nossa taxa de transferência de calor e consequentemente maior será nosso coeficiente de desempenho.

Figura 26 - COP para diversos valores de diferença de temperaturas



Fonte: Dados da pesquisa (2018)

7 CONCLUSÃO

Os sistemas termoelétricos aos poucos vêm ganhando mais espaço nas aplicações de refrigeração convencionais. No entanto, essa tecnologia ainda está em fase de análise e desenvolvimento. É esperado que esse tipo de sistema cresça gradativamente como uma alternativa aos meios tradicionais de refrigeração veicular, pois, ao contrário dos demais, esse tipo de sistema não oferece nenhum tipo de dano ao meio ambiente.

Nos ensaios experimentais observou-se que de fato os módulos termoelétricos são eficazes em transferir calor, desde que esse calor seja corretamente dissipado no lado quente. Quanto mais calor se consegue dissipar, melhor será o desempenho do sistema. Este é, portanto, um dos caminhos para a otimização dessa tecnologia, descobrir meios mais eficazes de retirar calor do lado quente.

Inicialmente esperou-se resultados mais satisfatórios, mas no decorrer de toda a fase experimental deparou-se com várias variáveis que não estavam antes no projeto como, por exemplo, o material do reservatório de água do sistema poderia ser feito de um material com melhor condução de calor; alguns módulos adquiridos não apresentaram qualidade satisfatória por não terem passado por um bom processo de controle de qualidade; a tubulação do sistema tem que estar muito bem isolada para evitar ao máximo a troca de calor com o meio; entre outros.

Portanto, apesar dos resultados serem um pouco diferentes dos esperados, o protótipo mostrou-se capaz de reproduzir de maneira satisfatória o comportamento de um sistema de refrigeração termoelétrico em um condicionador de ar veicular.

Mesmo os resultados de desempenho encontrados para esse tipo de sistema ainda não apresentarem a mesma eficiência dos sistemas convencionais, não se deve desencorajar a busca pela otimização desse tipo de tecnologia.

Conclui-se que a tecnologia estudada é de fato promissora e, com maiores investimentos na área será possível viabilizar economicamente esse tipo de tecnologia para aplicações em que demandem maiores taxas de transferência de calor, como é o caso da refrigeração automotiva.

8 REFERÊNCIAS

- ASTRAIN, M. A.; RODRÍGUEZ A. **Improvement of a thermoelectric and vapour comp hybrid refrigerator**. Applied Thermal Engineering. Vol. 39. Pages 140-150, 2012.
- ÇENGEL Yunus A. **Heat Transfer: A Practical Approach** [Book]. - [s.l.]: Mcgraw-Hill, 2002.
- CHAMPIER, D.; BÉDÉCARRATS, J.P.; KOUSKSOU, T.; RIVALETTO, M.; STRUB, F.; PIGNOLE, P., **Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove**. Energy. v. 36, p. 1518-1526, 2011.
- FARIAS, S. R. A., **Protótipo de um microgerador termoelétrico de estado sólido: cogeração a gás**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.
- FERNANDES, A. E. S. dos S. **Conversão de Energia com Células de Peltier**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energias Renováveis - Conversão Elétrica e Utilizações Sustentáveis, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012, 119 p.
- FULL GAUGE. **Termômetro penta**. Disponível em <<http://www.fullgauge.com.br/manual-de-produto-45>> Acesso em jun. 2018.
- HEIKES, R. R., URE JR., R. W. **Thermoelectricity: Science and Engineering**. Interscience publisher's - New York 1961, 569 p.
- HILL MCGRAW HANDBOOK OF APPLIED THERMAL DESIGN [BOOK]. - NEW YORK: [S.N.], 1988.
- HUMEL, V. **Potenciais Aplicações de Módulos Termoelétricos**. Monografia. Universidade de São Paulo. Lorena, 2014. 47p.
- ICEL. **Termo higrômetro**. Disponível em <<http://www.icel-manauas.com.br/manual/HT210%20manual%20de%20instru%C3%A7%C3%B5es%20-%20junho%202018.pdf>> Acesso em jun. 2018.
- ICEL. **Anemômetro**. Disponível em <https://www.eletopecas.com/_uploads/ProdutoDownload/produto_6260.pdf> Acesso em jun. 2018.
- INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6 ed. - LTC. Rio de Janeiro, 2008.
- JONES, B. L.; JACKSON, K.; JAMES, A.; MELDRUM, D.; ROSE, M. C., **Powering sea-ice instrumentation via the Seebeck Effect**. Cold Regions Science and Technology, v.68, p. 60-67 2011.
- MACDONALD, D. K. C. **Thermoelectricity: an introduction to the principles**. 1.ed. New York: John Wiley & Sons. 1962.
- MADEIRA, D. **Medição de temperatura: Termopares – Introdução**. Disponível em <<https://www.embarcados.com.br/medicao-de-temperatura-termopares/>> Acesso em jun. 2018.
- MINIPA. **Termômetro infravermelho digital**. Disponível em <<http://www.minipa.com.br/images/Manual/MT-320A-1101-BR.pdf>> Acesso em jun. 2018.

MINNICH, A.; DRESSELHAUS, M.; REN, Z.; CHEN, G. **Bulk nanostructure thermoelectric materials**: Current research and future prospects. *Energy Environmental Science*, v. 2, 2009

MOURA, J.A.S. **Filmes Nanométricos de FeN e AlN Crescidos por Sputtering e Aplicações do Efeito Peltier**. Tese de doutorado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010, 124p.

MUHTAROGLU, A.; YOKOCH, A.; JOUANNE, A., Integration of thermoelectrics and photovoltaics as auxiliary power sources in mobile computing applications. **Journal of Power Sources**. v. 177, p. 239–246, 2008.

NNANNA, A. A. G., **Rutherford William and Eloma Wessam Assessment of thermoelectric module with nanofluid heat exchanger** [Article] // *Applied Thermal Engineering*. - February 2009. - pp. 491–500.

PIEDEDE P. M. **Efeitos Termoelétricos e suas aplicações**. Aquisição e Processamento de [Book]. - 1997.

PORTAL DA REFRIGERAÇÃO. **Refrigeração eletrônica**. Disponível em < http://www.refrigeracao.net/Topicos/refrigeracao_eletronica.htm> Acesso em jun. 2018.

RIFFAT, S. B.; MA, X. **Thermoelectrics**: a review of present and potential applications. Pergamon, Nottingham, 2003.

SANTOS, I. M., **Protótipo de uma unidade com tri-geração de energia para utilizações remotas: aplicação de módulo semicondutivo gerador termoelétrico**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

SANTOS, L.P. **Análise de desempenho de um gerador termoelétrico baseado no efeito Seebeck**. Dissertação de mestrado - Universidade de Taubaté, Taubaté/SP, 2010. 45 p.

SILVA, R. E. **Análise e otimização de um sistema termoelétrico para condicionamento de ar**. Dissertação de mestrado da Universidade de Taubaté, 2010, 66 p.

LOPES, L. N. S. **Aplicação do efeito termoelétrico no condicionamento de ar em automóveis**. Trabalho de conclusão de curso da Universidade Federal da Paraíba, 2017, 55p.

STRAZZA, F.; RIBERI, R., **Projeto de uma micro-adega climatizada de baixo custo**. Monografia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

TEJEDOR, S; MIEG, A. **Termoelectricidad, la energia del desequilibrio**. *Técnica Industrial*, v. 262, p. 62, 2006.